

Horváth István

GAMMAKITÖRÉSEK

értekezés

az *MTA Doktora* cím elnyeréséhez

2016

Tartalomjegyzék

ELŐSZÓ	4
1. TÖRTÉNETI BEVEZETŐ	5
1.1. A gammakitörések felfedezése	5
1.2. Bolygóközi hálózat	7
2. LÁGY GAMMAISMÉTLŐK	9
3. MEGFIGYELŐ MŰHOLDAK	11
3.1. A Compton Gamma Űrobszervatórium	12
3.2. Beppo-SAX – a források optikai azonosítása	13
3.3. Swift, a gyorsan forduló műhold	14
3.4. A Fermi Gammasugár Űrtávcső	16
3.5. További nagyenergiás csillagászati eszközök	19
4. A FORRÁSOK ELOSZLÁSA	20
5. A KITÖRÉSEK LEÍRÁSA	24
5.1. A gammakitörések spektrális megfigyelése	24
5.2. Lehetséges forrásmechanizmusok	34
6. A GAMMAKITÖRÉSEK IDŐTARTAMELOSZLÁSÁNAK ELEMZÉSE	37
6.1. A gammakitörések időtartama	37
6.2. A 3B katalógus időtartamainak elemzése	43
6.3. A végleges BATSE katalógus adatainak elemzése	50
6.4. A Swift BAT katalógus időtartamainak az elemzése	55
6.5. A Beppo-SAX műhold adatainak elemzése	60
7. AZ IDŐTARTAM – SPEKTRÁLISKEMÉNYSÉG ELOSZLÁS	63
7.1. A végleges BATSE katalógus adatainak elemzése	65
7.2. A BAT katalógus időtartam – keménység adatainak elemzése	71
7.3. A kitöréscsoportok fizikai jellemzői	75
8. GAMMAKITÖRÉS-CSOPORTOK, IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ	81
9. A GAMMAKITÖRÉSEK IRÁNY SZERINTI ÉS TÉRBELI ELOSZLÁSA	88
9.1. A gammakitörések irány szerinti eloszlása	89
9.2. A gammakitörések térbeli eloszlása	92
9.2.1. Kétdimenziós eloszlások gömbön	93
9.2.2. Legközelebbitárs-elemzések	96
9.2.3. Monte-Carlo bootstrap vizsgálat	100
9.3. Vizsgálatok újabb adatokkal bővítve	102
10. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TÉZISEK	106
A kutatások előzménye	107
Célkitűzések	110
Új tudományos eredmények	112
A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	115
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	117
HIVATKOZÁSJEGYZÉK	118
FÜGGELÉK	139

E művet ajánlom

a magyar gammakitörés-csoport tagjainak,

valamint

David Band, Paál György és

Horváth Lajos emlékének.

ELŐSZÓ

Az 1960-as években korszakalkotó felfedezések történtek a csillagászatban, többek között a kvazárok, a röntgensillagok, a kozmikus háttérsugárzás, a pulzárok, valamint a gammafelvillanások felfedezése. Az összes között ez utóbbiak a legrejtélyesebbek, melyek eredetét a mai napig nem sikerült minden kétséget kizáróan megmagyarázni a csillagászoknak.

Ellentétben a kvazárokkal, a röntgensillagokkal és a pulzárokkal, melyek természetét nagy vonalakban már a felfedezésük utáni évben sikerült megérteni, a gammakitörések (angolul gamma-ray burst, magyarul is általánosan használt rövidítéssel GRB) mibenléte több mint 40 év elteltével sem pontosan tisztázott.

Ez már önmagában fontossá teszi ezen objektumok tanulmányozását, de már közel két évtizede tudjuk azt is, hogy a gammafelvillanások nemcsak a Világegyetem legrejtélyesebb objektumai, hanem a legtávolabbiak közül valók, és így a Világegyetem korai szakaszának hírnökei. Dolgozatomban e rejtélyes jelenségekkel kapcsolatos eredményeimet foglalom össze.

Az első fejezet történeti bevezetője után a második fejezetben tárgyalom a lágy gammaismétlőket. A harmadik fejezetben azon műholdakat és a rajtuk található műszereket mutatom be, melyek megfigyelési adatait felhasználtam a dolgozatomban ismertett eredmények publikálása során. A negyedik fejezetben a források eloszlásával foglalkozom, míg az ötödik fejezetben a gammakitörések megfigyelt jellemzőit és lehetséges forrásmechanizmusait tárgyalom.

A hatodik fejezetben ismertetem a gammakitörések időtartameloszlásának elemzése során elért eredményeimet. Ez alapján felfedeztem egy harmadik típusú gammakitörést. A hetedik fejezetben e harmadik csoport azonosítását végzem az időtartam – keménység síkon. A nyolcadik fejezetben összefoglalom a kitörések csoportosításával kapcsolatos irodalmat.

A Világegyetem nagy skálán homogén és izotróp. Mivel a gammakitörések átlagos távolsága több ezer megaparszek, ezért a térbeli eloszlásukat homogénnek és izotrópnek kell, hogy észleljük. Az égbolton levő eloszlásukat véletlenszerűnek várjuk. Dolgozatom kilencedik fejezetében ezzel, és az ezzel kapcsolatban felmerülő problémákkal foglalkozom.

1. TÖRTÉNETI BEVEZETŐ

1.1. A gammakitörések felfedezése

Hosszas tárgyalások után, 1963. augusztus 5-én, a Szovjetunió, az Amerikai Egyesült Államok és Nagy-Britannia képviselői Moszkvában aláírták a Nemzetközi Atomcsend Egyezményt (Nuclear Test Ban Treaty¹), amely megtiltotta az atombombakísérleteket a légkörben, a világűrben és a víz alatt². Az egyezményhez azóta több mint száz ország csatlakozott, viszont Kína és Franciaország máig sem.

Az egyezmény betartásának ellenőrzésére hozta létre még a tárgyalások során az Egyesült Államok a Vela projektet, és lőtték fel a Vela műholdakat. Az elnevezés spanyol eredetű (velar), jelentése ör, vagy felügyel. A programot 1959-ben indították el, viszonylag csekély költségvetéssel. Összesen tizenkét műholdat állítottak pályára, hatot a Vela Hotel, hatot az Advanced Vela alsorozatban [Klebesadel, R. W., 2012]. A hat Vela Hotel műhold űrbéli nukleáris robbanások után kutatott, míg az Advanced Vela hagyományos robbanásokat is megfigyelt. A műholdakat a TRW (Thompson Ramo Wooldridge) cég gyártotta.

A hidegháború javában dúlt, az amerikaiak biztosra akartak menni, így a legvadabb elképzeléseket is ellenőrizni akarták. Ma már talán hihetetlennek tűnik, de attól is tartottak, hogy a Szovjetunió a Hold túlsó oldalán robbant kísérleti atomtölteteket [Vedrenne, G. and Atteia, J.-L., 2009]. Mint 2000-ben nyilvánosságra hozták, maga az amerikai légierő is rendelkezett hasonló tervekkel 1958-ban. A megfigyeléshez több, magas pályán keringő műholdra volt szükség. Végül a műholdakat a Van Allen sugárzási övezet fölé, négyszeres geoszinkron magasságú (120 ezer kilométer magas) pályákra állították [Klebesadel, R. W., 2012].

A műholdakat párosával indították. Az első Vela Hotel párt (Vela-1A és Vela-1B) 1963 augusztusában, a másodikat (Vela-2A és Vela-2B) 1964-ben, a harmadikat (Vela-3A és Vela-3B) 1965-ben állították pályára, tervezett élettartamuk 6 hónap volt, aminek végül több mint tízszeresét szolgálták ki. A műholdakat 12 külső röntgendetektorral, illetve 18 belső neutron- és gammasugár-detektorral szerelték fel [Klebesadel, R. W., Strong, I. B. and Olson, R. A., 1973].

A légköri atom- vagy hidrogénbomba-robbanás a másodperc ezredrészéig tartó gammavillanást produkál, amit egy kialakuló tűzgolyó fénysugárzása követ. A műholdak milliszekundumos skálán figyelték a jelenségeket, így több műhold együttes megfigyelése esetén a forrás térbeli helyzete, egyszerű háromszögeléses módszerrel, nagyjából 5000 kilométeres pontossággal meghatározható volt a Föld felszínén. Távoli források esetén ez nyilvánvalóan csak iránybeli lokalizációt jelent, amely azonban elegendő a lunáris vagy szoláris források azonosításához. Az irányszög meghatározásának hibája nagyjából 8-15 fok volt.

¹ Az egyezményről lásd http://en.wikipedia.org/wiki/Comprehensive_Nuclear-Test-Ban_Treaty

² Az egyezmény szövege a következő helyen található meg az interneten <http://www.ctbto.org/fileadmin/content/treaty/treatytext.tt.html>

Az Advanced Vela párokat 1967-ben (Vela-4A és Vela-4B), 1969-ben (Vela-5A és Vela-5B) és 1970-ben (Vela-6A és Vela-6B) indították, de már nem Atlas-Agena rakétákkal, mint az előző párokat, hanem a sokkal erősebb Titan IIIC-vel. Tervezett élettartamuk másfél év volt, de ezek a műszerek is tízszeresen felülmúlták az előzetes terveket, az utolsó 1984-ig működött. Az Advanced Vela műholdak 6 darab cézium-jodid gammadetektorral voltak felszerelve (lásd a 1.1.1. ábrát), melyek teljes térfogata nagyjából 60 cm^3 volt, és 150-750 keV (kiloelektronvolt) közötti energiájú fotonokat voltak képesek észlelni.

A műholdak folyamatosan jegyezték a megfigyelt adatokat, majd továbbították őket a Földre. Egy nukleáris bomba robbanását röntgensugárzás követi, melyet a gamma- és neutrontetektorok megfigyelése erősíthet meg. A Hold túloldalán való robbanást közvetlenül nem észlelték volna, de a felvert porfelhő a robbanás erejétől gyorsan tágul, melyet a műholdak a robbanás által aktivált atommagok gammasugárzását megfigyelve tudtak volna azonosítani.

Ray Klebesadel a Los Alamos Scientific Laboratory (ma LANL, Los Alamos National Laboratory) munkatársa (aki a Vela műholdak tervezésében és építésében is részt vett) elemezte a megfigyelt adatokat. Azokat a megfigyelési eredményeket is gondosan megőrizték, melyek biztosan nem nukleáris robbanást jeleztek. 1972-ben Ian Strongot kérték meg, hogy Klebesadellel és Roy Olsonnal közösen értékeljék ki ezeket az adatokat. A háromtagú csoport 16 olyan, 1969 júliusa és 1972 júliusa közötti eseményt talált, melyek bizonyosan nem földi, szoláris vagy lunáris eredetűek voltak. Gammatartományban olyan jelentős volt az emisszió, hogy ki lehetett zárni, hogy egy röntgenforrás nagyenergiás részéről legyen szó. Ebből az eredményből született meg a gammakitörésekkel (gamma-ray burst vagy röviden GRB) kapcsolatos első cikk [Klebesadel, R. W., Strong, I. B. and Olson, R. A., 1973].

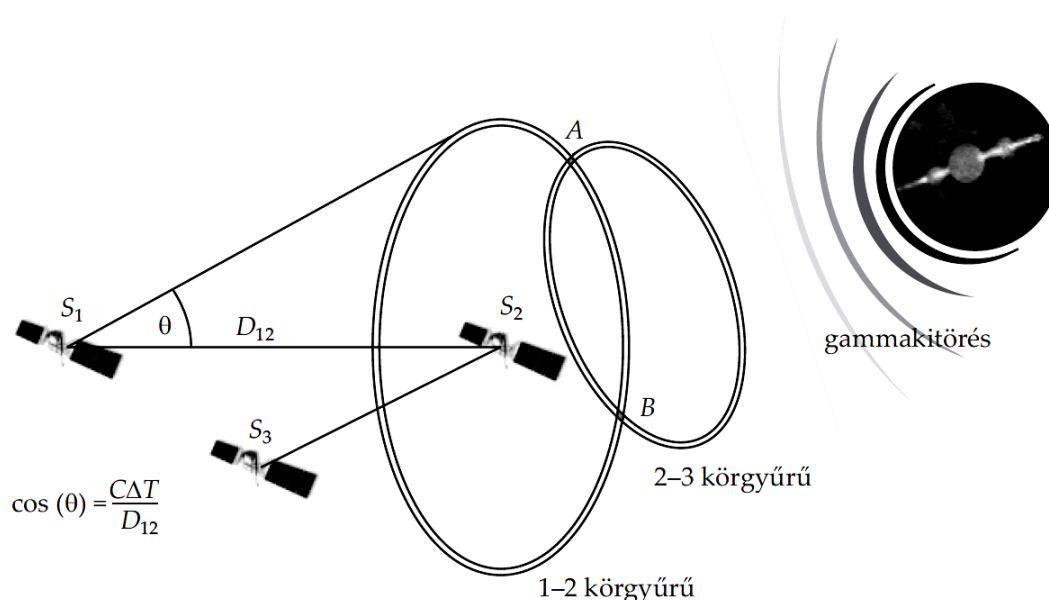


1.1.1. ábra. A Vela-5B műhold cézium-jodid detektora.

Cline és Desai az IMP-6 műhold fedélzetén lévő röntgendetektorral a napflarek megfigyelését végezték. Értesülve a felfedezésről, elsőként erősítették meg a gammavillanások létezését [Cline, T. L., Desai, U. D., Klebesadel, R. W. and Strong, I. B., 1973]. Tőlük függetlenül az OSO-7 műhold gammadetektorai is alátámasztották a felfedezést [Wheaton, W. A., et al., 1973].

1.2. Bolygóközi hálózat

A gammakitörések véletlen felfedezésének hatására az azt követő években több műholdra és műbolygóra gammasugárzást megfigyelő műszereket szereltek fel. A szovjet mesterséges égitestekre rendszerint elhelyeztek gammadetektorokat, ezek esetében azonban az adatokhoz való hozzájutás okozott problémát. Volt gammadetektor az 1977-ben földkörüli pályára állított Prognosz 6 és az 1978 októberében felbocsájtott Prognosz 7, valamint az SMM (Solar Maximum Mission) [Forest, D., et al., 1980] fedélzetén is. Mindhárom a Föld körül keringett. NaI és CsI gammadetektorok voltak a Venyera 10 és 11 [Mazets, E. P., Golenetskii, S. V., Aptekar, R. L., Gurian, Iu. A. and Ilinskii, V. N., 1981] és az ISEE-3 (International Sun-Earth Explorer) [Anderson, K., et al., 1978] műbolygókon. Gammadetektorok voltak még a High Energy Astronomical Observatory (HEAO), az International Cometary Explorer (ICE), a Helios 2, a Hakucho, a Hinotorti, a Ginga, a Phobos [Higdon, J. C. and Lingenfelter, R. E., 1990] és az Apollo-16 fedélzetén is [Metzger, A. E., et al., 1974].



1.2.1. ábra. Iránymeghatározás a háromszögeléses módszerrel. Részletes magyarázat a szövegben.

A gammavillanások tisztázatlan eredete miatt fontos lett volna a pontos lokalizáció az esetleges források tanulmányozására. A helymeghatározás egy detektor esetén csak korlátozottan lehetséges, mivel a rossz irányérzékenység miatt csak több tíz fok bizonytalansággal tud irányt mérni, így lényegében csak a fotonok beérkezését lehet rögzíteni. Megfelelő elektronikával ez a beérkezés milliszekundumos pontossággal rögzíthető. Két egymástól távoli detektor megfigyelése esetén a megfigyelt jelek időkülönbségéből az égi helyzet néhány fok pontossággal meghatározható. A két független megfigyelésből számolható pozíció egy vékony körgyűrű az égen. Pontos lokalizáláshoz minimum három, egymástól távoli műszer egyidejű megfigyelése szükséges (1.2.1. ábra) [Atteia, J-L., et al., 1987]. Itt a hangsúly az egymástól távoli kifejezésen van. Időben ez több másodpercet, még jobb, ha több perces eltérést jelent. Tehát a megfigyelőhálózat egy eleme keringhet a Föld körül, de a többi már nem, vagyis legalább két Földtől távoli műszer szükséges. A német Helios 2 űrszonda a Nap körül keringett, fedélzetén gammadetektorral, így kiválóan egészítette ki az előző bekezdésben említett műholdakat.

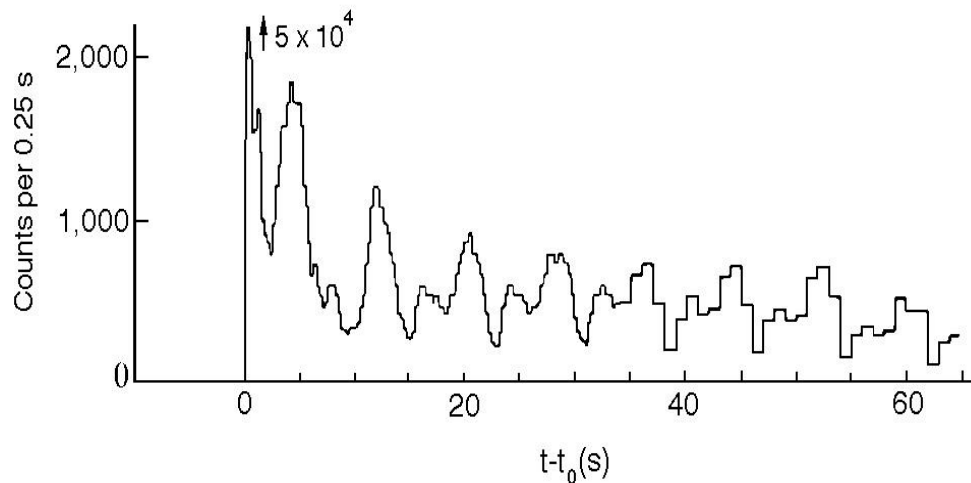
A harmadik tájékozódási pont a Vénusz körül keringő három műhold volt: az orosz Venyera 11 és 12 [Barat, C., et al., 1981] valamint az amerikai PVO (Pioneer Venus Orbiter) [Klebesadel, R. W., et al., 1980]. Mindhármát 1978-ban bocsájtották útjára. Az úgynevezett első bolygóközi hálózat (IPN, Inter Planetary Network) 1980-ig működött³. Megfigyelték a gammakitöréseket, majd a már említett háromszögelési módszerrel meghatározták a forrás irányát. Összesen 84 kitörésre állapítottak meg égi koordinátákat [Hartmann, D. and Epstein, R., 1989], de az adott pozícióban még a legnagyobb távcsövekkel sem találtak semmit.

1990-ben felbocsájtották az Ulysses műbolygót, majd 1991-ben a Compton Gamma Űrobszervatóriumot (CGRO, Compton Gamma Ray Observatory) [Fishman, G. J., et al., 1994], így ismét létrejött egy bolygóközi hálózat [Cline, T. L., et al., 1991], immár a második. Ez a bolygóközi hálózat lényegében azóta is folyamatosan működik, összességében több mint 27 műhold vagy műbolygó közreműködésével [Hurley, K., et al., 2013], bár a rendszer aktív tagjai időről időre változnak.

³ http://www.powerset.com/explore/semhtml/InterPlanetary_Network?query=grb

2. LÁGY GAMMAISMÉTLŐK

A lágy gammaismétlők (soft gamma-repeater, SGR) felfedezése 1979-ben történt. Az év első három hónapjában fedeztek fel a máig ismert hét SGR-ből hármat. Január 7-én a Sagittarius csillagképben találták meg az első ismétlő gammaforrást, majd 1979. március 5-én egy nem mindennapi esemény történt. A Helios 2 és a Pioneer Venus Orbiter detektorai a maximálisan megfigyelhető beütésszámot mérték (szaturálódtak), tehát a forrás erősségére csak alsó határt tudtak megállapítani [Mazets, E. P., et al., 1979], [Mazets, E. P. and Golenetskii, S. V., 1981], [Mazets, E. P., et al., 1982]. Ez a forrás százszorosan haladta meg az addig megfigyelt legerősebb Naprendszeren kívüli gammaforrás erősségét. A forrás a Nagy Magellán Felhő (LMC) egyik szupernóva maradványa volt.



2.1. ábra. Az 1979-es esemény „fénygörbéje”.

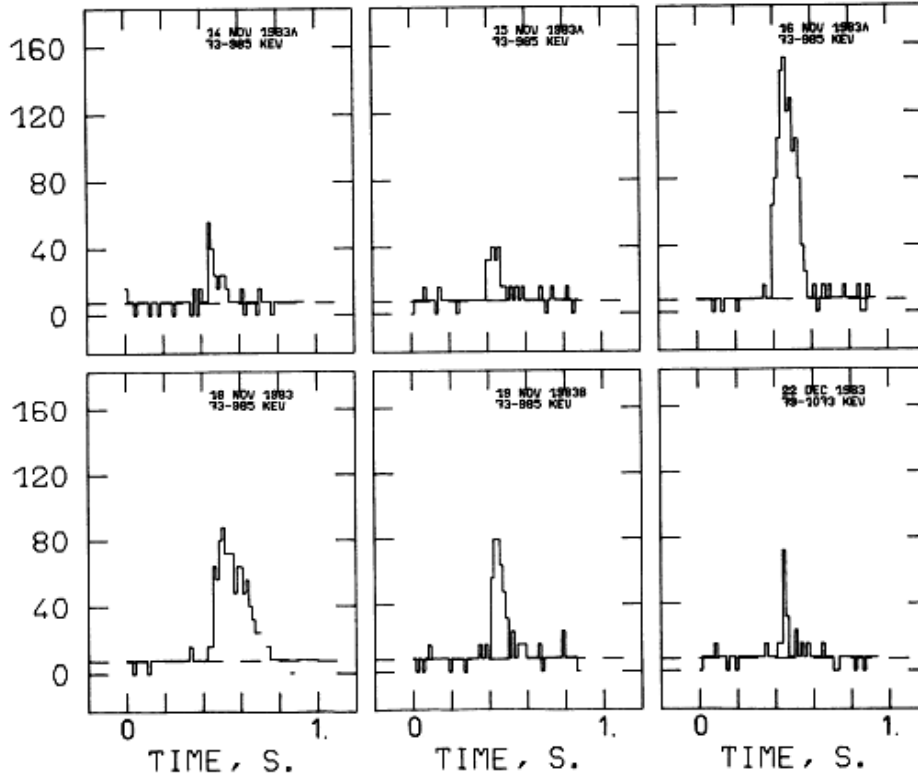
Kilenc nap múlva egy újabb forrást fedeztek fel⁴, amely három nap alatt három kitörést is produkált. Ezek után nem volt kétséges, hogy egy új csillagászati objektum felfedezéséről van szó, hiszen az addig megfigyelt több száz gammakitörés között egyszer sem sikerült ismételt aktivitást mutató forrást találni. A felfedezett három forrás legintenzívebben a gyenge gamma- és röntgentartományban sugárzott, tehát a sugárzási energiaeloszlásában is meg lehetett ezeket különböztetni a gammakitörésektől.

A negyedik lágy gammaismétlőt 1998-ban fedezték fel, mely hat hét alatt több mint száz kitörést produkált [Woods, P. M., et al., 1999]. A 2008-ban felfedezett két újabb ismétlő után, 2013-ban fedezték fel a hetedik lágy gammaismétlőt [Kennea, J. A., et al., 2013].

Dolgozatomban nem kívánok a lágy gammaismétlőkkel és forrásaikkal részletesebben foglalkozni, ezért itt csak néhány jellemzőjüket említem meg. Először, hogy az LMC-ben levő forrás a „lecsengő” fázisban pulzációt mutatott (lásd a 2.1. ábrát). Máso-

⁴ <http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/magnetar.html#Discovery>

dikként azt, hogy 1998-ban bebizonyították, hogy az úgynevezett magnetárok és a lágy ismétlők között kapcsolat áll fenn [Kouveliotou, C., et al., 1999]. Végül, a lágy gammaismétlők tipikusan nagyon rövid (rövidebb, mint egy másodperc, ahogy azt a 2.2. ábra is mutatja) kitöréseket produkálnak.



2.2. ábra. Néhány tipikus lágy gammaismétlő kitörés.

Magnetárnak a nagyon erős mágneses térrel rendelkező neutroncsillagokat nevezzük. A neutroncsillagoknak általában erős a mágneses terük, körülbelül 10^8 tesla. Ez nagyjából milliószorosa a csillagok megszokott mágneses térerősségének.

A magnetárok mágneses térerőssége még ennél is ezerszer nagyobb. A neutroncsillag kérgében felhalmozódott feszültség miatt időnként csillagrendések történnek, ezek során felszínüket jelentős mennyiségű gamma- és röntgensugárzás hagyja el. Ezek a magnetárok kitörései [Lander, S. K., Andersson, N., Antonopoulou, D. and Watts, A. L., 2015]. Az ezeket leíró elméletek azt mutatják, hogy az anyag erősen turbulens viselkedése miatt a mágneses tér a magnetárok belsejében nagyobb, mint a felszínükön. A felszín közelében a csökkenő mágneses térerősség a kéreg fűtéséhez, és a részecskék felgyorsításához vezet. Az egész folyamat hatására a neutroncsillag kezdeti igen gyors forgása lassul. Az elméletek azonban még sokszoros ellenőrzésre szorulnak, hiszen a 3.4. fejezetben bemutatandó Fermi műhold megfigyelései szerint, az SGR 0418+5729 esetében másfél év alatt sem volt kimutatható a forgási periódus változása [Guillot, S., Perna, R., Rea, N., Vigano, D. and Pons, J. A., 2015].

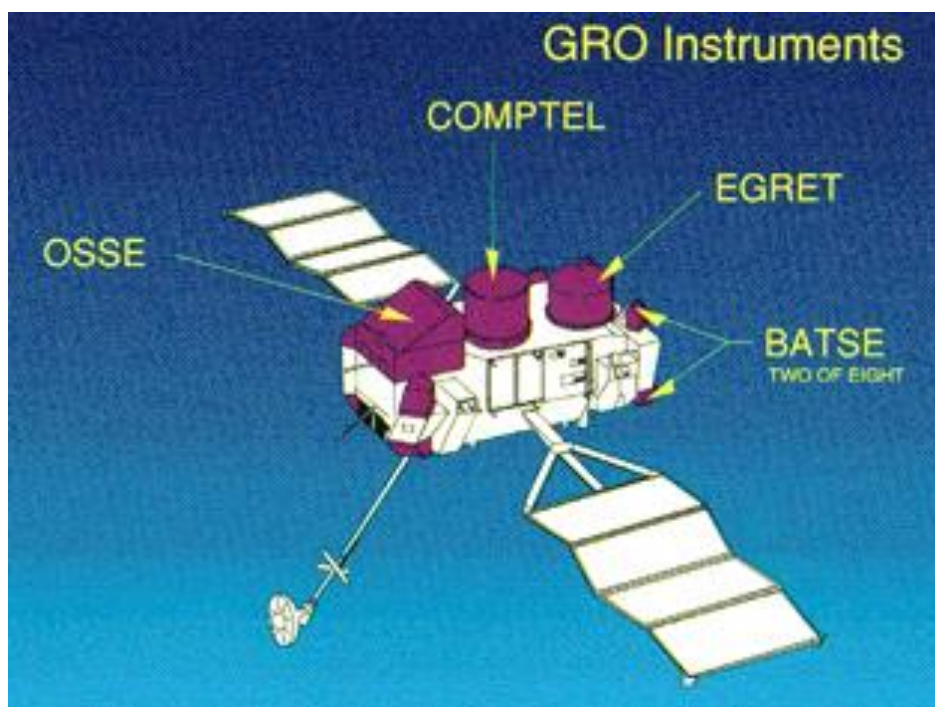
3. MEGFIGYELŐ MŰHOLDAK

A Compton Gamma Űrobszervatórium (Compton Gamma Ray Observatory CGRO) 1991-es felbocsátása előtt néhány száz gammakitörést figyeltek meg. A legfontosabb megfigyelő műholdak és műszerek a következők voltak:

- a KONUS detektorok a Venyera 11-14 műbolygókon,
- a SINGE a Venyera 11-12 műbolygókon,
- a GRBS (Gamma-Ray Burst Spectrometer) az ICE-on (International Comet Explorer),
- a Gamma Burst Detector a PVO-n (Pioneer Venus Orbiter),
- a Gamma-ray Burst Detector a Ginga műholdon.

Jelentősek voltak még a HEAO-1, valamint az SMM (Solar Maximum Mission) megfigyelései. E megfigyelések alapján gondolták a gamma-csillagászok, hogy a kitörések forrásai a galaxisunkban levő neutroncsillagok. Erre utaló jelek voltak a rövid idő alatt történő nagymértékű, nagyenergiás energiakibocsátás, és az intenzitás ezredmásodperces változása, de leginkább a megfigyelni vélt nagyenergiás spektrumvonalak. Mazets 1981-ben [Mazets, E. P., et al., 1981] tudósított egy 20–70 keV-nál jelentkező elnyelésről, majd a HEAO-1 vélt látni elnyelési vonalakat hasonló energián.

A Ginga 19 és 38 keV energián figyelt meg elnyelési vonalakat [Murakami, T., Fujii, M., Hayashida, K., Itoh, M., Nishimura, J.: 1988]. Ezen vonalak létét a későbbi megfigyelések nem igazolták.



3.1.1. ábra. A Compton Gamma Űrobszervatórium felépítése, és négy főműszere.

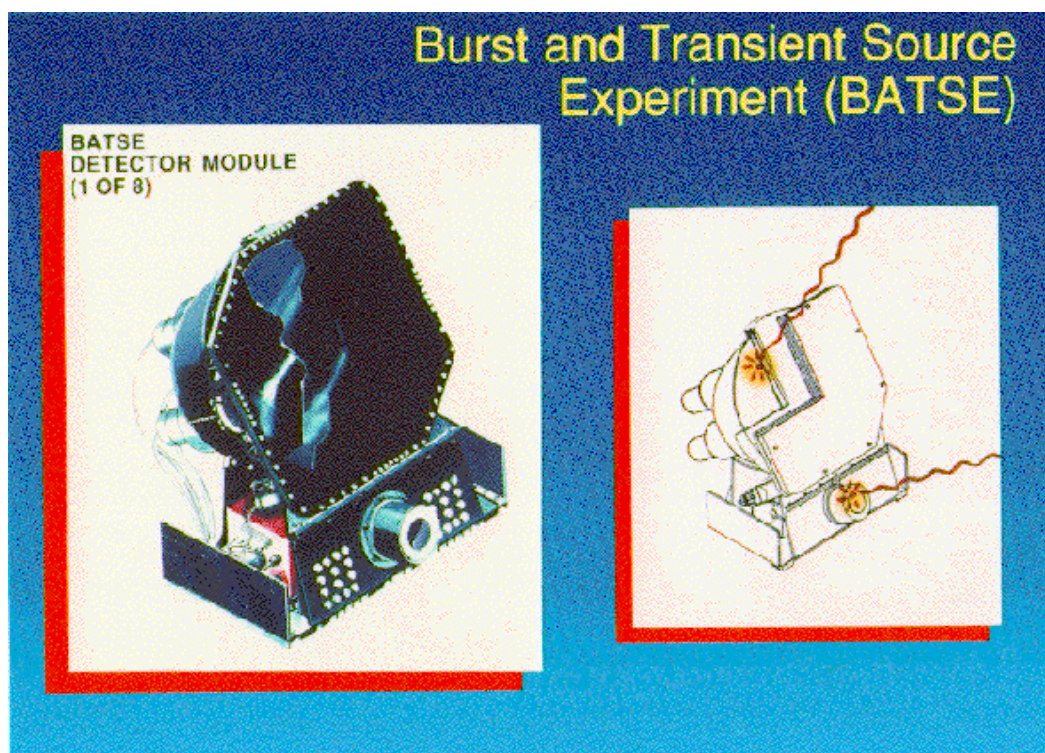
3.1. A Compton Gamma Űrobszervatórium

A NASA négy nagy megfigyelő műholdja közül a Compton Gamma Űrobszervatórium készült a gammatartomány vizsgálatára [Fishman, G. J., et al., 1994]. A műhold 1991 áprilisa és 2000 júniusa között működött. 2000. június 4-én a NASA döntése után visszairányították a Földre. Részben elégett a légkörben, a maradványai pedig a Csendes-óceán mélyén pihennek. A döntés a megsemmisítésről lényegében politikai volt, a MIR űrállomással összefüggésben [Katz, J., 2002].

A műholdon négy főműszer működött (3.1.1. ábra):

- Burst And Transient Source Experiment (BATSE) (3.1.2. ábra)
- Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)
- Imaging Compton Telescope (COMPTEL)
- Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)

Mivel dolgozatomban csak a BATSE műszer megfigyeléseivel foglalkozom, ezért a másik három műszer működésének a leírására nem térek ki.



3.1.2. ábra. A Compton Gamma Űrobszervatórium BATSE detektor 8 moduljának egyike (bal oldal), mely két detektort tartalmazott (jobb oldal).

A BATSE nyolc darab egyforma nátrium-jodid detektorból állt (3.1.1. ábra), amelyek lehetővé tették a forrás irányának hozzávetőleges meghatározását. Ebből született a későbbiekben részletesebben tárgyalandó eredmény, miszerint a kitörések égi eloszlása véletlenszerű. Azt a várakozást azonban, hogy segít a források térbeli helyzetét

azonosítani, nem váltotta be. Ennek oka az, hogy egy 4-12 fok hibával terhelt 20-25 magnitúdós objektum azonosítása, amely napok alatt eltűnik, akkoriban szinte lehetetlen feladat volt.

A gammakitörések forrásainak optikai azonosítása egy holland-olasz csoportnak sikerült, egy új típusú műhollddal.

3.2. Beppo-SAX – a források optikai azonosítása

A gammakitörések eredetének és mechanizmusának megfejtéséhez elengedhetetlen volt a kitörések forrásainak más hullámhosszakon való megtalálása. Az első próbálkozás a kitörések helyének a meghatározására a bolygóközi hálózat lokalizációja volt [Atteia, J-L., et al., 1987]. A helyet sikerült egy foknál pontosabban meghatározni, de sajnos csak 1-2 hét múlva tudták nagy távcsövekkel is megvizsgálni a kérdéses területet. Ma már tudjuk, hogy ennyi idő alatt egy tipikus gammakitörés-utófény megfigyelhetlenné halványodik.

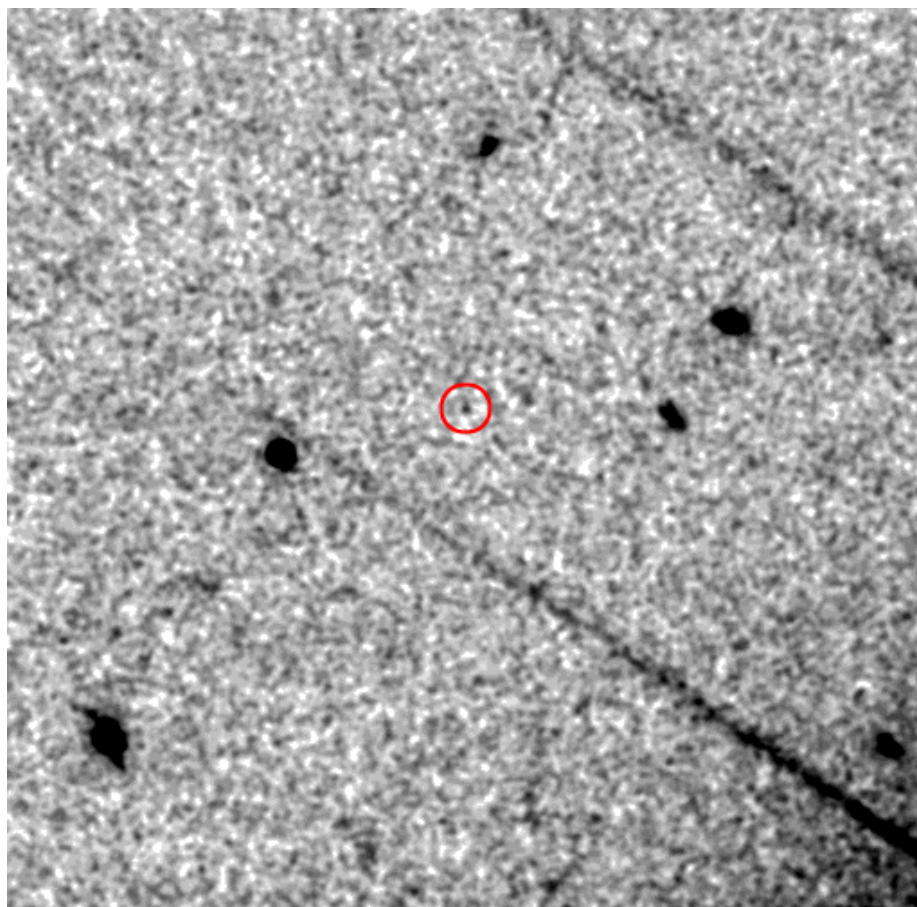
A második kísérletet a BATSE nyolc detektorának a felhasználása jelentette. Kettőnél több detektor adataiból a hozzávetőleges irány (3-20 fok pontossággal) meghatározható [Meegan, C. A., et al., 1996]. Ismerve a detektorok megfigyeléseinek intenzitásarányait, majd ezt a detektorok érzékenységének a szögfüggésével kombinálva a forrás égi pozíciója számítható. Sajnos a rendszer közel 1,5 fokos szisztematikus hibával volt terhelt, amihez hozzáadódott az intenzitástól függő statisztikus hiba. Ez utóbbi nagyon erős kitörések esetén is több mint egy fok volt, erős kitöréseknél 3-5 fokos, de a halványaknál meghaladhatta a 20 fokot is [Koshut, T. M., et al., 1996]. Az adatok továbbítása órákat vett igénybe, tehát a legjobb esetben is csak egy nap elteltével lehetett földi megfigyelést végezni.

Ma már tudjuk, hogy a tipikus optikai utófények napok alatt 20 magnitúdónál halványabbá válnak. Mivel a második elgondolás sem segített a kitörések forrásait optikailag azonosítani, a probléma kezdett egyre érthetlenebbé és éppen ezért egyre érdekesebbé válni. A nagyon nagy távcsövek megfigyelési ideje már nem volt elérhető. Most már csak egy műszer kellett, ami nagyon gyorsan (órák alatt) pontos koordinátát szolgáltat.

Az amerikai kutatók legnagyobb bánatára, a tragikus 1996-os évben (sikertelen volt a Cluster és az orosz Mars szonda fellövése is), a felbocsájtás után elvesztették a HETE űrszondát. A HETE II-t csak 2000-ben bocsájtották fel, így lett a holland-olasz Beppo-SAX műholdé a felfedezés dicsősége. 1997-ben a gammakitörések röntgensugárzása forrásainak helyét sikerült néhány ívperc pontossággal meghatározni [Costa, E., et al., 1997], 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 négyötödén ($z = 3,42$) [Greiner, J., 2012], [Greiner, J., 2016]. A 3.2.1. ábrán mutatott forrás az ötödikként azonosított GRB 980326 utófénye a látható tartományban. A Beppo-SAX műholdat 1996. április 30-án bocsájtották fel. A két évre tervezett időtartamot hat évre hosszabbították, így tudományos tevékenységét 2002. április végéig folytatta. 1082 gammakitörést figyelt meg a 40-700 keV tartományban

érzékeny Gamma-ray Burst Monitor műszerével, és ezekből 89-re történt megfigyelés a röntgentartományban (2-30 keV) érzékeny Wide Field Camera-val. [Piro, L. and Hurley, K., 2012]

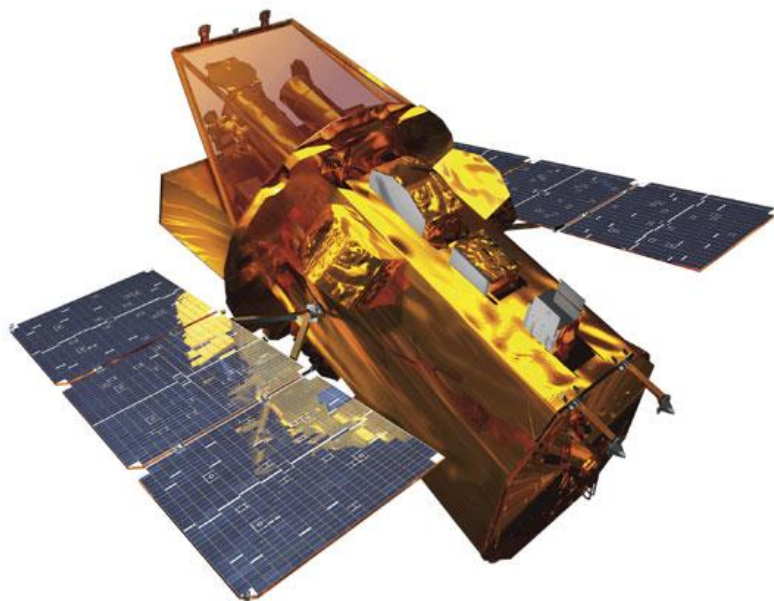


3.2.1. ábra. A GRB 980326 kitörés utófénye.

3.3. Swift, a gyorsan forduló műhold

A következő mérőhold a gammakitörések kutatásában a Swift műhold volt (lásd a 3.3.1. ábrát), amelyet 2004. november 20-án lőttek fel. 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 mérje a sugárzást, és pontos irány-koordinátákat szolgáltatson [Gehrels, N., et al., 2004]. A műhold meg is felelt a várakozásoknak, hiszen egy percen belül a Földre tudta küldeni a megfigyelési adatokat. Ezen kívül a gammakitörések távolságadatainak több mint háromnegyedét is a Swift műholdnak köszönhetjük [Greiner, J., 2016].

A Swift főműszereit a következőkben mutatom be.



3.3.1. ábra. A Swift műhold.

BAT (Burst Alert Telescope)

A BAT műszer gammatartományban érzékeny, 32768 darab 4x4x2 mm-es CdZnTe detektorból álló műszer, összfelülete 1,2 x 0,6 méter [Gehrels, N., et al., 2004]. 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 szabad, melyek adott minta szerint helyezkednek el. A maszk teljes felülete 2,7 négyzetméter. A maszk detektorra vetett árnyékával érik el, hogy a kódolt látómező $100^\circ \times 60^\circ$, azaz 1,4 szteradián legyen. A fedélzeti 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 x 256 pixeles detektorok 17' x 17' látómezővel bírnak. Hat különböző szűrővel a 170-600 nm-es tartományt képes vizsgálni, a pozíciót néhány ívmásodperc pontossággal tudja meghatározni.

XRT (X-ray Telescope)

Az XRT egy súroló tükrös röntgéntávcső, mely 110 cm^2 effektív felülettel és 23 ívperces látómezővel rendelkezik. A megfigyelt energiatartományban (0,2-10 keV) 18-20 ívmásodperces felbontást tud elérni. Működési hőmérséklete, csakúgy, mint az UVOT-nak, 20°C . [Burrows, D. N., et al., 2000]

A Swift műhold másik fő célja a rövid kitörések forrásainak az optikai azonosítása volt, ugyanis az 1997 és 2003 között optikailag azonosított 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 bocsájtják-e ki őket.

A Swift e területen is kiválóan vizsgázott: megtalálta a rövid kitörések forrásait [Berger, E., et al., 2005]. Kiderült, hogy tipikusan közelebb vannak hozzánk, mint a hosszú kitörések [Bagoly, Z., et al., 2006]. Az anyaggalaxisaikban sokkal kisebb a csillagkeletkezési ráta, mint a hosszú kitörések anyaggalaxisaiban.

Érdekes még megemlíteni, hogy a Swift által mért vöröseltolódások átlaga ($z = 2,6$) jelentősen eltér a más műholdak által mért vöröseltolódások átlagától ($z = 1,2$) [Bagoly, Z., et al., 2006], [Jakobsson, P., et al., 2006].

3.4. A Fermi Gammasugár Űrtávcső

A 2008-as év nagy áttörést hozott a nagyenergiás fizikában, földön és égen egyaránt. A CERN huszonhét kilométer kerületű köralagútjában beindult 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 (3.4.1. ábra), amellyel olyan nagy energián vizsgáljuk a Világegyetemet, amilyenre eddig nem volt lehetőségünk [Meegan, C. A., et al., 2009]. 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 ekkor kapta Enrico Fermi után a *Fermi* nevet. A műhold egyszerre az égbolt több mint feléről képes összegyűjteni a felé tartó nagyon nagy energiájú gammafotonokat, keményebbeket, mint amilyeneket eddig észlelhettünk.

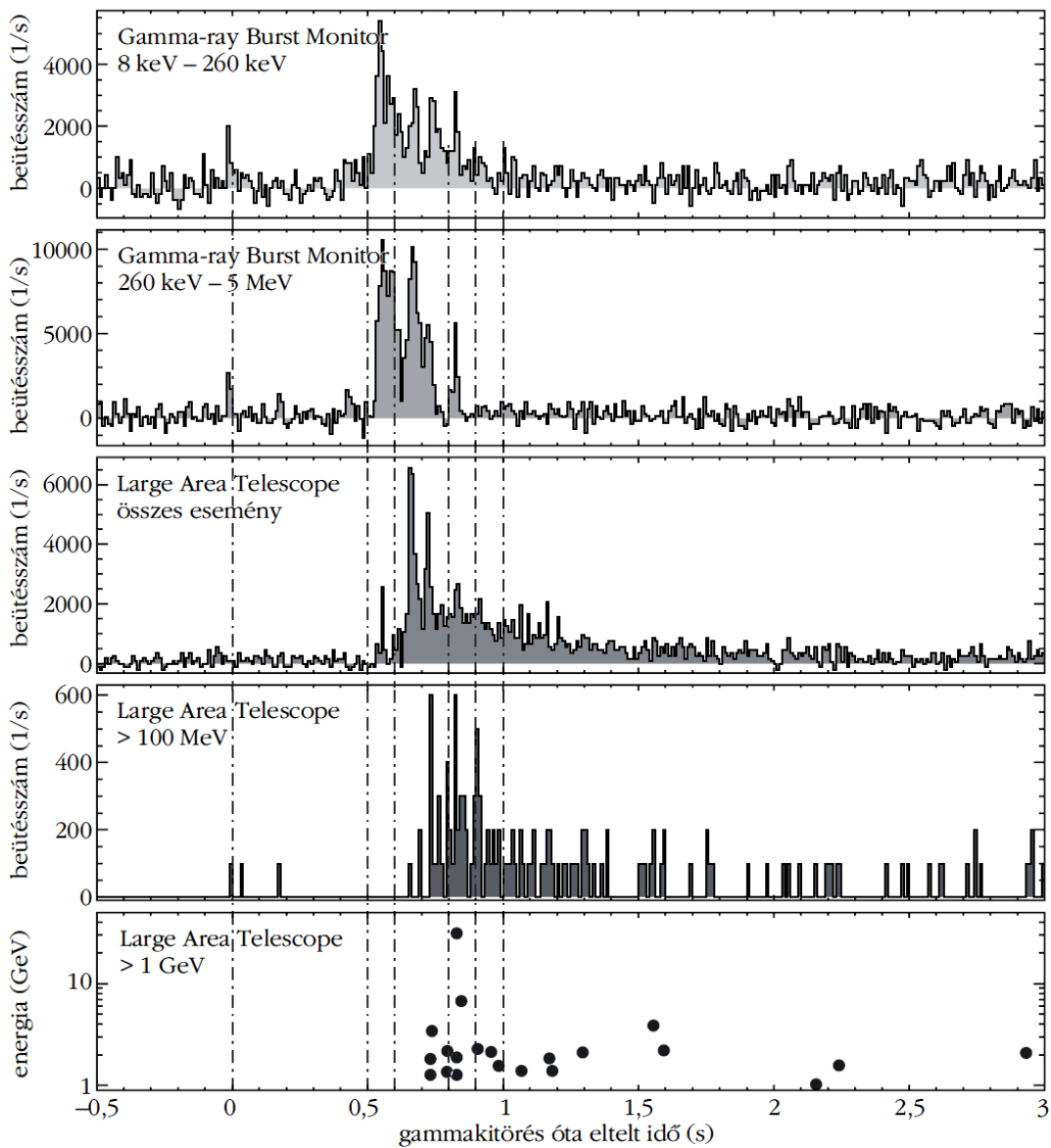


3.4.1. ábra. A Fermi (eredeti nevén GLAST) műhold.

Az amerikai, francia, japán, német, olasz és svéd költségvetésből elkészült GLAST űrobszervatórium újabb lendületet adott a nagyenergiás asztrofizikának, amely terület a kétezres évek elején megfelelő műszer híján kevés új felfedezéssel szolgált. Nemcsak pótolja elődjét, a Compton Gamma Űrobszervatóriumot, de felül is múlja annak képességeit. Két főműszere közül a *Large Area Telescope* (LAT) az, amelytől na-

gyon sokat vártak. Mérési tartományának felső határa 300 GeV fölött van, és az égboltnak egyszerre igen jelentős részét, nagyjából az egyötödét tudja megfigyelés alatt tartani. Másik főműszere a Fermi Gamma-ray Burst Monitor (előző megnevezése: *GLAST Burst Monitor*, *GBM*) detektorrendszere, ami 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 [Atwood, W. B., et al., 2009]. Jóval halványabb forrásokat is azonosítani képes és egy teljes nagyságrenddel magasabb energiahatárig tud mérni, akár 300 GeV feletti fotonokat is detektál (az észlelés alsó határa 20 MeV). Két foton detektálása közötti holtidő 100 mikroszekundum, ez ezerszer kisebb, mint az EGRET-é volt, és ez képessé teszi arra, hogy gyorsan változó jelenségek emisszióját is nagy pontossággal megmérje [Mészáros, P., 2013].

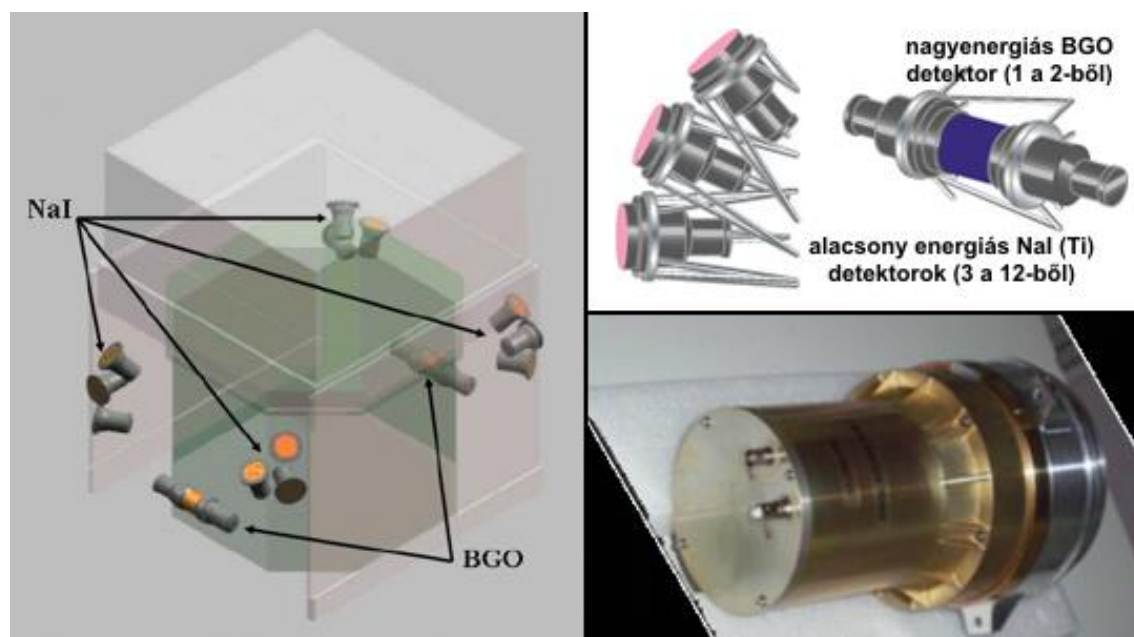


3.4.2. ábra. A GRB 090510 gammakitörés fénygörbéje különböző energiasávokban a Fermi műhold adatai szerint. A nagyobb energiájú fotonok bizonyos időközönként érkeznek.

A Fermivel végzett egyik legérdekesebb kísérlet a Lorentz-invariancia érvényességének ellenőrzése. Bizonyos kvantumgravitációs elméletek szerint a Lorentz-invariancia sérülhet, és azt jósolják, hogy a fotonok sebessége függ az energiájuktól. Ebből következik, hogy 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 kvantumgravitációs effektusok a Lorentz-invariancia sérülését okozzák. Úgy gondolják, hogy nagysága a Planck-tömeg környékén van (ami kb. 10^{19} GeV/c²). [Abdo, A. A., et al., 2009]

A fénysebességnek nagyon kis energiafüggése is kimutatható lenne segítségével kozmológiai távolságokon, ahol a hatás az út során összegződik, és például a gammakitörések fénygörbéjében megfelelő időfelbontás esetén mérhetővé válhat. A LAT- és GBM-műszerekkel észlelt GRB 090510 jelű kitörés segítségével az eddigieknél sokkal pontosabb korlátot sikerült adni a fénysebesség fotonenergiától való függésére. Mint azt a 3.4.2. ábra mutatja, a röntgenfotonok és a nagyenergiás fotonok (GeV feletti energia) beérkezése között nagyjából 0,3 másodperc különbség van.

A GRB 090510, illetve GRB 080916c jelű kitörésekről a GBM, valamint LAT műszerekkel kapott szélessávú (8 keV-től 300 GeV-ig) mérések (lásd pl. a 3.4.2. ábrát) segítségével alsó korlátot kaptak MQG értékére, amely nagyobb, mint a Planck-tömeg. Ennek a segítségével ki lehetett zárni az ennél kisebb értéket jósoló elméleteket.



3.4.3. ábra. A GBM detektorainak elhelyezkedése a műhold oldalain (balra), a szcintillációs detektorok két típusa (jobbra fent) és az egyik detektor fényképe (jobbra lent).

A GLAST másik műszere, a GBM, a NASA *Marshall Space Flight Center* (MSFC) kutatóközpontjában épült meg *Charles Meegan* és *Jochen Greiner* vezetésével [Meegan, C. A., et al., 2009]. 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 (3.4.3. ábra). 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 néhány fok pontossággal meghatározza a hirtelen felvillanó gammakitörések helyzetét. A tizenkét nátrium-jodid (NaI) detektor és a két darab, nagyobb energiatartományban 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 egy évtizeddel korábbi elődje, a CGRO BATSE műszere, amelynek máig a legnagyobb egy műszerrel megfigyelt gammakitörés-adatbázist köszönhetjük. A két műszer közötti különbség leginkább abban nyilvánul meg, hogy a GBM hamarabb és pontosabban tudja meghatározni a kitörések irányát, így jelzésére a LAT és más egyéb távcsövek hamarabb tudnak az adott irányba fordulni.

3.5. További nagyenergiás csillagászati eszközök

A gammacsillagászat fontosságát mutatja, hogy jelenleg is több műszer 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) gamma-műholdja az INTEGRAL (INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory), melyet 2002-ben bocsájtottak 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.

A NASA Global Geospace Science (GGG) Wind műholdját 1994-ben bocsájtották fel. 2004 óta a Nap-Föld rendszer L1 Lagrange pontjában Nap körüli pályán kering, tehát a műbolygó a helyes megnevezés azóta. A fedélzetén található Konus nevű műszer 10 keV és 10 MeV közötti fotonokat képes érzékelni.

Röntgentartományban figyeli 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 (100 GeV feletti) fotonok légkörbe csapódását (pl. részecskezápörök vagy Cserenkov-sugárzás formájában). Ilyen megfigyeléseket végzett illetve végez a STACEE (Solar Tower Atmospheric Cherenkov Effect Experiment) Albuquerque közelében, a MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes) a Kanári-szigeteken, a CACTUS (Converted Atmospheric Cherenkov Telescope Using Solar-2) Kaliforniában, a VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) Arizonában, és a HESS (High Energy Stereoscopic System) Namíbiában.

A jelenleg is működő, földkörüli pályán levő, gammakitöréseket is megfigyelő műholdak: AGILE, Fermi, INTEGRAL, Wind és Swift.

4. A FORRÁSOK ELOSZLÁSA

Az 1980-as évek végéig közel 500 gammafelvillanást észleltek a különböző űr-eszközök [Fishman, G. J. and Meegan, C. A., 2012]. Ezek nagy részét a PVO [Evans W. D., Fenimore E. E., Klebesadel R. W., Laros J. G. and Terrel N. J., 1981] és a KONUS [Mazets, E. P., Golenetskii, S. V., Aptekar, R. L., Gurian, Iu. A. and Ilinskii, V. N., 1981] figyelte meg, de a felvillanásoknak az eredete még tisztázásra várt. Egyetlen forrásuk térbeli helyzete sem volt ismert (kivéve természetesen a már említett lágy gammaismétlőket). Az sem volt ismeretes, hogy a forrás milyen erős, ugyanis a mért gammasugárzást okozhatta egy közeli gyenge, vagy egy távoli, de sokkal erősebb forrás is.

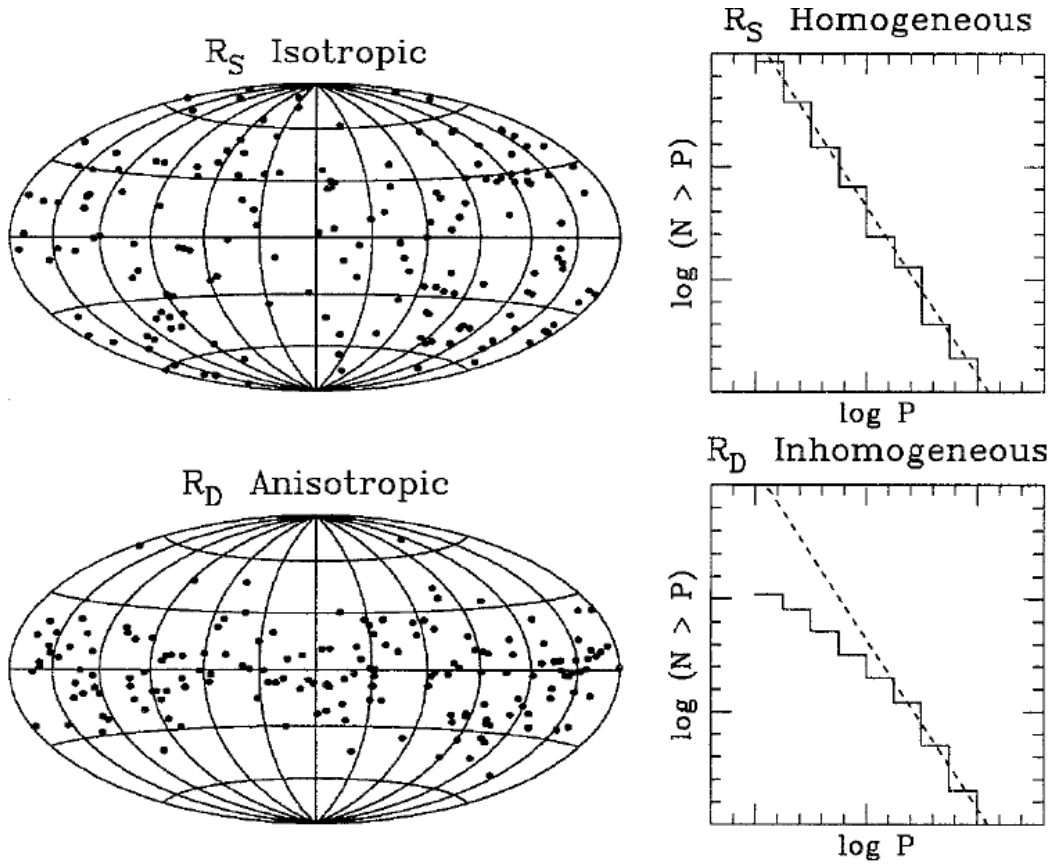
Az egyik elfogadható feltételezés a galaktikus neutroncsillagokból jövő sugárzás volt [Higdon, J. C. and Lingenfelter, R. E., 1990], [Harding, A. K., 1994], [Colgate, S. A. and Li, H., 1996a], [Colgate, S. A. and Li, H., 1996b]. Ez esetben a források a galaxis síkjában vagy a galaktikus haloban helyezkednének el, 0-30 kiloparszek távolságban.

A különféle asztrofizikai objektumok távolságának becslésében nagy szerepe van az égbolton való eloszlásuknak, elhelyezkedésüknek. Ha például bizonyos források a bolygók felszínén lennének, akkor az égen ábrázolva az ekliptika mentén helyezkednének el, korrelálva természetesen a bolygópozíciókkal.

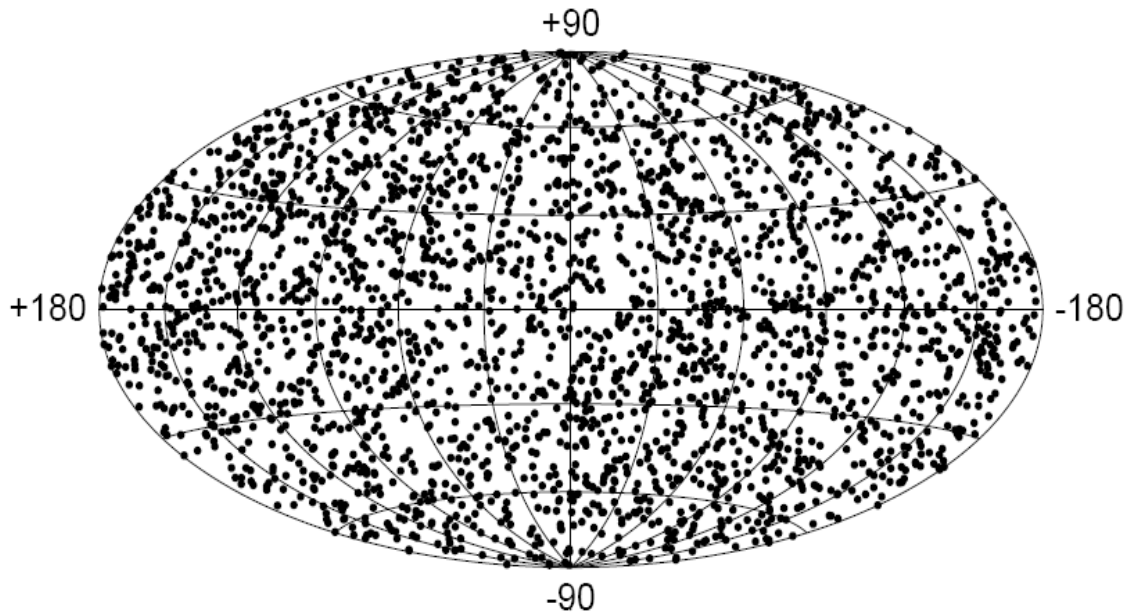
Ha valamely asztrofizikai megfigyelés esetén például közeli csillagok lennének a források, akkor a helyük az égre vetítve véletlenszerűen helyezkedne el, tehát betöltenék a teljes eget. Ha egy adott távolságnál közelebb lévő források számát N -nel jelöljük, akkor a kétszer akkora távolságnál közelebb lévő források száma körülbelül $8N$ lenne, ha a források eloszlása homogén, hiszen a megfigyelt objektumok száma arányos a térfogattal.

Ha a galaxisunkban levő egyforma fényességű forrásokat figyelünk a Földről, akkor a kétszer olyan távolságban lévő források száma csak $4N$ lenne, hiszen a források egy lapos korongban helyezkednek el (lásd a 4.1. ábra bal alsó ábráját), és a kétszer akkora sugarú kör területe csak négyszer nagyobb.

Tehát a források számának a fényességüktől való függése információt ad a források térbeli elhelyezkedésével kapcsolatban. Nézzünk egy egyszerű példát. Töltsék ki a források a teljes teret egyenletesen, és legyen minden forrás egyforma fényességű. Ez esetben a legfényesebbnek látszó forrás van hozzánk legközelebb. A négyszer halványabb források kétszer messzebb vannak, de mivel a kétszer nagyobb sugarú gömb térfogata nyolcszor nagyobb, ezért a négyszer halványabb források száma átlagosan nyolcszor több. A kitevőben lévő kettes és hármas eredményeképpen a logaritmikus ábrázolásnál a mérési adatokat egy mínusz háromketted meredekségű egyenes közelíti jól. Ez a híres „ $-3/2$ ”-es törvény. Szemléletesen kétszeres logaritmikus skálával tehető. Ha a források nem mind egyforma fényességűek, de az eloszlásuk egyenletes, a „ $-3/2$ ”-es összefüggés akkor is igaz, hiszen a közel azonos fényességűekre igaz, a kicsit halványabbakra is igaz (mert az eloszlásuk a térben minden egyes fényességosztályra külön-külön homogén), és több „ $-3/2$ ”-es eloszlás összege is követi a „ $-3/2$ ”-es összefüggést.



4.1. ábra. A Gamma-ray Bursts kötetben [Fishman, G. J. and Meegan, C. A., 2012] bemutatott ábra szemlélteti, hogy homogén térbeli eloszlás esetén (jobb felső ábra, a vízszintes tengelyen a megfigyelt fényesség van ábrázolva) statikus euklideszi térben az égbolteloszlás véletlenszerű (izotróp) kell legyen. Amennyiben a térbeli eloszlás nem homogén (jobb alsó ábra), úgy az égbolteloszlás sem feltétlenül az.



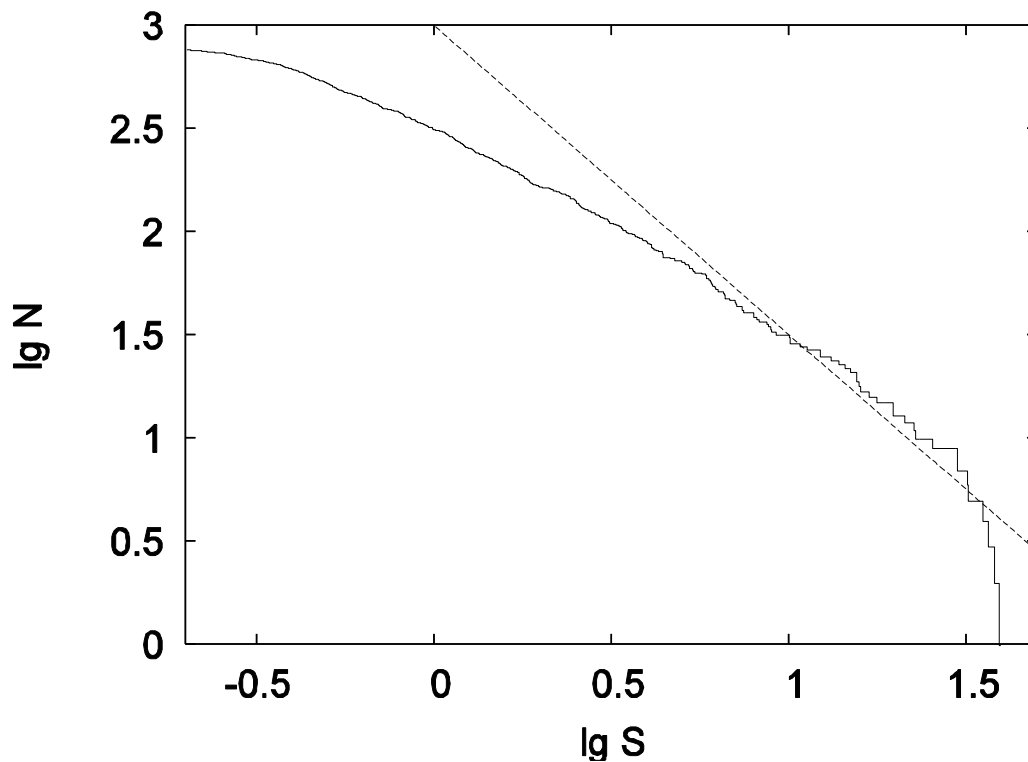
4.2. ábra. A gammakitörések eloszlása az égbolton a Compton Gamma Űrobszervatórium Burst And Transient Source Experiment (BATSE) adatai alapján.

Az előző fejezetben ismertetett Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) műhold egyik nagy tudományos eredménye volt a kitörések égi eloszlásának megmérése. Ez az eloszlás véletlenszerűnek bizonyult (lásd a 4.2. ábrát) [Meegan, C. A., et al., 1996], és kizárta a galaktikus eredetet. Ugyanis ha a források nagy része a teljes galaxisban található, akkor a galaxis síkjának látszódnia kellene az égi eloszláson. Ennek ellenére egészen 1996-ig tartotta magát a kiterjesztett galaktikus halo-eredet hipotézise (extended galactic halo) [Brainerd, J., 1992], [Harding, A. K., 1994], [Podsiadlowski, P., Rees, M. J. and Ruderman, M., 1995].

Ha a források véletlenszerűen oszlanak el az égen, akkor csak három térrész képzelhető el a források eredetére:

- 1, A Naprendszerhez-közel tér.
- 2, A közeli csillagokhoz hasonlóan egy néhány tucat, maximum néhány száz parszeknyi térrész.
- 3, Száz megaparszek vagy annál lényegesen nagyobb sugarú tér.

Az elsővel kapcsolatban dolgozták ki az üstökös felhő elméletet, amely a 100-1000 CsE (csillagászati egység = átlagos Nap-Föld távolság) távolságban keringő üstökösöket tekintette forrásnak [Bickert, K. F. and Greiner, J., 1993], [White, R. S., 1993], [Luchkov, B. I., 1994].



4.3. ábra. A BATSE által megfigyelt kitörések számának fényesség szerinti eloszlása. A vízszintes tengelyen a fényesség $\text{foton}/\text{cm}^2/\text{s}$ egységben vett értékének a logaritmus van ábrázolva. A szaggatott vonal egy $-1,5$ meredekségű egyenes.

A háromféle eredet között segít választani a fényességeloszlás-ábra, az úgynevezett $\log N - \log S$ diagram [Cohen, E. and Piran, T., 1995], [Fenimore, E. E. and Bloom, J. S., 1995]. A 4.3. ábra mutatja közel ezer kitörés látszó fényesség szerinti

kumulatív eloszlását [Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A., 1996]. Az ábra azt mutatja, hogy hány kitörést figyeltünk meg adott idő alatt, amely az adott fényességnél (S) fényesebb volt.

Euklideszi tér és homogén térbeli eloszlás mellett, statikus esetben, a már az előzőekben leírt okok miatt egy körülbelül -1,5 meredekségű egyenest (szaggatott vonal a 4.3. ábrán) kell kapnunk a log-log ábrán. Ez csak a fényes gammakitörések esetén teljesül [Fishman, G. J., et al., 1994]. A halvány kitörések hiányát persze lehetne magyarázni elnyeléssel, de csillagászati megfigyelésekből tudjuk, hogy sem a Naprendszer közelében, sem a néhány száz parszekes környezetünkben nincs ismert elnyelő anyag. Egy mindent áteresztő, csak gammában elnyelő közeg feltételezése pedig abszurd lenne.

Mindezek alapján csak a harmadik eset lehetséges. Ugyanis statikus euklideszi tér esetén mindig igaz a mínusz másfeles törvény. Világunk azonban nem ilyen, hiszen tágul [Hubble, E., 1929]. A kozmológiai megoldások ([Einstein, A., 1916], [Friedmann, A., 1922], [Walker, A. G., 1936], [Eisenhart, L. P., 1949], [Weinberg, S., 1972], [Paál, G., Horváth, I. and Lukács, B., 1992], [Peebles, P. J. E., 1993]) valóban megmagyarázhatják a mért $\log N - \log S$ eloszlást, azonban ehhez a kitörések forrásait a legtávolabbi kvazárok távolságáig kell feltételeznünk [Wickramasinghe, W. A. D. T., et al., 1993], [Emslie, A. G. and Horack, J. M., 1994], [Cohen, E. and Piran, T., 1995], [Fenimore, E. E. and Bloom, J. S., 1995], [Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A., 1996]. Ezt az elképzelést már a hetvenes években felvetették [Usov, V. V. and Chibisov, G. V., 1975], [Prilutskii, O. F. and Usov, V. V., 1975], de csak Paczynski cikke [Paczynski, B., 1986] után vették komolyabban. Pedig a 4.1. ábráról is világosan látszik, hogy statikus euklideszi tér esetén, egyenletes eloszlásnál a bal felső égi és jobb felső térbeli eloszlást, vagy a két alsó eloszlást figyelhetjük meg. De a gammakitörések a bal felső és jobb alsó eloszlásokat követik. Ez csak akkor lehetséges, ha az általuk kitöltött tér nem statikus euklideszi. A nagyon távoli (kozmológiai távolságban levő) objektumok által kitöltött tér nem statikus euklideszi, mert a négydimenziós téridő görbült.

De a nagyon távoli források gondolata többeknek annyira hihetetlennek tűnt, hogy a tudóstársadalom legalább fele inkább az egyre extrémebb kiterjesztett halo elméletek kidolgozásán fáradozott. Tették mindezt egészen 1997-ig, az első gammakitörés-utófény, illetve -forrás azonosításáig.

5. A KITÖRÉSEK LEÍRÁSA

Az utófények 1997-es felfedezéséig a gammakitöréseket csak a gammatartományban tudták megfigyelni. A kibocsátás távolsága nem volt ismert, a kitörés maximum néhány percig tartott, ezért a vizsgálatok csak az időbeli lefolyásra illetve az észlelt fotonok energiaeloszlására (spektrumára) korlátozódhattak. Az alábbiakban áttekintem a gammaspektrális vizsgálatokat, majd a következő fejezetben rátérek az időbeli lefolyás elemzésére.

5.1. A gammakitörések spektrális megfigyelése

Régóta megoldatlan a gammaspektrumok előállításának, az úgynevezett gamma inverz problémának a kérdése [Bouchet, L., 1995]. Ennek oka a detektorok válaszmátrixainak bonyolult volta. A mért spektrum ugyanis nem egyezik meg a megfigyelt spektrummal, hanem annak és a detektorban lezajló folyamatoknak a konvolúciója (együttes hatása). A mért adatokból a megfigyelt valódi spektrum kiszámítására több úgynevezett dekonvolúciós eljárás létezik [Bouchet, L., 1995]. A mért spektrum nem egy analitikus függvény, hanem egy adatsor. Ezt jellemezhetjük az $\mathbf{a}$ vektorral, ami a mért adatok energia szerint rendezett sora. Ebből kell meghatározni a bejövő spektrumot, melyet egy $\mathbf{s}$ vektorral jellemezhetünk. A két vektor nem feltétlenül azonos méretű. A detektorra jellemző tulajdonságokat egy mátrixszal szokás leírni. Sajnos azonban a probléma megoldását jelentő $\mathbf{A}$ mátrix nem ismert, csak az inverze. A megoldás ugyanis a következő alakú lenne:

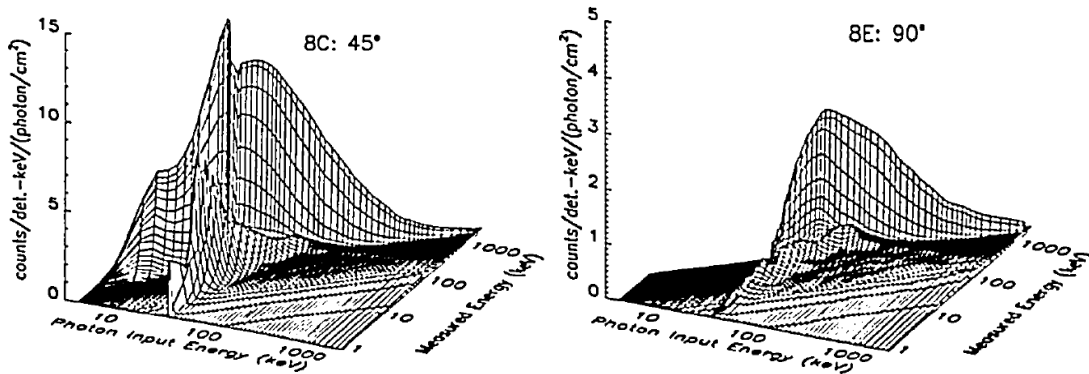
$$\mathbf{s} = \mathbf{A} \mathbf{a} \quad (5.1.1)$$

Mint írtam az $\mathbf{A}$ mátrix alakját nem ismerjük, ismerhetjük viszont az $\mathbf{A}$ mátrix $\mathbf{R}$ inverzét. Hiszen ekkor

$$\mathbf{a} = \mathbf{R} \mathbf{s} \quad (5.1.2)$$

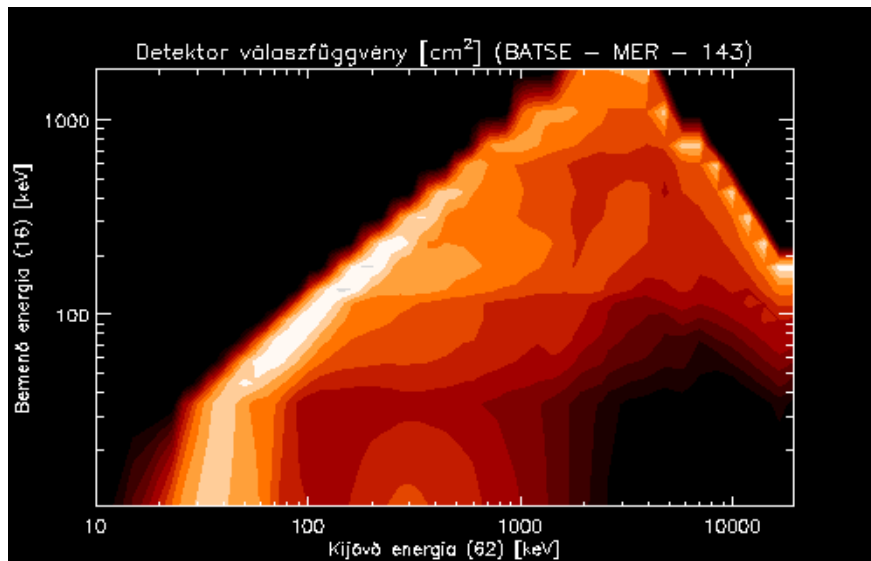
Ez az egyenlet azt fejezi ki, hogy egy adott spektrummal besugározva a detektort, milyen eredményt ($\mathbf{a}$) kapunk. Az $\mathbf{R}$ mátrixot hívjuk a detektor válaszmátrixának, mely laboratóriumban mérhető. Az $\mathbf{R}$ mátrix függ a műhold felépítésétől (geometriájától) is, hiszen a különböző műholdelemeken a fotonok és a részecskék szóródhatnak. Azonban az $\mathbf{R}$ mátrix általában nem invertálható, tehát a spektrumot előállító inverze, az $\mathbf{A}$ mátrix nem ismert. Ez az úgynevezett gamma inverz probléma. A detektor válaszmátrixát ($\mathbf{R}$)

laboratóriumban tudjuk mérni. A CGRO BATSE egyik detektorának válaszmátrixát mutatja az 5.1.1. ábra [Pendleton, G. N., et al., 1995].



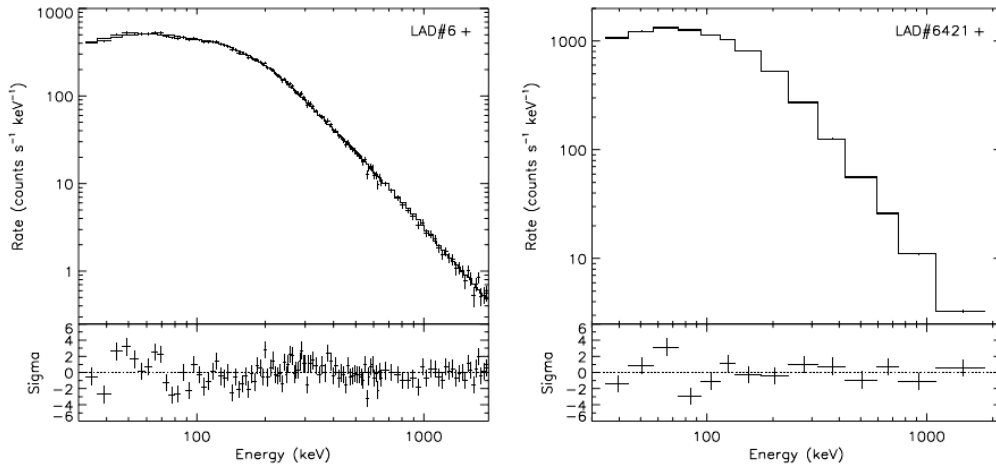
5.1.1. ábra. A CGRO BATSE egyik detektorának válaszmátrixa a beérkezési szögtől függően. Vízszintes síkban van a bemenő és az észlelt energia, függőlegesen pedig a megfigyelt beütésszám a feltüntetett egységekben.

A CGRO BATSE detektorok válaszmátrixait a BATSE csoport 1995-ben publikálta [Pendleton, G. N., et al., 1995]. Az 5.1.2. ábrán Veres Péter diplomamunkásom ábrázolt egy hasonló válaszmátrixot [Veres, P. 2006]. A gamma inverz problémát részletesen kifejti Bouchet tanulmánya [Bouchet, L., 1995].



5.1.2. ábra. A CGRO BATSE egyik detektorának válaszmátrixa (kontúr ábra).

Több különböző megoldással kísérleteztek az irodalomban: szinguláris értékre való felbontás [Kahn, S. M. and Blissett, R. J., 1980], Backus Gilbert módszer [Backus, G. E. and Gilbert, J. F., 1970] [Loredo T. J. and Epstein R. I., 1989], Phillips-Towmey módszer [Phillips, D. L., 1962] [Towmey, S. 1963] stb., azonban egyik sem állítja elő az általános megoldást. A különböző módszerek különböző esetekben szolgáltatnak közelítőleg helyes megoldásokat [Bouchet, L., 1995].



5.1.3. ábra. Spektrumok Kaneko és társai katalógusából [Kaneko, Y. et al., 2006].

A következőkben a spektrumok illesztését fogom tárgyalni. Egy tipikus spektrum látható az 5.1.3. ábrán, mely Kaneko és társai BATSE spektrális katalógusában [Kaneko, Y. et al., 2006] jelent meg. A detektor válaszmátrix inverzének meghatározására nincs általános módszer. A detektor válaszmátrix ismeretében viszont megtehető, hogy modellspektrumokat transzformálunk a mért $\mathbf{R}$ mátrixszal és a kapott számítási eredményt hasonlítjuk össze a mérési eredményekkel. Ezt a módszert alkalmazták a CGRO BATSE munkatársai a spektrális katalógusukban [Preece, R. D., et al., 2000] illetve a már említett 2006-os második katalógusukban [Kaneko, Y. et al., 2006]. A leggyakrabban használt illesztett függvény a David Bandról elnevezett ún. **Band függvény** [Band, D., et al., 1993], mely a következő alakú:

$$f(E) = A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha \exp \left(- \frac{E(2 + \alpha)}{E_{\text{peak}}} \right) \quad (5.1.3a)$$

ha $E < E_{\text{break}}$, illetve

$$f(E) = A \left((\alpha - \beta) \frac{E}{100 \text{ keV}(2 + \alpha)} \right)^{\alpha - \beta} \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta \exp(\beta - \alpha) \quad (5.1.3b)$$

ha $E \geq E_{\text{break}}$,

ahol $E_{\text{break}} = (\alpha - \beta) \frac{E_{\text{peak}}}{2 + \alpha}$, A az amplitúdó (mértékegysége fotonszám/cm²/s/energia), α

az alacsony energiás spektrális index, β a nagyenergiás spektrális index, E_{peak} egy illesztett energiaérték (a νf függvény ennél az értéknél maximális). Egy ilyen Band függvény illesztése látszik az 5.1.3 ábra bal oldalán.

Ezen kívül használatos még a **tört hatványfüggvény**:

$$f(E) = A \left(\frac{E}{E_{\text{támpont}}} \right)^{\lambda_1} \quad (5.1.4)$$

ha $E < E_{\text{break}}$

$$f(E) = A \left(\frac{E}{E_{\text{támpont}}} \right)^{\lambda_1} \left(\frac{E}{E_{\text{break}}} \right)^{\lambda_2} \quad (5.1.5)$$

ha $E < E_{\text{break}}$

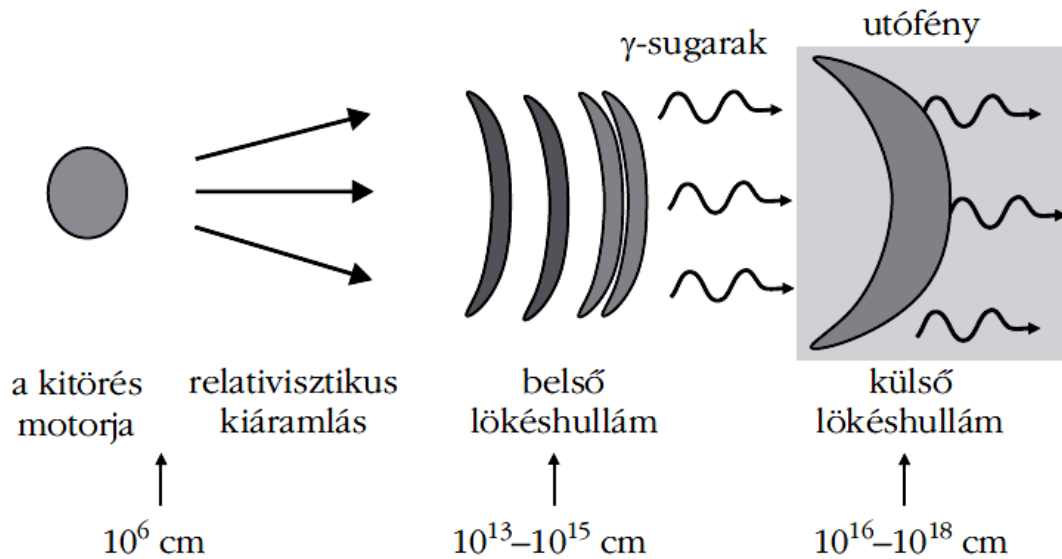
itt λ_1 és λ_2 jelöli az alacsony és magas energiás indexeket, $E_{\text{támpont}}$ pedig egy tetszőleges energia, amit arra választunk, hogy hol tekintjük a normálási amplitúdót (pl. 50 keV). Ebben a spektrumban egy éles törés van, ellentétben a Band függvénnyel, amely sima, a deriváltja mindenütt létezik és véges.

Ha a nagyenergiás spektrális index, β abszolútértéke lényegesen nagyobb kettőnél, akkor a Band függvényben nem illesztenek nagyenergiás spektrális indexet. Ez a comptonizált modell, ezért neve a **Comp modell**. A spektrumot leíró függvény ez esetben a következő alakú:

$$f(E) = A \left(\frac{E}{E_{\text{piv}}} \right)^{\lambda} \exp \left(-\frac{E(2 + \lambda)}{E_{\text{peak}}} \right) \quad (5.1.6)$$

λ és E_{piv} itt is illesztendő paraméterek a spektrumban. [Kaneko, Y. et al., 2006]

Az egyik elfogadott nézet szerint a kitöréseket úgynevezett belső lökeshullámok ütközéseivel lehet magyarázni. Egy belső központi motor produkálja az extrém relativisztikus héjakat (5.1.4. ábra), melyek egymás közti ütközését nevezik belső lökeshullámnak. A relativisztikus ütközések produkálhatják az azonnali gammasugárzást, amelyet a Földön gammakitörésként észlelünk.



5.1.4. ábra. A gammakitörések egyik modellje.

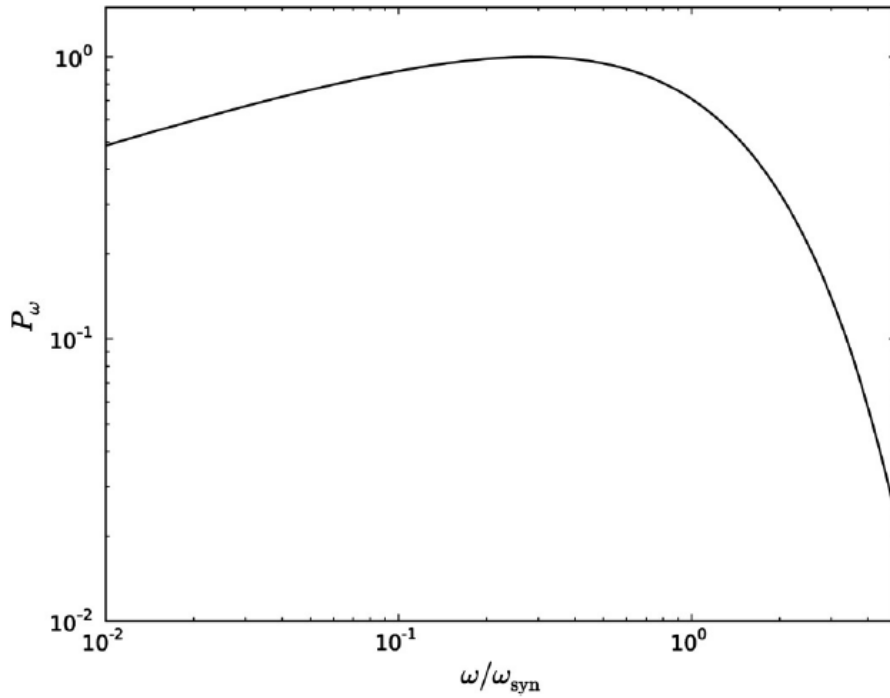
A relativisztikusan mozgó anyagsomókban különböző folyamatok zajlanak le, aminek eredményeképpen gammasugárzás keletkezik. Jelentős mágneses tér esetén a relativisztikus elektronok (a Γ Lorentz-faktor tipikusan 100 vagy annál is nagyobb)

$$P_{\text{szin}} = \frac{2q^4 B^2 \Gamma^2}{3c^3 m_e^2} \quad (5.1.7)$$

teljesítménnyel sugároznak (szinkrotronsugárzás), itt q az elektron töltése, m_e a tömege, B a mágneses térerősség. Ennek a karakterisztikus körfrekvenciája

$$\omega_{\text{szin}} \approx \frac{qB\Gamma^2}{cm_e} \quad (5.1.8)$$

Az ezzel kapcsolatos további részletek megtalálhatók Kumar és Zhang átfogó cikkében [Kumar, P. and Zhang, B., 2015]. Egy elektron szinkrotronspektruma az 5.1.5. ábra szerinti [Rybicki, G. B. and Lightman, A. P.: 1986]. Kis frekvencián a kitevő nagyjából egyharmad, míg nagy frekvencián egy erős exponenciális levágás van.

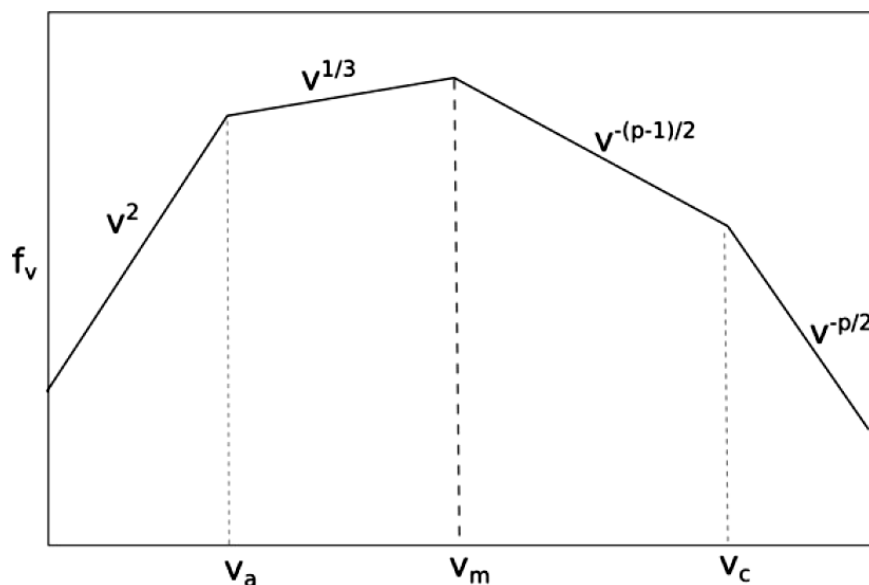


5.1.5. ábra. Az elektron szinkrotronspektruma Kumar és Zhang alapján [Kumar, P. and Zhang, B., 2015].

A megfigyelhető gammaspektrumokról Sari és társaitól olvashatunk jó összefoglalást [Sari, R., Piran, T. and Narayan, R., 1998]. Az ott levezetett szinkrotron hűlési frekvencia

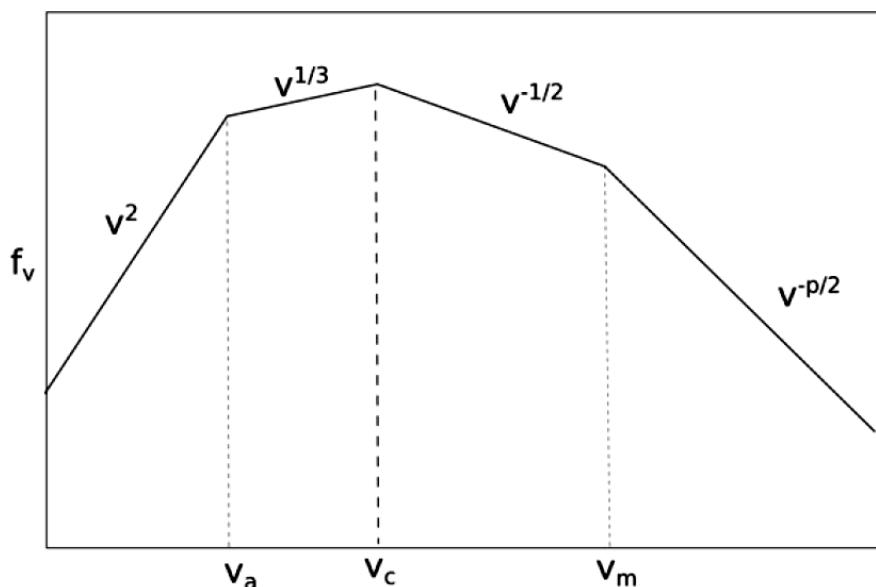
$$\nu_c = \frac{3qB\Gamma^2}{4\pi cm_e} \quad (5.1.9)$$

Itt Γ az elektronok termális Lorentz-faktora. Egy másik határfrekvencia (ν_a) amikor a fotonokra az inverz szinkrotronfolyamatból adódó elnyelés válik dominánssá. Amikor a minimális energiájú elektronokhoz tartozó frekvencia (ν_m) a fenti két frekvencia közötti érték, akkor a megfigyelt spektrum az 5.1.6. ábra szerinti. A $\nu_a < \nu_c < \nu_m$ esetben pedig a gammaspektrum az 5.1.7. ábra szerinti [Kumar, P. and Zhang, B., 2015].



5.1.6. ábra. A gammaspektrum $v_a < v_m < v_c$ esetén.

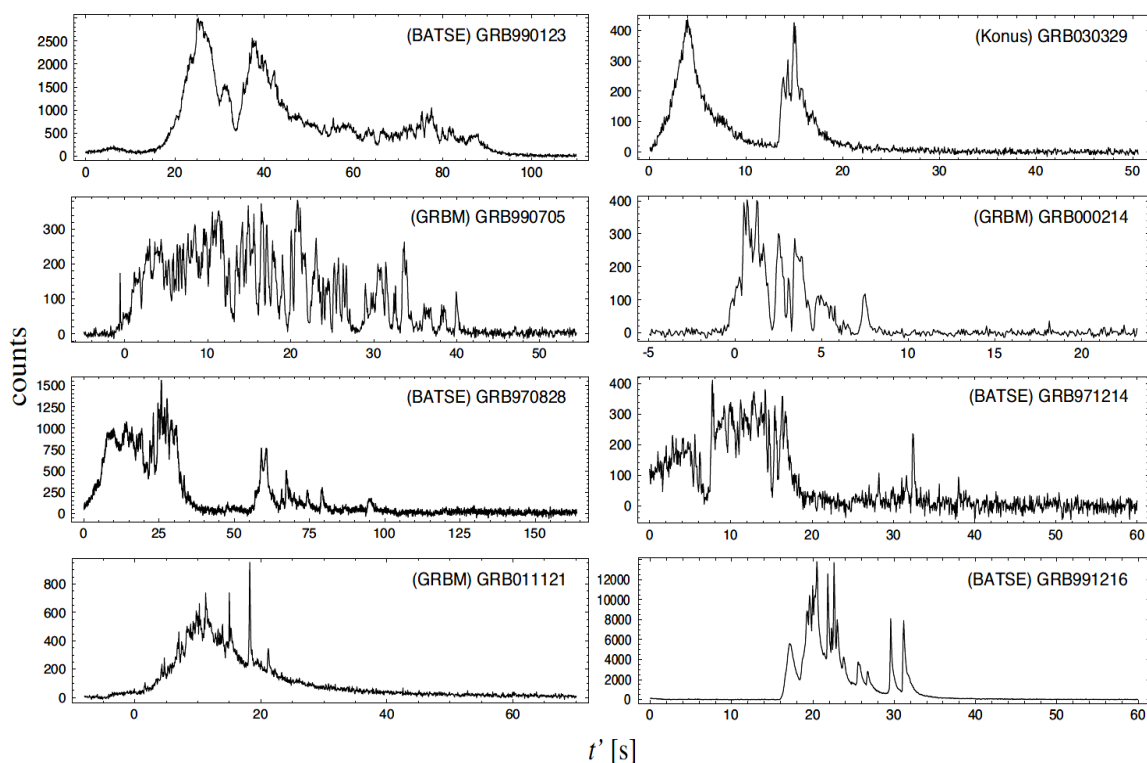
A kezdeti elképzelés az volt, hogy egyedül a szinkrotronsugárzás segítségével is meg lehet magyarázni a gammakitörések spektrumát. A későbbi megfigyelések szerint az alacsony energiás spektrális indexek eloszlása nem egyezik meg a szinkrotronmodell jóslataival. Az ellentmondást úgy tudták feloldani, hogy feltételezték, hogy az alacsony energiájú fotonok inverz Compton-szórással növelik meg energiájukat [Piran, T., 2004] [Piran, T., Sari, R. and Mochkovitch, R., 2012].



5.1.7. ábra. A gammaspektrum $v_a < v_c < v_m$ esetén.

A gammakitörések azonnali (maximum néhány száz másodperces) gammatarományban történő felfénylését csökkenő fluxussal csökkenő energiájú sugárzás követi. Az 5.1.8. ábra mutat néhány gammatarománybeli fénygörbét. Az előzőleg bemutatott

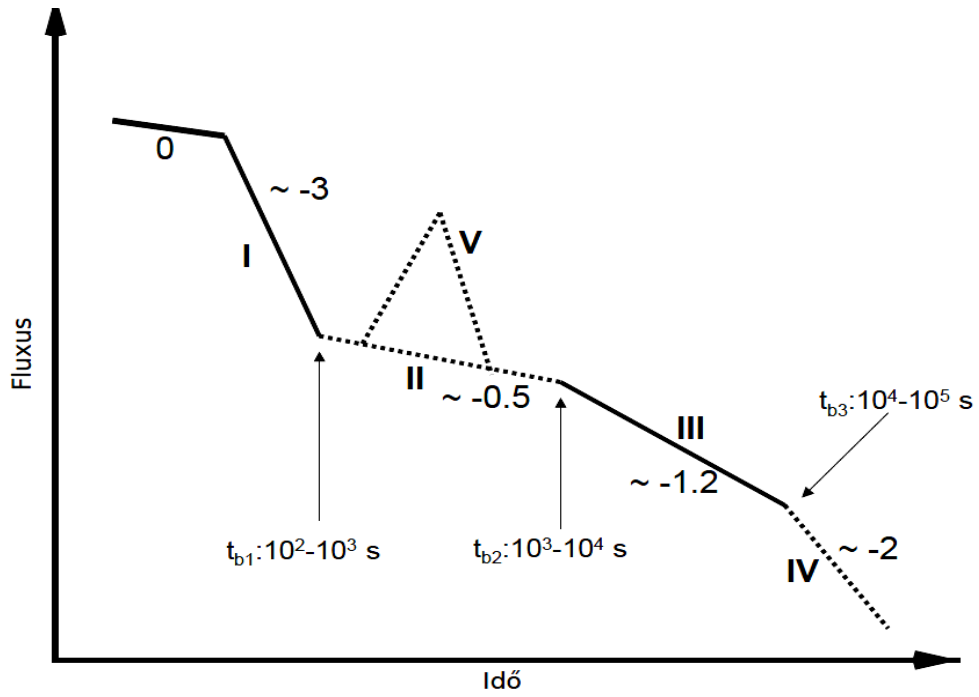
3.4.2. ábra is egy GRB időbeli lefutását ábrázolja, és a következő fejezet 6.1.1. és 6.1.6. ábráin is gammafénygörbéket láthatunk.



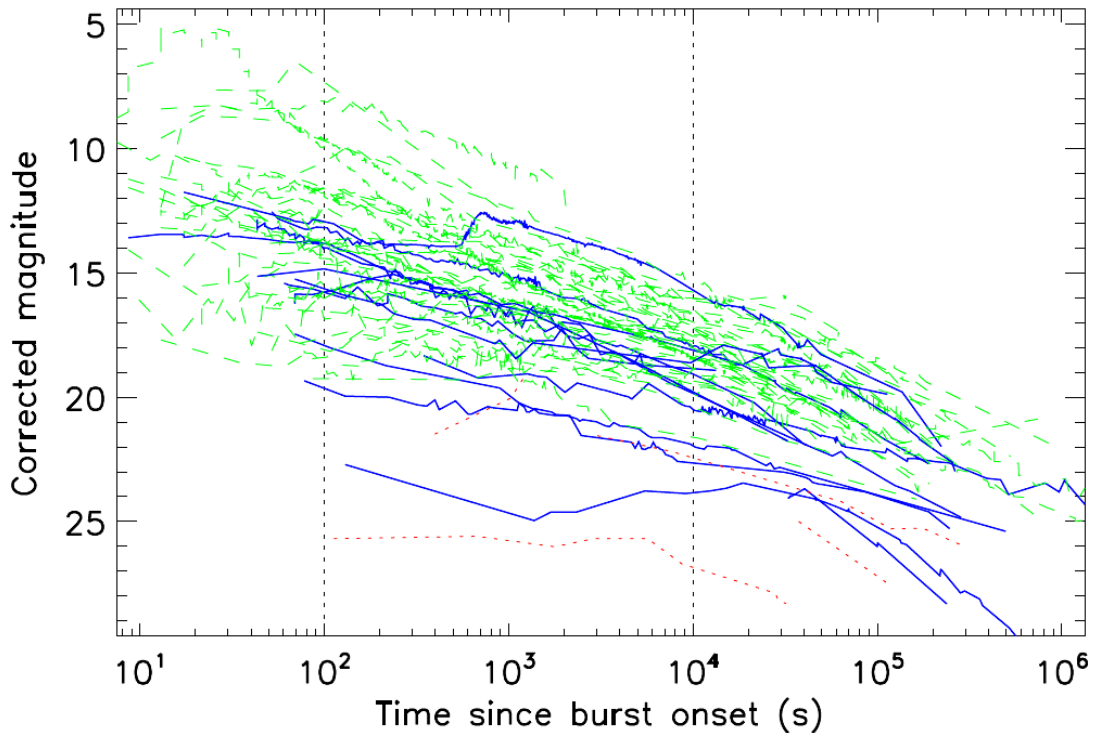
5.1.8. ábra. Gammakitörések időbeli lefolyása. Vízszintesen az idő van feltüntetve másodpercekben, függőlegesen a beütésszám. A görbéket Borgonovo és társai publikálták [Borgonovo, L., et al., 2007].

A maximum pár perces gammaemissziót követi a röntgentartománybeli kisugárzás. Ennek kanonikus alakját mutatja az 5.1.9. ábra. Az azonnali (gamma)felfénylés után az I. fázisban meredeken esik a fluxus (például a GRB 050126 és GRB 050219A esetében). Néhány esetben a röntgenfluxus esése megtörik és egy kevésbé gyors plató (II. szakasz) következik (például GRB 050128, GRB 050315, GRB 050319 és GRB 050401). E két szakaszt a Swift műhold mérései alapján azonosították. Ezt követi a már régebben felfedezett III. szakasz, melyet körülbelül $-1,2$ kitevőjű hatványfüggvény szerinti csökkenés jellemez. Ritkán a röntgenutófény végen egy gyorsabb elhalványulás (IV. szakasz) figyelhető meg (például GRB 050315) [Vaughan, S., et al., 2006]. Ez megfelel a később tárgyalandó jettörésnek [Mészáros, P. and Wijers, R. A. M. J., 2012]. A II. szakasz alatt megfigyelhető esetleges kitöréseket (V. szakasz) röntgenflereknek nevezzük.

A röntgensugárzásban az itt tárgyalt egyes szakaszok ki is maradhatnak, illetve akár többszöri felfénylések (X-ray flares) is jelentkezhetnek. Ilyen röntgenflereket figyeltek meg például a következő kitörések esetében GRB 050406, GRB 050202B, GRB 050724, GRB 050502B, GRB 050724, GRB 050406, GRB 050202B, GRB 011121 [Zhang, B., et al., 2006], [Burrows, D. N., et al., 2007].

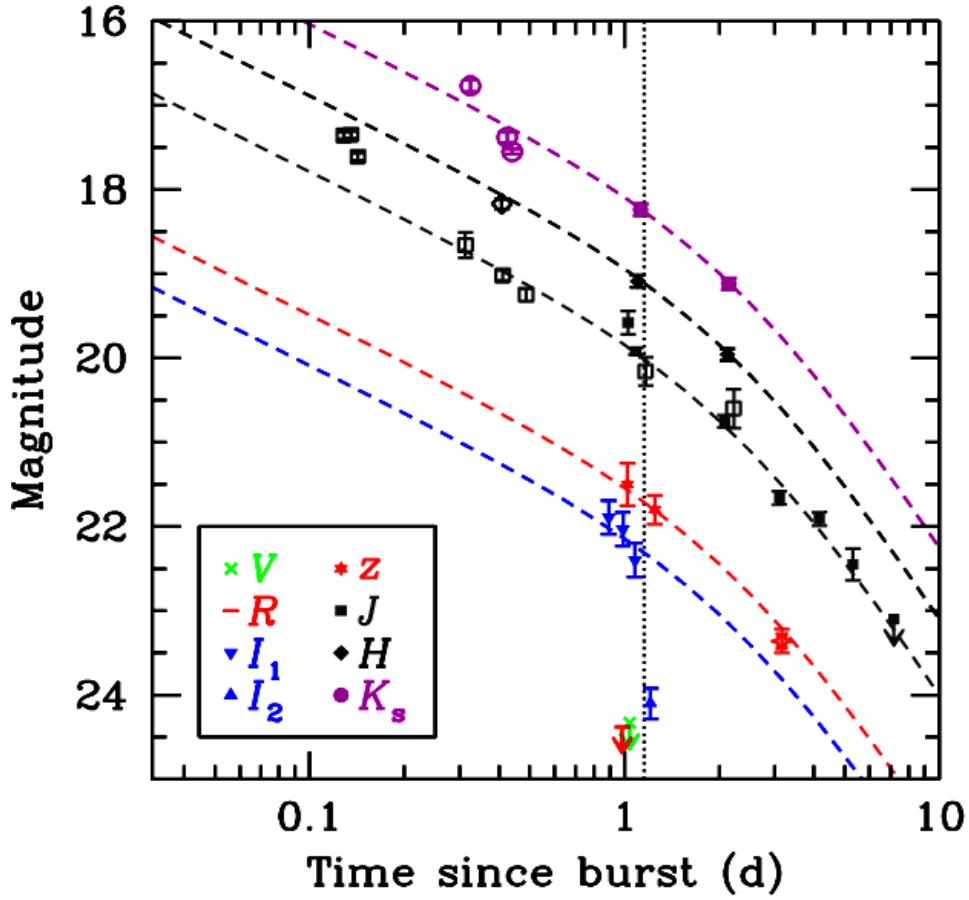


5.1.9. ábra. A gammakitörések röntgensugárzásának kanonikus alakja Zhang és társai sematikus ábrája alapján [Zhang, B., et al., 2006]. Az egyes szakaszok melletti számok, a görbe adott szakaszon való hozzávetőleges meredekségének értékei. Az I. fázisban meredeken esik a fluxus. Néha a gyors csökkenés megtörik és egy lassabb II. szakasz következik. A III. szakasz egy körülbelül -1,2 kitevőjű hatványfüggvény szerinti csökkenés. Ritkán a röntgenutófény végén egy gyorsabban halványuló IV. szakasz található.



5.1.10. ábra. A gammakitörések utófényei a látható tartományban, ha egyforma távolságra ($z = 1$) lennének [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011]. A piros a 2 mp-nél, a kék a 10 mp-nél rövidebb, a zöld a 10 mp-nél hosszabb kitöréseket jelöli.

A néhány órás röntgenemissziót több napig tartó ultraibolyában, látható fényben és rádiótartományban észlelhető utófénylés követi. Több tucat, látható fényben megfigyelt utófény fényességfolyását láthatjuk az 5.1.10. ábrán de Ugarte Postigo és társai cikke alapján [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011].

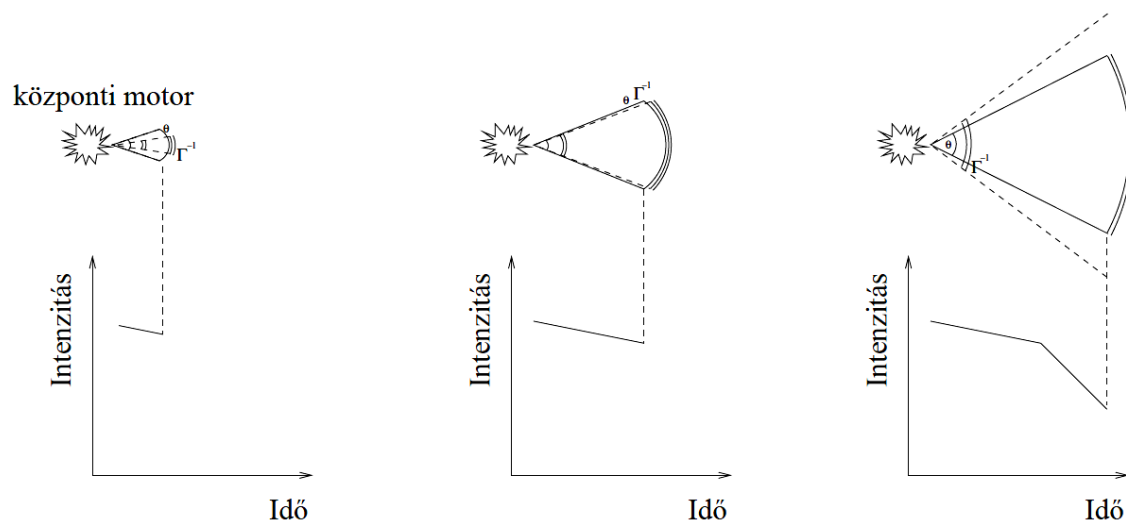


5.1.11. ábra. A GRB 050904 gammakitörés optikai utófényének időbeli lefutása a látható tartomány különböző hullámhosszain [Tagliaferri, G., et al., 2005]. A pontozott vonallal jelzett időpontban minden hullámhosszon megváltozik a hatványfüggvény kiértéke. Ezen akromatikus törés erős bizonyíték a nyalábolás (jet) jelenségre.

A GRB 050904 megfigyelt utófénye látható az 5.1.11. ábrán [Tagliaferri, G., et al., 2005]. Jól megfigyelhető a tipikusan 1-2 napnál jelentkező törés a fénygörbében, melyet jetbreaknek (jettörés) neveznek. Ez az egyik fontos bizonyíték annak, hogy a kitörések sugárzása kezdetben nyalábol. Tekintsünk egy nyalábot, melynek nyílásszöge θ . A kezdetben ultra relativisztikus nyaláb a relativisztikus hatások miatt eleve egy Γ^{-1} nyílásszögű kúpon belül távozik. Tehát csak egy ennek megfelelő felületről jövő sugárzást látunk, míg a teljes sugárzó felületet egy θ nyílásszögű gömbsüveg felszínének gondoljuk. Az idő előrehaladtával a sugárzó anyag hűl, csökken a Γ Lorentz-faktor nagysága, így az általunk látott sugárzó felület nagysága nő, hiszen a Γ^{-1} nyílásszögű gömbsüveg nagysága nő (5.1.12. ábra bal oldali része). A hűlés nagyon gyors, ezért végeredményben az észlelt sugárzás intenzitása is csökken (5.1.12. ábra bal oldali fénygörbéje, illetve az 5.1.11. ábra bal oldala). Nagyjából a $\Gamma^{-1} = \theta$ esetén már a θ nyílásszögű gömbsüveg teljes felszínét látjuk (5.1.12. ábra középső ábrája). Azért nagyjából, mert mi megfigyelők nem feltétlenül pontosan a szimmetriatengelyen helyezkedünk el.

Ettől kezdve már nem látunk újabb és újabb sugárzó részeket, vagyis az intenzitást csak a sugárzó anyag hűlése határozza meg (5.1.12. ábra jobb oldali fénygörbéje, illetve az 5.1.11. ábra jobb oldala). Az anyag hatványfüggvény szerint hűl, ezért logaritmikusan ábrázolva egy egyenes a fénygörbe. A törés (jetbreak) utáni hatványkitevő a hűlésnek megfelelő halványodás szerinti. A törés előtti görbe kevésbé meredek, hiszen egyre több és több sugárzó, bár gyorsan hűlő anyag sugárzását figyeljük meg (5.1.11. ábra).

A fent leírt folyamat nem függ a sugárzás energiájától, azaz színétől, így a különböző hullámhosszakon felvett fénygörbék azonos időpontban, egyidejűleg szenvedik el a törést (5.1.11. ábra). A megfigyelések ezt több esetben igazolták.

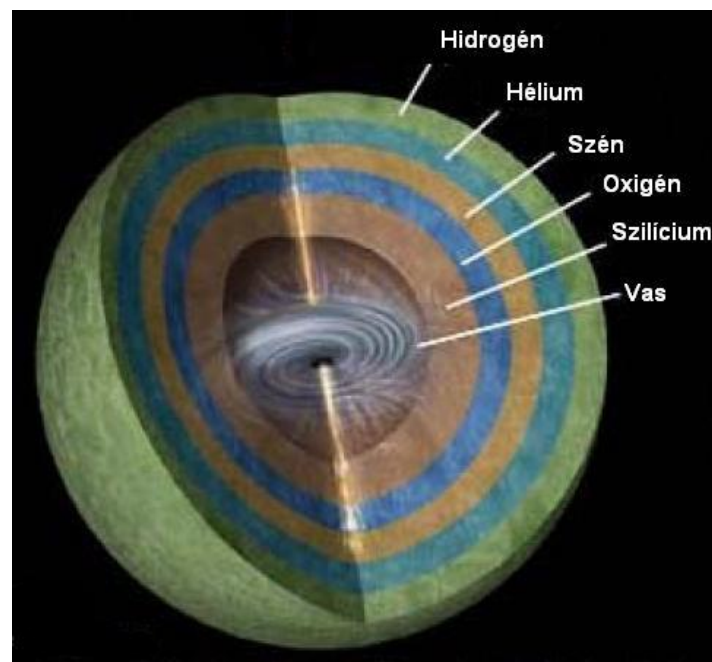


5.1.12. ábra. Az akromatikus törést magyarázó ábra Veres Péter diplomamunkája alapján [Veres, P., 2006]. Részletes magyarázat a szövegben.

5.2. Lehetséges forrásmechanizmusok

A felvillanások eredetére több elmélet is megpróbált magyarázatot adni, és mindegyik azt jósolta, hogy a hirtelen gammakitöréseket kisebb hullámhosszú utófénylésnek kell kísérnie [Mészáros, P. and Rees, M. J., 1997]. 1997-ben a holland-olasz együttműködésben épült *Beppo-SAX* műhold, amint azt a 3.2. fejezetben említettem, röntgensugárzást tapasztalt egy néhány órával azelőtt felfénylett gammakitörés helyén. Később optikai hullámhosszakon is megfigyelték a jelenséget, és kiderült, hogy a kitörések távoli galaxisokban mennek végbe. Vöröseltolódás-mérések alapján a sugárforrások átlagos távolsága nyolcmilliárd fényév, de találtak olyan kitörést is, amelynek fénye több mint tizenkétszázmilliárd évet utazott, mielőtt megfigyeltük volna. A kitörések kozmológiai eredete ezzel bizonyosságot nyert.

A távoli eredet miatt le kellett vonni a következtetést, miszerint a gammakitöréseket kiváltó folyamatban sokkal rövidebb idő alatt sokkal nagyobb energia szabadul fel, mint amekkorát bármely eddig ismert folyamat megenged. Ha az energia-kibocsátást izotrópnak feltételezzük, az nagyjából azzal egyenértékű, mintha a Nap tömegének jelentős része néhány másodperc alatt szétsugárzódna (kb. 10^{52} - 10^{54} erg [Kumar, P. and Zhang, B., 2015]). Az energia ilyen mértékű felszabadulására két általánosan elfogadott elmélet létezik.



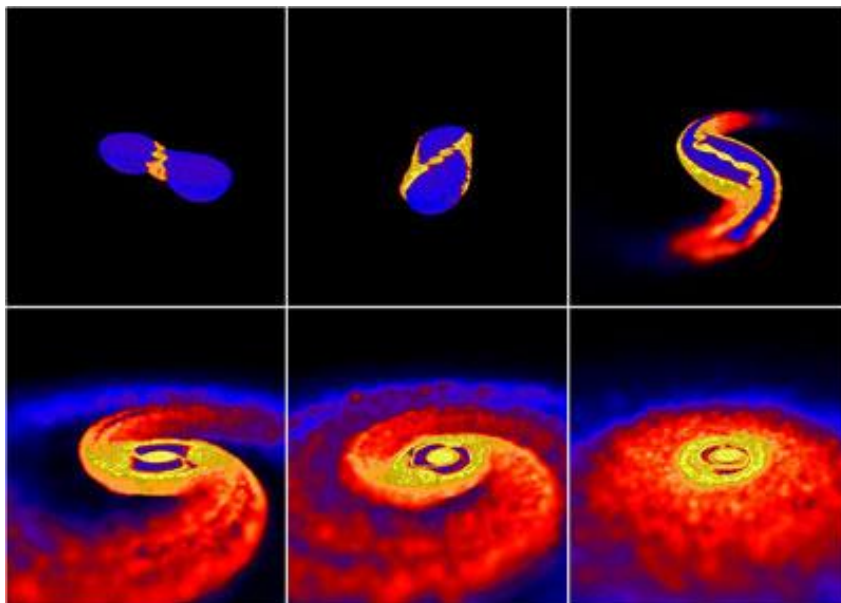
5.2.1. ábra. Hipernóva robbanás kezdeti fázisa.

A hosszabb ideig tartó, de lágyabb, azaz az energia nagy részét inkább kisebb energiájú fotonokban kisugárzó kitöréstípust az úgynevezett hipernóva [Woosley, S. E., 1993], [MacFadyen, A. I. and Woosley, S. E., 1999], [MacFadyen, A. I., Woosley, S. E.

and Heger, A., 2001], [Woosley, S. E. and Bloom, J. S., 2006], [Woosley, S. E. and Heger, A., 2015] jelenségével magyarázzák (5.2.1. ábra). Ha egy legalább harminc naptömegű csillag elhasználja nukleáris fűtőanyagát, végül fekete lyukká omlik össze. Amennyiben a csillag tengely körüli forgása gyors, csak a központi részek tudnak azonnal egy szingularitássá összeomlani. A külsőbb régiók a perdületmegmaradás miatt először egy akkréciós korongba sűrűsödnek össze. Ekkor a csillaganyag jelentős része az egyenlítő síkjában, spirális pályán száguld a központi fekete lyuk felé, ami a hatalmas gravitációs erő következtében egyfajta generátorként működik. Működése közben energiává alakítja az akkréciós korong anyagának egy részét, két igen vékony, forgástengely irányú nyalámban (jet) kisugározva azt [Mészáros, P. and Gehrels, N., 2012].

Ezt az elképzelést támasztja alá, hogy a pontosabb égi pozíciójú mérések szerint az ilyen kitörések a galaxisoknak azon úgynevezett aktív vidékeiről származnak, ahol éppen csillagkeletkezés folyik [Jakobsson, P., et al., 2006]. Itt jönnek létre ugyanis azok a nagy tömegű (legalább 30-40 naptömeg), éppen ezért igen rövid életű (kevesebb mint tízmillió év) csillagok, amelyek pusztulásakor megfigyelhető a jelenség. Egy másik bizonyíték, hogy több ilyen kitörés helyén egyúttal szupernóva robbanást is megfigyeltek [Hjorth, J. and Bloom J. S., 2012], például a GRB 980425 [Galama, T. J., et al., 1998], GRB 030329 [Hjorth, J. et al., 2003], [Stanek, K. Z., et al., 2003], GRB 031203 [Malesani, D., et al., 2004], GRB 060218 [Modjaz, M., et al., 2006], [Campana, S., et al., 2006], [Pian, E., et al., 2006], GRB 100316D [Starling, R. L. C., et al., 2011], GRB 101219B [Sparre, M., et al., 2011], GRB 120422A [Melandri, A., et al., 2012] és GRB 130427A [Xu, D., et al., 2013] esetében. Az pedig, hogy a gammasugárzás csupán két szűk nyalámban indul útjára, jelentősen, akár három nagyságrenddel is lecsökkenti a kitöréshez szükséges energiamennyiségét [Gehrels, N. and Mészáros, P., 2012]. Ez persze azt is jelenti, hogy csak akkor vesszük észre a jelenséget, ha a jetek éppen felénk mutatnak [Sari, R., Piran, T. and Halpern, J. P., 1999]. A hipernóva vagy kollapszármodell működési mechanizmusát részletesen tárgyalja Woosley munkája [Woosley, S. E., 2012]. Ebben elmondja, hogy a kezdeti modellekben csak termikus energia pumpálással számoltak, melyekben a mágneses teret nem vették figyelembe. Ide tartozik, amikor a beomló anyag által keltett sugárnyomás átlépi az Eddington-határt, és kilöki a további bezuhanó anyagcsomókat [Shcherbakov, R. V., et al., 2012], [Janiuk, A. and Moscibrodzka, M., 2012], [Singh, C. B., de Gouveia Dal Pino, E. M. and Kadowaki, L. H. S., 2015]. Mágneses tér figyelembe vételével a termális energiatranszporton kívül a Blandford-Znajek mechanizmus ([Blandford, R. D. and Znajek, R. L., 1977], [Liu, T., Hou, S. J., Xue, L. and Gu, W. M., 2015]) is jelentősen hozzájárul az energiakibocsájtáshoz.

A rövid, de keményebb kitörések keletkezését neutroncsillag-kettősök összeolvadásával próbálják magyarázni (5.2.2. ábra) [Mészáros, P. and Rees, M. J., 1992], [Rees, M. J. and Mészáros, P., 1994], [Nakar, E., 2007], [Lee, W. H. and Ramirez-Ruiz, E., 2007], [Wanderman, D. and Piran, T., 2015]. A két, egymás körül keringő neutroncsillag az általános relativitáselmélet szerint gravitációs hullámokat sugároz ki, amelynek következtében energiát veszít, és spirális pályán egyre közelebb kerül egymáshoz. Az ütközéskor fekete lyuk keletkezik, mely a keletkezés során relativisztikus sebességű jeteket bocsájt ki. A jeteken belül lezajló ütközések keltik a gammasugárzást, a jetek környezettel való ütközése pedig a nagyobb hullámhosszú sugárzást. A mérések alapján az ilyen típusú gammakitörések általában nem jönnek olyan messziről, mint a hosszúak, és keletkezési helyük is változatosabb [Berger, E., 2009]. Ezzel az elgondolással nem az a probléma, hogy hogyan tud néhány tized másodperc alatt ennyi energiát kibocsájtani a rendszer, hanem az, hogy miért nem rövidebb idő (ezredmásodpercek) alatt történik az emisszió.



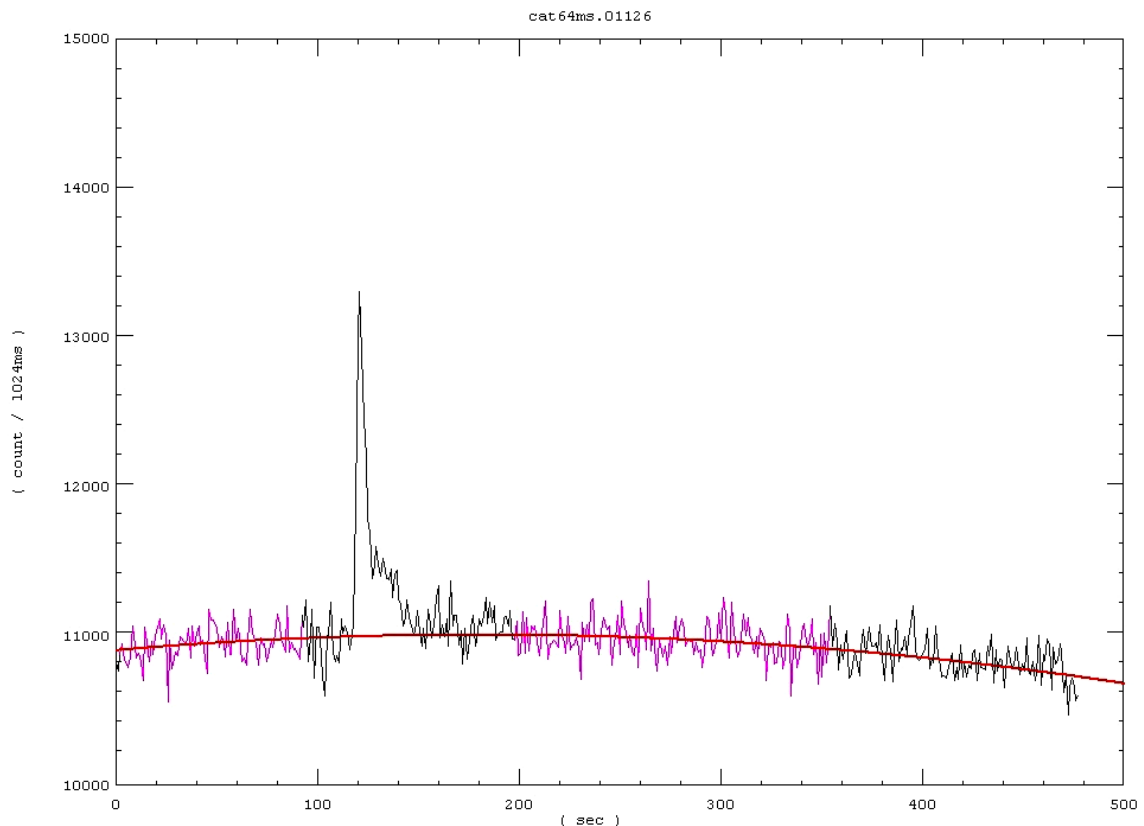
5.2.2. ábra. Neutroncsillag kettős összeütközése a modellszámítások szerint.

A jelenleg üzemelő, gammakitörések megfigyelésével foglalkozó űrteleszkópok közül a Fermi gammasugár űrtávcső [Meegan, C. A., et al., 2009] képes gammatarományban a legjobb spektrális felbontást adni. A Fermi műhold előtt a CGRO végzett részletes spektrális megfigyeléseket, jelenleg is e műszerhez fűződik a legnagyobb kitörés-adatbázis. A Fermi mind az adatok mennyiségében, mind részletességében meghaladja elődjét. Segítségével pontosabb ismereteket szerzünk arról, mi zajlik le abban a néhány másodpercben, amelyben annyi energia szabadul fel, amihez hasonlót sehol máshol nem látunk a Világegyetemben.

6. A GAMMAKITÖRÉSEK IDŐTARTAMELOSZTLÁSÁNAK ELEMZÉSE

6.1. A gammakitörések időtartama

A gammakitörések időtartamának a definiálása nem könnyű feladat, ugyanis az egyes fotonokról nem tudhatjuk, hogy milyen irányból érkeztek (a Swift műhold megfigyeléseit kivéve), ezért a háttérfotonok és a forrásból érkező fotonok megkülönböztethetetlenek. A kitörés gammafénygörbéjének vannak a háttérből szignifikánsan kiemelkedő részei. De mikor kezdődött és mikor ért véget a kitörés? Mivel foton darabszámokat figyelünk meg, ezért a „fénygörbe” eleve diszkrét. A beütéseket leszámoljuk, majd önkényesen „bineljük” őket, azaz egy választott időegység alatt megszámloljuk a beérkező fotonok számát. Ezt a teljes észlelési időtartamra elvégezve kapjuk a folyamat időbeli lefolyását (a 6.1.1. és a 6.1.6. ábrán látható egy-egy gamma „fénygörbe”). Az időrekeszek (binek) nagysága nem feltétlenül azonos, de hagyományosan egyformáknak szokták ezeket választani. Ezt jelen dolgozat során is így teszem.

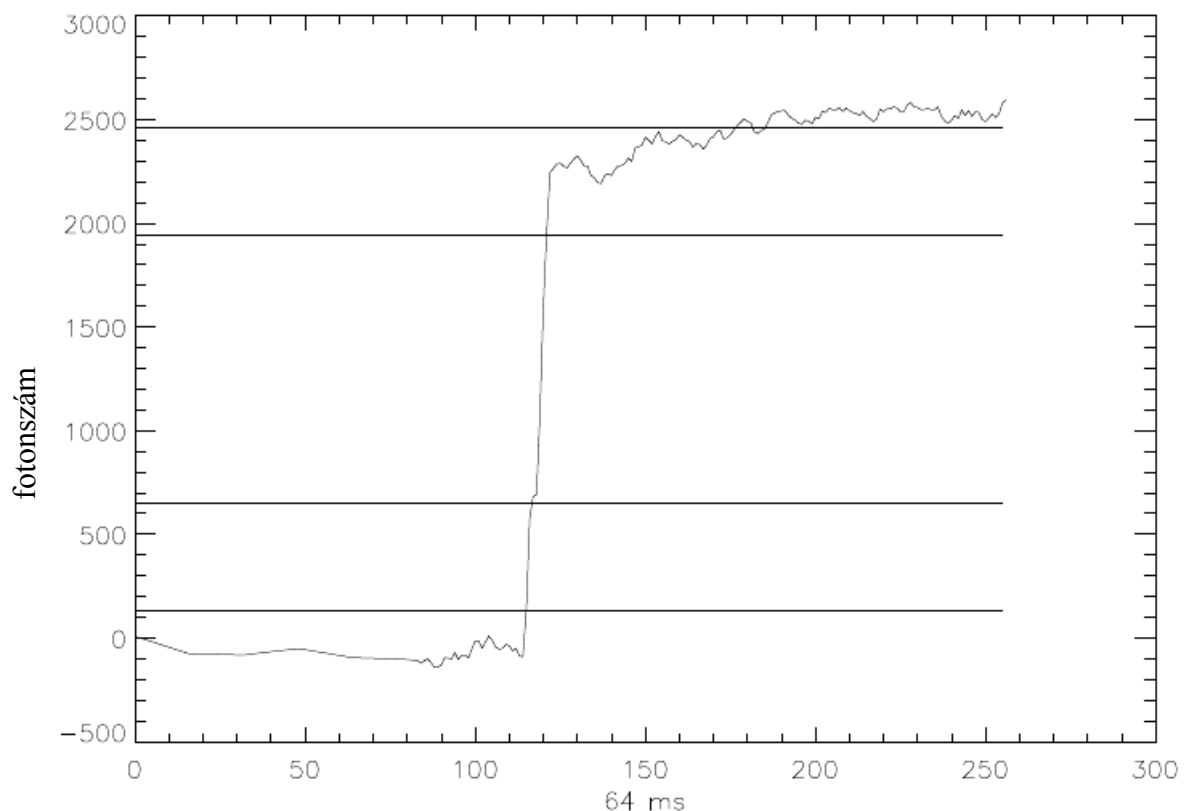


6.1.1. ábra. A 01126 számú kitörés gamma „fénygörbéje”. Vízszintesen az idő van feltüntetve másodpercekben, függőlegesen a beütésszám.

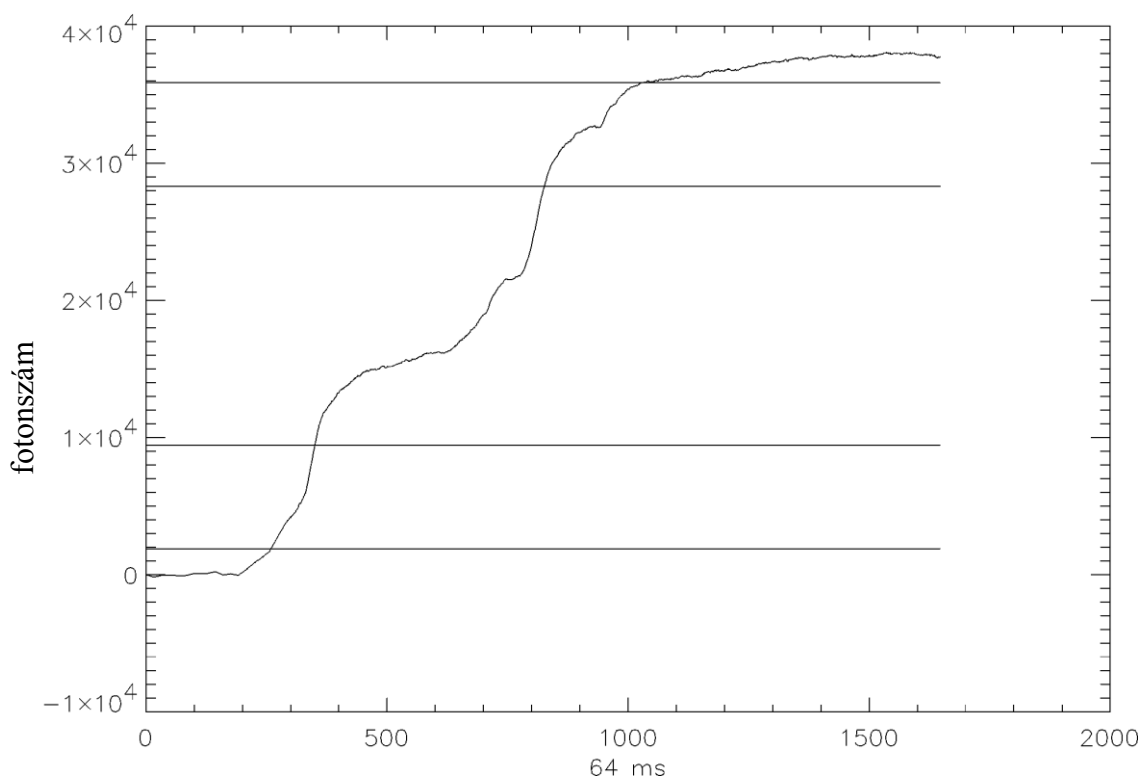
A fenti eljárásból adódóan az időt a rekeszhossz többszöröseként tudjuk mérni. Ha rendelkezésre áll jobb időfelbontású adatsor, akkor természetesen a komulatív görbe előállítható finomabb felbontással is. Nyilvánvalóan a kitöréshez tartozó időtartam alatt is érkeznek fotonok a háttérből is, ezért fontos feladat a háttér szintjének és időbeli viselkedésének a meghatározása. Ehhez tudnunk kell, hogy mikor volt a kitörés. Ebből a circulus viciosus-ból a kivezetőt a „biztos” háttér-tartományok kijelölése jelenheti. Például a BATSE által megfigyelt kitörések úgynevezett négy-csatornás adatai a <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/> weboldalon megtalálhatóak, ezek elemzését önállóan is elvégezhetjük.

Jay Norris a BATSE kitörésekre meghatározta az előzőekben említett időtartamokat [Norris, J. P., et al., 1997], tehát kijelölte a háttér és a kitörés időtartamait. Mivel az irodalomban ezt mások is felhasználták, célszerű ezektől nem eltérni, hanem ezekkel az időintervallum-határokkal dolgozni, ez esetben ugyanis az eredmények összehasonlítása is könnyebb lesz mások eredményeivel.

Norris és társai az intervallumok kijelölésén kívül a háttérrek illesztését is elvégezték. Eredményüket ellenőrizendő ezt magam is megtettem, valamint Varga Balázs diplomamunkásom is elvégezte ezt TDK dolgozatában [Varga, B., 2005]. A három elemzés eredményei néhány ezrelék pontossággal megegyeztek. A háttérbeütések számának illesztése után ez a háttér levonható a mért adatokból, majd elkészíthető az úgynevezett integrális görbe, mely a kezdő időponttól az adott időpontig beérkezett fotonok számát mutatja. Ilyen integrális görbéket mutatok a 6.1.2. és 6.1.3. ábrákon.



6.1.2. ábra. A 00575 számú kitörés integrális „fénygörbéje”. A vízszintes vonalak, a teljes energia 5, 25, 75 és 95 százalékos szintjeit jelölik. Vízszintesen az idő van feltüntetve 64 milliszekundum egységeiben.



6.1.3. ábra. A 00591 számú kitörés integrális „fénygörbéje”. A vízszintes vonalak, a teljes energia 5, 25, 75 és 95 százalékos szintjeit jelölik.

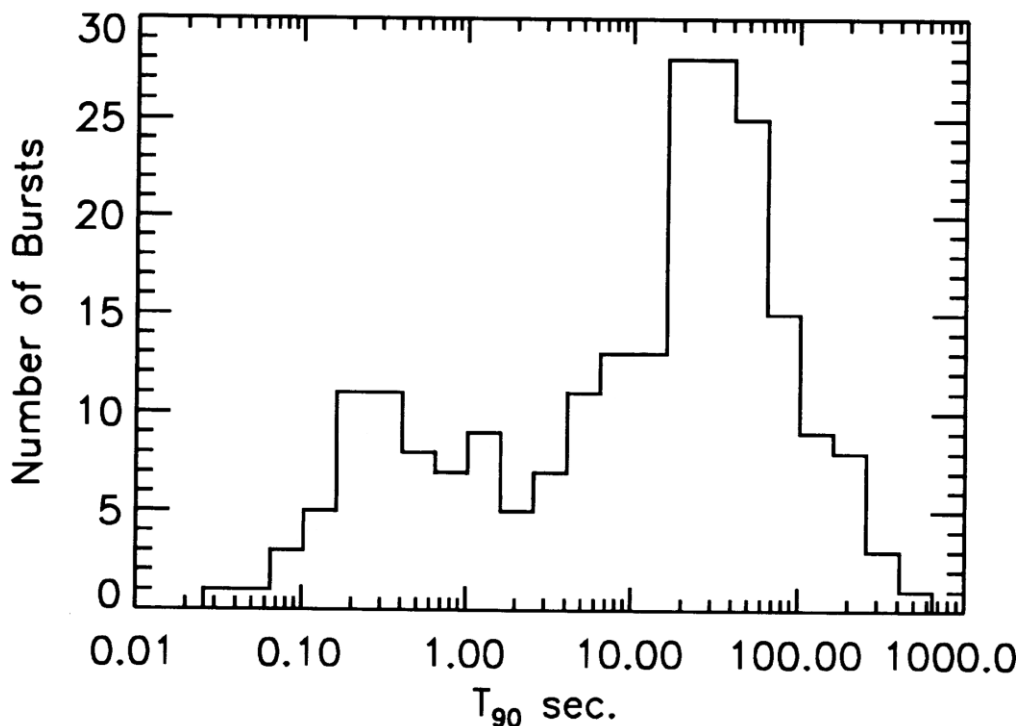
A két ábrán több dolog is megfigyelhető. Először is a kitörés kezdete általában azonosítható, de a kitörés vége szinte minden esetben azonosíthatatlan. Ezt a problémát a kutatók úgy látták jónak megoldani, hogy definiáltak két mennyiséget, amelyek valamilyen kapcsolatba hozhatók a kitörések időtartamával [Mazets, E. P., et al., 1981]. Ez a két mennyiség a T_{50} és a T_{90} . A kitörések vége valóban nehezen azonosítható, viszont az integrális görbe kezdeti és végső szintje már könnyebben meghatározható. Jól illesztett háttér esetén a kitörés előtti időben az integrális görbe definíció szerint zérus, természetesen véletlen (Poisson) zajjal terhelve. Tehát a kitörés előtt az integrális görbe viszonylag stabilan konstans. Ez a konstans nullának választható. Az integrális görbe késői szakaszának stabilitását semmi sem garantálja, hiszen a kitörés bármikor újra a háttér fölé erősödhet, a tapasztalat szerint azonban nagyon ritkák a néhány száz másodpercnél hosszabb kitörések. Ha a háttér a kitörés után is jól illeszthető, akkor az integrális görbe jobb oldala is egy határozott érték körül ingadozik. Ez az érték a kitörésből származó összes fotonok száma, melyet a detektor rögzített.

E számnak a felével elmozdítva az integrális görbét, megkapjuk azt az időpontot, amikor a detektor az összes, a kitörésből érkező foton felét regisztrálta. Hasonlóan meghatározható, hogy mikor volt az az időpont, amikor az összefotonszám 5 százaléka beérkezett, és mikor volt az, amikor a 95 százaléka beérkezett. E két idő különbségét nevezik T_{90} -nek. A T_{50} értékét értelemszerűen a 25 és 75 százalékos időpontok határozzák meg.

A két ábrán alapvető különbség, hogy míg a 25 és 75 százalékos szinteknek megfelelő időpontok mind a két esetben kis hibával meghatározhatók, a 95 százalékos szintnek megfelelő időpontok már nem határozhatók meg ilyen pontosan. Amíg a 00591

számú kitörés esetén a 95 százalékos metszet helye a háttérillesztéstől függően ingadozik, de relatíve kis hibával terhelt, addig a 00575 számú kitörés esetében a 95 százalékos szint helye a kitörés „időtartamának” többszörösére rugó hibával terhelt. Úgy tűnik, hogy a T_{50} időtartamot pontosabban lehet meghatározni. Ez valóban igaz, de ez esetben a kitörés feléről, az első 25 %-ról és az utolsó 25 %-ról, nem veszünk tudomást, hiszen ezen részei a kitörésnek nincsenek hatással a T_{50} meghatározására. Ezért elterjedt inkább a T_{90} használata [Koshut, T. M., et al., 1996], mert ez a kitörés nagyobb részére jellemző adat. Jelen dolgozatban, amikor a kitörés időtartamáról írok, mindig a T_{90} változót fogom ez alatt érteni.

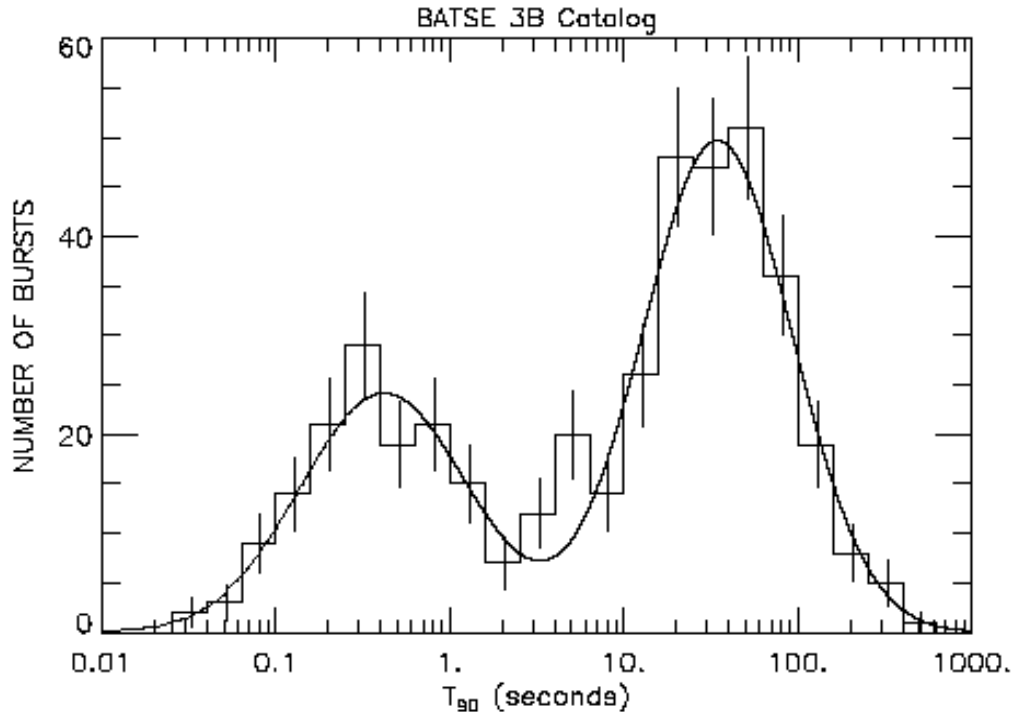
A kitörések időtartameloszlásának a vizsgálata mindig is fontos kutatási terület volt. Már a nyolcvanas években felvetették Mazets és társai [Mazets, E. P., et al., 1981], valamint Norris és társai [Norris, J. P., Cline, T. L., Desai, U. D. and Teegarden, B. J., 1984], hogy a kitörések időtartamának eloszlásában két csomósodás lehet, így a kitörések esetleg két csoportba sorolhatók. E felvetés igazolásához azonban nagyméretű homogén mintára volt szükség. A CGRO sok feladata közül éppen az volt az egyik, hogy nagyszámú kitörést figyeljen meg azonos körülmények között. Ez a minta az első BATSE katalógus [Fishman, G. J., et al., 1994] megjelenésével rendelkezésre állt. A katalógus 260 megfigyelt kitörésére 222 esetben volt lehetséges az időtartam meghatározása. Ezen időtartamok eloszlását vizsgálták meg Kouveliotou és társai [Kouveliotou, C., et al., 1993]. A gyakoriságot az említett cikk alapján a 6.1.4. ábra mutatja logaritmikus időskálán. Később kiderült, hogy az így azonosított rövid és hosszú kitörések más lényeges tulajdonságokban is különböznek egymástól.



6.1.4. ábra. A BATSE 1B katalógus 222 kitörésének időtartamgyakorisága.

Kouveliotou-ék cikkében a két eloszlásbeli maximum közötti részt parabolikusan illesztették és a minimum helyét nagyjából 2 másodpercnél találták meg. 1995-ben, egy másik cikkben [Kouveliotou, C., et al., 1995] közölt ábrán két Gauss-görbés illesztés látszik, de csak a centroidok helyét adják meg, egyéb paramétereket nem közölnek.

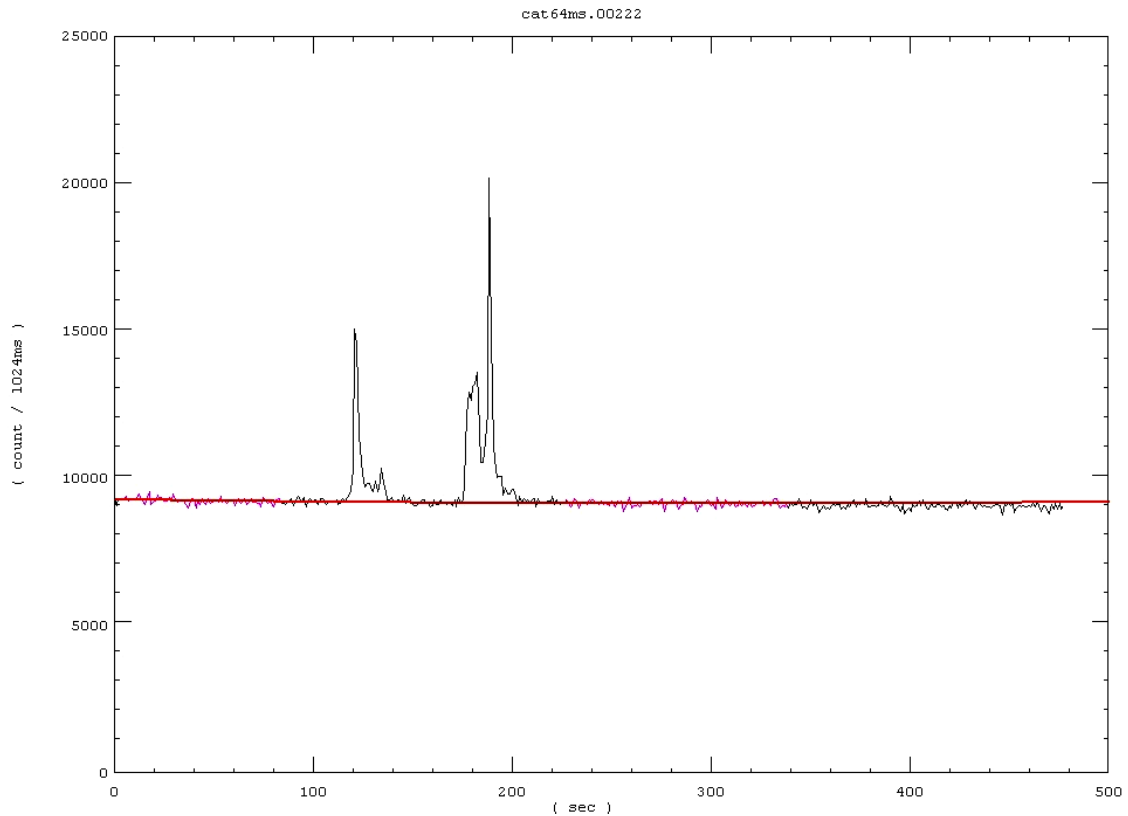
(6.1.5. ábra). Lognormális illesztéseket közölnek McBreen és társai [McBreen, B., et al., 1994] a Monthly Notices of the Royal Astronomical Societyban megjelent cikkükben. Később az időtartamokkal kapcsolatban a fentieknél is részletesebb elemzést közölt a BATSE csoport [Koshut, T. M., et al., 1996].



6.1.5. ábra. A BATSE 3B katalógus kitöréseinek időtartamgyakorisága Kouveliotou et al. cikkéből [Kouveliotou, C., et al., 1995]. Az eloszlás lokális minimuma 2 másodpercnél van, míg az illesztése 3-4-nél.

A harmadik BATSE katalógust 1996-ban publikálták [Meegan, C. A., et al., 1996], az adatok az interneten szinte azonnal elérhetőek voltak. A BATSE katalógusok több részből állnak, a három részletes nagy táblázat a <http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/> internetcím alatt található meg. A basic táblázatban olyan alapadatok vannak felsorolva, mint a katalógusszám (trigger number), a megfigyelés napja, ideje, a kitörés égi koordinátái stb. A „Flux and Fluence” táblázat tartalmazza az azonosító számon kívül a fluenciaadatot, ami az adott frekvenciatartományban a kitörés teljes ideje alatt a kitörésből beérkező összes energiát jelenti. Ez lényegében a fénygörbe (fotonenergiákkal szorzott) integrálja a háttér levonása után. A flux vagy csúcsfényesség (peak flux) adat lényegében a fénygörbe maximális értéke. Háromféle csúcsfényességet tüntetnek fel, melyek a három időskála használatából következnek (ezek az időskálák ezredmásodpercen 1024, 256 és 64).

A BATSE katalógus következő táblázata az időtartam-táblázat, mely tartalmazza a kitörések – az előzőekben említett definíciók alapján meghatározott – időtartamát, a T_{50} és T_{90} értékeket, ezek hibáit, valamint a kitörés kezdetéhez tartozó időt (trigger time).



6.1.6. ábra. A BATSE műszer 00222 számú kitörése gamma „fénygörbéje”. Vízszintesen az idő van feltüntetve másodpercekben, függőlegesen a beütésszám.

A BATSE 3B katalógus 1122 kitörést tartalmazott (a 6.1.6. ábrán láthatjuk példának a 00222 jelű gammakitörés megfigyelt intenzitásgörbéjét), az időtartam-táblázatban 834 kitörés adatai voltak megtalálhatók, a fluxustáblázatban és az időtartam-táblázatban egyszerre megtalálható kitörések száma 797 volt. Ez alig kisebb, mint 834, a kitörések száma, viszont a további tanulmányozáshoz szükség lehet a fluxus- és fluenciaadatokra, ezért célszerű azon kitöréseket tanulmányozni, amelyekre minden adat rendelkezésre áll. A 3B katalógus időtartamadatai (T_{90}) a 6.1.5. ábrán vannak feltüntetve. Mivel a kitörések időtartamai 4-5 nagyságrendet átfognak a századmásodperces skálától a több száz másodperces skáláig, célszerű az adatokat logaritmikus skálán ábrázolni, mint ahogy azt a már eddig idézett cikkek ábráin is láthattuk (6.1.4. és 6.1.5. ábrák).

6.2. A 3B katalógus időtartamainak elemzése

A 6.1.5. ábrán az eloszlás több csúcsot is mutat. Jól elkülöníthető a hosszú és a rövid kitörések csoportja, de közöttük is látható egy „újabb” csoport. E csoport létét vagy nemlétét – ti. hogy esetleg csak véletlen fluktuációról van e szó – 1998-ban vizsgáltam meg [Horváth, I., 1998]. A vizsgálatok során a χ^2 próbát alkalmaztam. A módszer leírását részletesebben lásd például Press és társai könyvében [Press, W. H., Flannery, B. P. Teukolsky, S. A. and Wetterling, W. T., 1992].

A χ^2 próba hisztogramok elemzése esetén alkalmazható. Jelen esetben beütésszámokról van szó, tehát Poisson-eloszlást feltételezve a hiba a beütésszám négyzetgyöke. Ha az x_i pontokban egy $f(x)$ függvény illesztése történik, akkor

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - f(x_i))^2}{\sigma_i^2} \quad (6.2.1)$$

ahol σ_i a már említett hiba, illetve a beütésszám négyzetgyöke. A χ^2 várható értéke bizonyos feltételek mellett $N-\nu$, ahol ν az illesztett paraméterek száma (N a binek száma). Ha a hiba eloszlása korrelálatlan Gauss-eloszlás, akkor χ^2 eloszlása ismert, és így a várható értéktől való eltérés valószínűsége megadható (lásd pl. [Jánossy, L., 1965]).

Amennyiben a változó eloszlása több nagyságrendet ölel át, a logaritmikus eloszlást célszerű illeszteni. A kitörések időtartamának logaritmikus eloszlását Gauss-görbékkel illesztettem. Bár az előzőekből már kitűnt, hogy létezik az irodalomban elfogadott hosszú és rövid kitörések csoportja, a teljesség kedvéért mégis egy Gauss-görbével kezdtem a vizsgálatokat. Ezen kétparaméteres fit valószínűsége 0,1% a χ^2_2 értéke alapján [Horváth, I., 1998]. Figyelembe véve, hogy a nullhipotézis jelen esetben: *az eloszlás egy Gauss-görbével leírható adathalmaz megfigyelt adataiból kapható*, az állításom a következő: *annak a valószínűsége, hogy a nullhipotézis igaz: 0,001*. Tehát nagy szignifikanciával mondhatjuk, hogy a mérési adatok nem írhatóak le egy lognormális eloszlással.

Második nullhipotézisem:

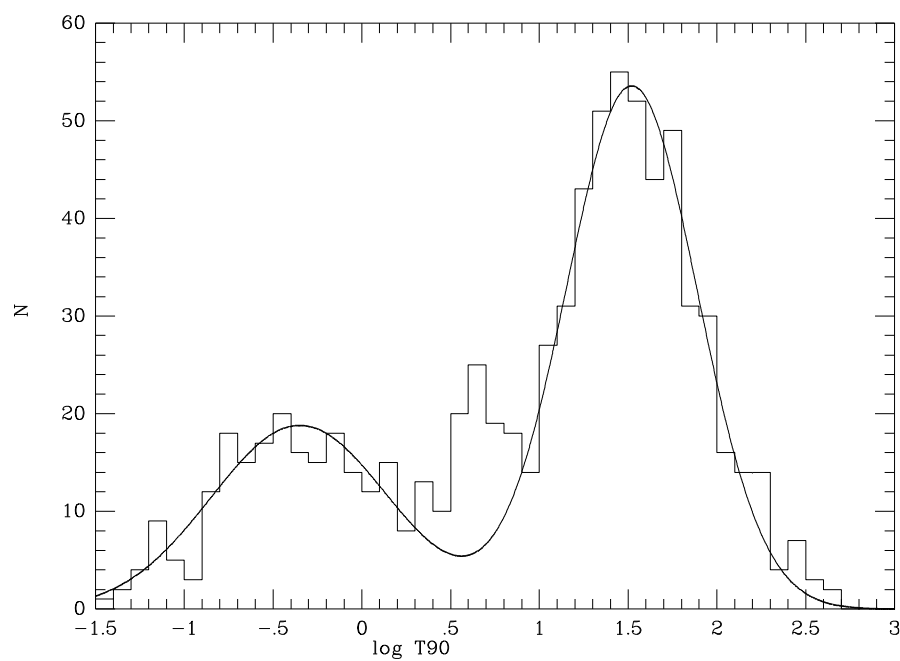
A logaritmikus eloszlás két Gauss-görbével írható le.

Az illesztést χ^2 módszerrel végeztem, a legjobb χ^2 46,8 volt, ami 40% valószínűségnek felel meg. Tehát ezt a nullhipotézist nem vethetjük el. Lehetséges, hogy az alaphalmaz, amiből az adatok származnak, két Gauss-görbével leírható.

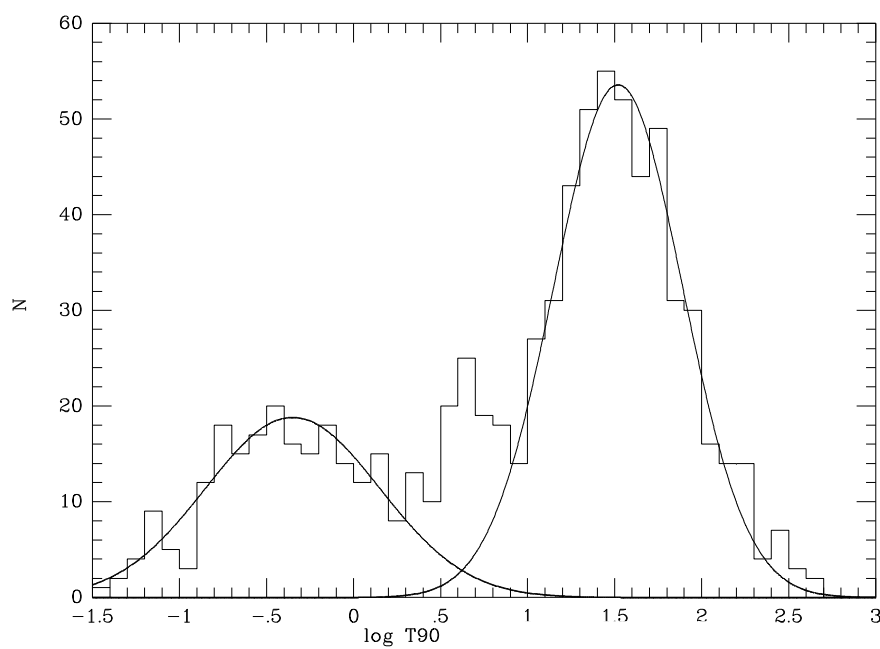
Ez az illesztés látható a 6.2.1. ábrán. A két normális eloszlás összege feltűnően jól egyezik mind a két „szárnyon”, de jól látható, hogy ahol az „elméleti” görbe minimális, a megfigyelt görbe nem minimális, sőt jelentős eltérés tapasztalható.

A 6.2.2. ábrán a két Gauss-görbét külön-külön ábrázoltam. Itt is jól látható a szárnyakon való egyezés. A 3-8 másodperces tartományban jól megfigyelhető viszont 3-4 egymás melletti bin, melyekben jelentős többlet található.

Ismert jelenség ez a csillagászati spektroszkópiában. A spektrum jól illeszthető egy elméleti spektrummal, viszont lehetnek lokális eltérések az elméleti és a megfigyelt görbék között. Ott ezek tipikusan spektrumvonalakat jeleznek. Jelen esetben is az eloszlásoknak egy kis tartományon levő eltéréséről van szó. Vizsgáljuk meg, hogy ez esetben vannak-e erre mutató jelek a gammakitörések időtartameloszlásában.

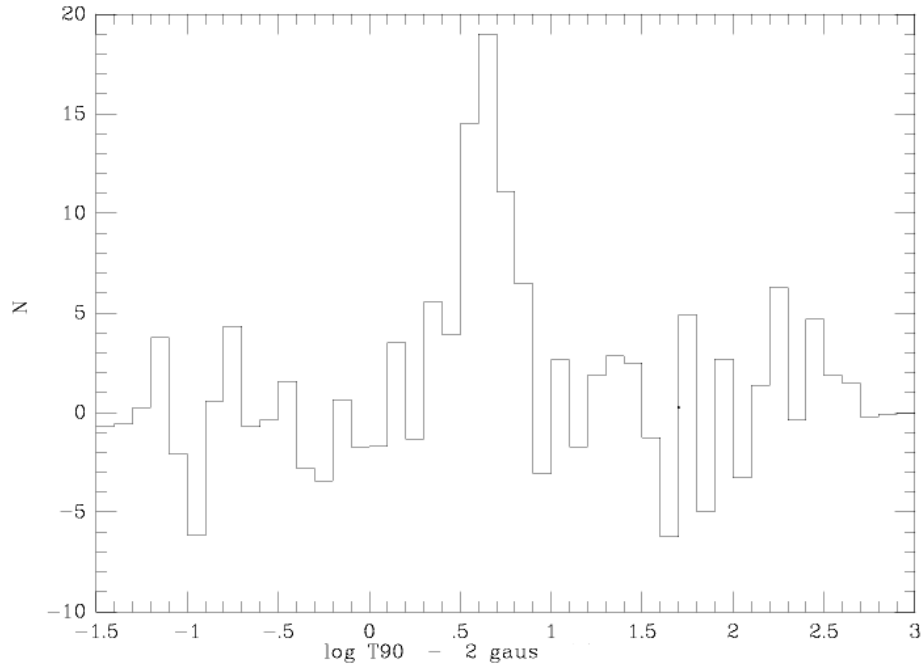


6.2.1. ábra. Kétkomponensű illesztés az időtartameloszlásra.



6.2.2. ábra. Az időtartameloszlás és az illesztett két Gauss-görbe.

A következő ábrán (6.2.3. ábra) a megfigyelt és a legjobb két-Gauss fit különbségét ábrázoltam. Önmagában ez az ábra nem sokat mond, hiszen a nullától való eltérést nincs mihez viszonyítani, azaz a függőleges tengelyen feltüntetett értékeket ismerjük ugyan, de ezek jelentését csak akkor tudjuk, ha ismerjük a hozzájuk tartozó hibát.

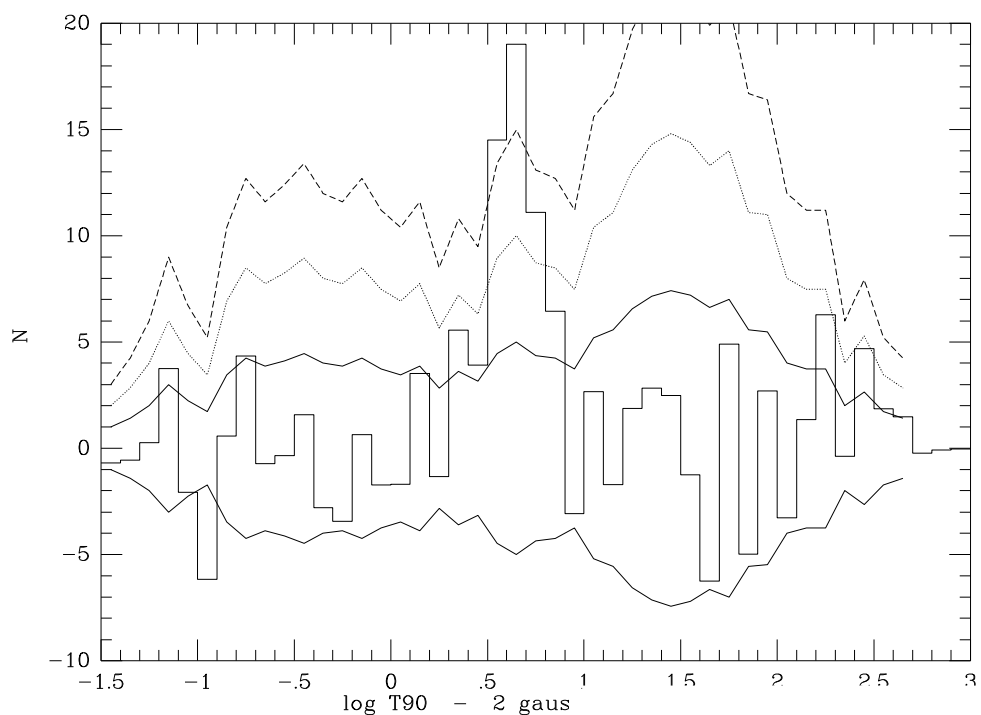


6.2.3. ábra. A megfigyelt és a legjobb két-Gauss fit különbsége.

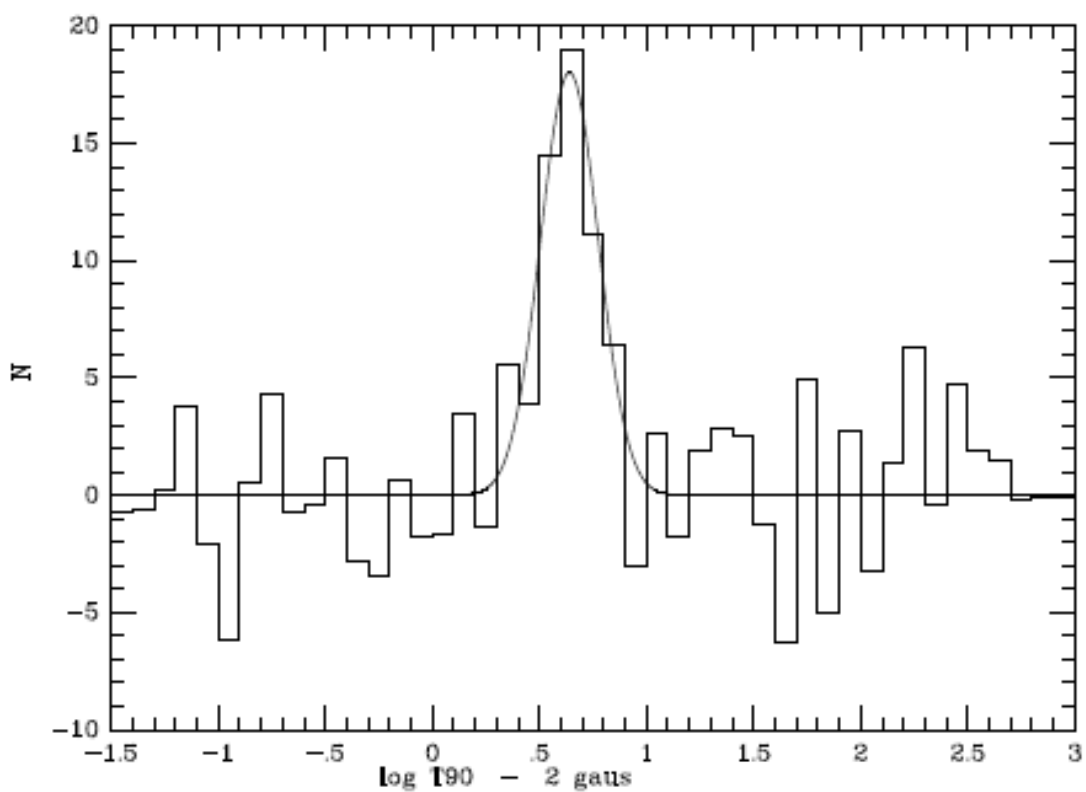
Az egy binben található pontok számának a hibáját jó közelítéssel a megfigyelt beütésszám négyzetgyöke adja. Szokás ezt egy szigmának vagy egyszeres szórásnak nevezni. Ez persze csak akkor igaz, ha Poisson-folyamatról van szó. A 6.2.4. ábrán feltüntettem a plusz és mínusz egyszeres hibákat, valamint a plusz kétszeres és háromszoros hibákat is.

Feltűnő, hogy a 13 egyszeres hibánál nagyobb értékből 6 egymás mellett található. Kétszeres hiba felett 4 érték van, és ezekből 3 egymás mellett. Háromszoros hiba felett 2 érték található, amelyek egymás melletti binekben vannak. Szükséges megvizsgálni, hogy ezek véletlen ingadozások-e, vagy lehet-e magyarázni ezen eltéréseket egy harmadik komponenssel.

A 6.2.5. ábra mutatja, hogy az eltérések egy egyszerű Gauss-görbével jól illeszthetők. A következőkben megvizsgálom, hogy mennyire nevezhető szignifikánsnak e feltételezés.

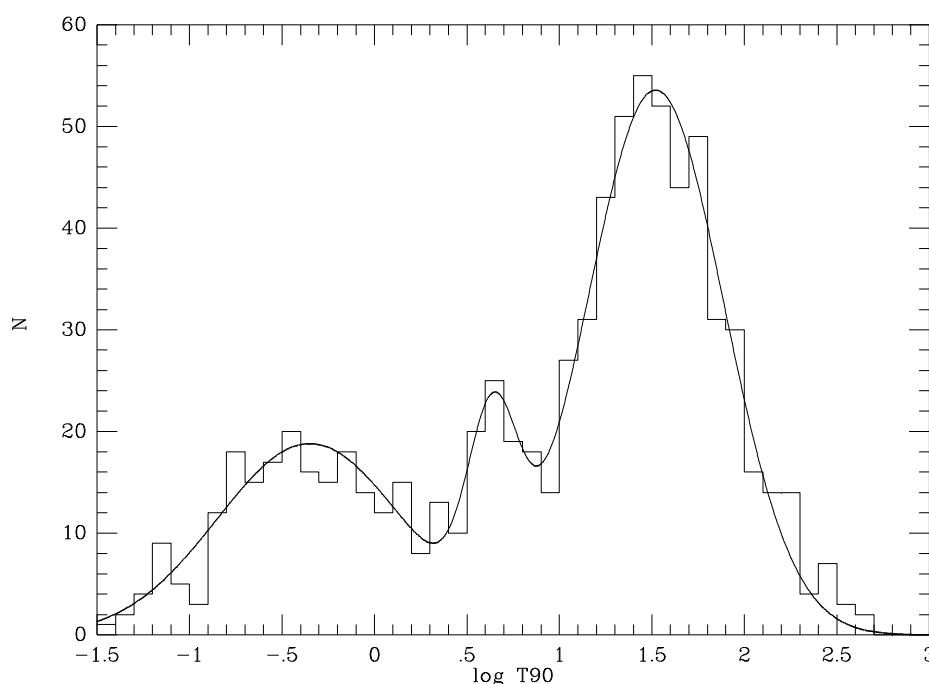


6.2.4. ábra. A megfigyelt és a legjobb két-Gauss fit különbsége, valamint az egyszeres (folytonos), kétszeres (pontosított) és háromszoros (szaggatott vonal) szórás szintvonalai.



6.2.5. ábra. Az eltérés egy egy-Gauss illesztéssel.

Annak megállapításához, hogy szükség van-e egy újabb komponensre, a következőket alkalmaztam. Illesztettem egy három Gauss-görbe összegeként előálló elméleti görbét a teljes eloszlásra (6.2.6. ábra). Ebben az esetben az illesztésre kapott χ^2 érték 24,0. Ezt az értéket kell a két Gauss-görbe összegénél kapott legjobb χ^2 értékkel (46,8) összehasonlítani. A két illesztésnél kapott χ^2 érték különbsége $46,8 - 24,0 = 22,8$ megmondja valószínűségét. Mivel a második elméleti görbe három új paramétert is használ, a valószínűség egy három szabadsági fokú χ^2 -eloszlást követ. A 22,8-nak nagyon alacsony, 10^{-4} valószínűség felel meg egy három szabadsági fokú χ^2 -eloszlás esetén. Tehát ilyen kicsiny annak a valószínűsége, hogy véletlenül álljon elő egy, a mérésnél kapott eloszlás. A legjobb három-Gauss illesztést a 6.2.6. ábra mutatja.



6.2.6. ábra. A háromkomponensű illesztés az időtartameloszlásra.

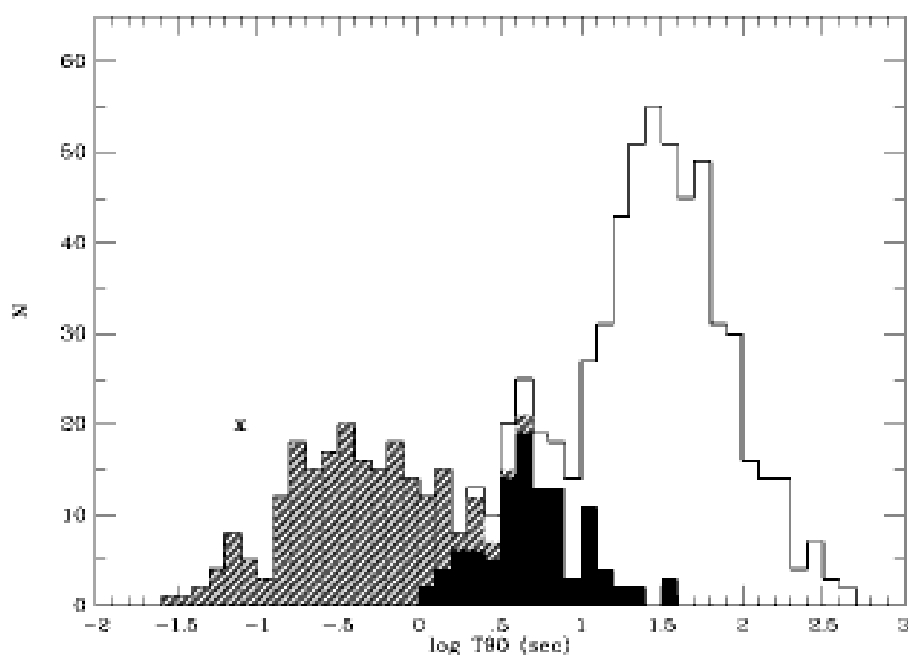
6.2.1 táblázat. A három csoport paraméterei.

	Középérték ($\lg T_{90}$)	a $\lg T_{90}$ szórása	tagok szá- ma	részarány %-ban	tipikus időtartam T_{90} -ben
rövid	-0,35	0,50	236	30	< 5 mp
hosszú	1,52	0,37	497	62	> 4 mp
közepes	0,64	0,14	61	8	~ 2,3-8 mp

A 6.2.1 táblázat tartalmazza a legjobb illesztés paramétereit. Ez alapján az úgynevezett hosszú gammakitörések átlagos T_{90} időtartama körülbelül 33 másodperc. Az illesztés alapján a hosszú kitörések a megfigyelt gammakitörések 62 százalékát teszik ki. A rövid kitörések átlagos T_{90} időtartama körülbelül fél másodperc, és a BATSE

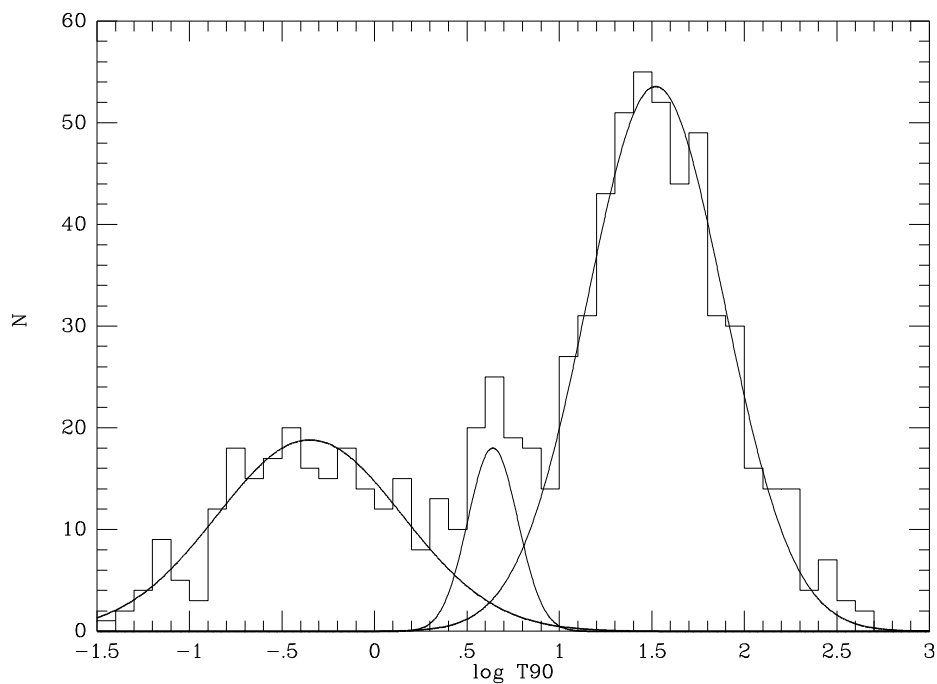
által megfigyelt gammakitörések kb. harmada lehetett rövid gammakitörés. A kitörésidőtartamok eloszlására történt illesztések alapján a 3-6 másodperc közötti gammakitörések nagyobb része tartozhat a harmadik típusba. Mivel ezek 1-2 másodpercnél hosszabbak, de 10-50 másodpercnél rövidebbek, ezért a közepes típusú gammakitörés elnevezés látszik helyénvalónak.

A fenti eredményeimet közlő *Astrophysical Journal* kötetben (508) jelent meg egy másik cikk [Mukherjee, S., et al., 1998], amely ugyancsak a gammakitörések csoportjaival foglalkozott. Többváltozós statisztikai analízist alkalmazva hatdimenziós térben (tehát 6 mért paramétert használva) vizsgálták meg a kitörések csoportosíthatóságát, és a fentiekhez hasonlóan, három csoport létét látták statisztikusan igazolva. A Mukherjee-féle csoportok időtartamának eloszlását mutatja a 6.2.7. ábra. Jól látható a két elemzés eredményeinek nagyfokú hasonlósága (v.ö. a 6.2.6. és 6.2.8. ábrákkal), továbbá, hogy Mukherjee-ék gammakitörés csoportjai is kitörésidőtartamok szerinti elrendeződést mutatnak.

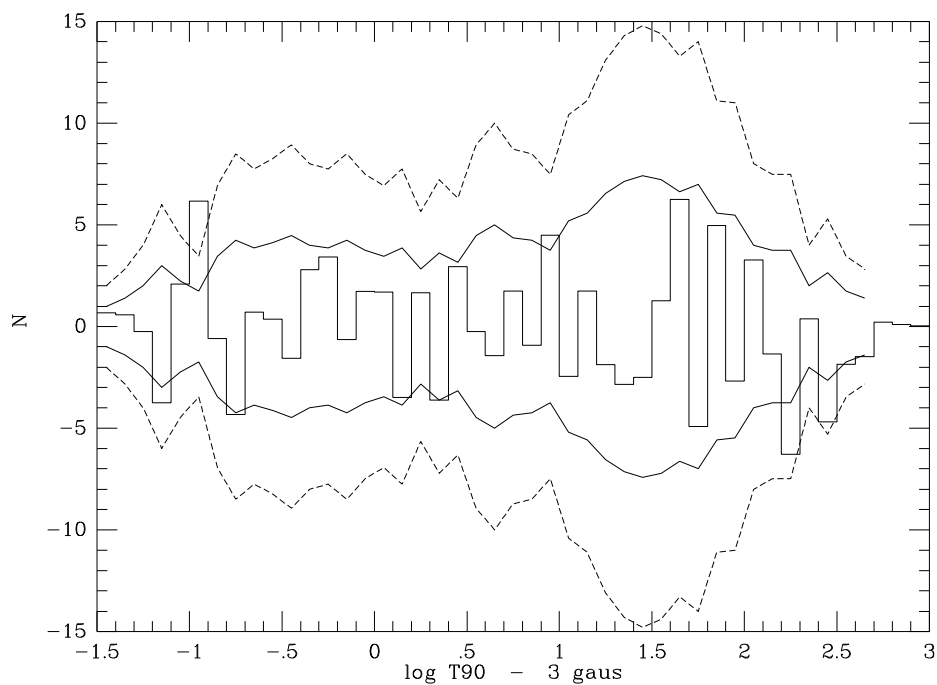


6.2.7. ábra. Mukherjee et al. (1998) csoportjainak időtartameloszlása.

Az illesztett és a mért adatok közötti különbséget mutatja a 6.2.9. ábra, amelyen tendencia nem látható, és „zajnak” tűnik. Ezt ellenőrizendő, hasonlóan a 6.2.4. ábrához, az egyszeres és a kétszeres hibákat is ábrázoltam. Egyszer találunk a kétszeres hibánál nagyobb eltérést és nyolc esetben egyszeres hibánál nagyobb eltérést. Ezek az értékek megfelelnek a statisztikus szórásból vártaknak. Mivel a kétszeres szórás a 95%-os, az egyszeres szórás pedig a 68%-os szignifikanciaszintnek felel meg, ezért a harmincöt esetből 1,7 kétszeres hibát túllépő, és 11,2 egyszeres hibát túllépő eseményt várhatunk.



6.2.8. ábra. A három csoport lognormális eloszlással illesztett sűrűségfüggvényei.



6.2.9. ábra. A megfigyelt és a legjobb három-Gauss fit különbsége, valamint az egyszeres (folytonos) és kétszeres (szaggatott vonal) szórás szintvonalai.

6.3. A végleges BATSE katalógus adatainak elemzése

A Compton műhold 2000. május 26-án fejezte be működését a technikusok ajánlása ellenére, akik biztosan tudták volna a műholdat még évekig üzemeltetni, de a NASA felső vezetése úgy döntött, hogy a műholdat visszairányítják a Föld felé [Katz, J., 2002]. A műhold 2000. június 4-én belépett a légkörbe, részben megsemmisült, majd elmerült a Csendes-óceánban.

A Compton műhold 1991. április 19. és 2000. május 26. között több ezer eseményt rögzített (triggerelt). Ezek közül 2704 került rögzítésre, mint gammakitörés. A megfigyelt adatokat a BATSE Végleges Katalógusban (Final BATSE Catalog) lehet elérni az interneten, amelynek helye:

http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/batse/BATSE_Ctlg/index.html

Az időtartam-táblázatban 2041 kitörésre található T_{90} adat. A további elemzések érdekében ezek közül annak az 1929 kitörésnek az adatát vizsgáltam, amelyekről fluxusinformációk is rendelkezésre álltak.

A T_{90} kitörésidőtartamok eloszlását a 6.3.1. ábra mutatja. A középső csoport ezen az ábrán nem annyira szembetűnő, mint az a korábbi adatokban volt. Az előző fejezetben használt χ^2 elemzésnél erőteljesebb a **maximum likelihood módszer** (ML), vagy magyarul a legnagyobb valószínűség elve. Nagy előnye, hogy nem kell rekeszekbe osztani a mért adatokat, minden adat önmagában szerepel az elemzés során.

Az ML módszer alapgondolata, hogy az a paraméter valódi értékét azzal az a' értékkel becsüljük, mely, ha a paraméter valódi értéke volna, akkor éppen az adott minta bekövetkezése volna a legvalószínűbb az összes lehetséges (n elemű) minták között [Prékopa, A., 1972].

Ha adott az $x_1, x_2, \dots, x_n$ n -elemű (mérési) minta egy változóra, melynek sűrűségfüggvénye

$$f = f(x, a) \quad (6.3.1)$$

és a mérési eredményekből az a értéket akarjuk becsülni, akkor az

$$l(x_1, x_2, \dots, x_n, a) = f(x_1, a) f(x_2, a) \dots f(x_n, a) \quad (6.3.2)$$

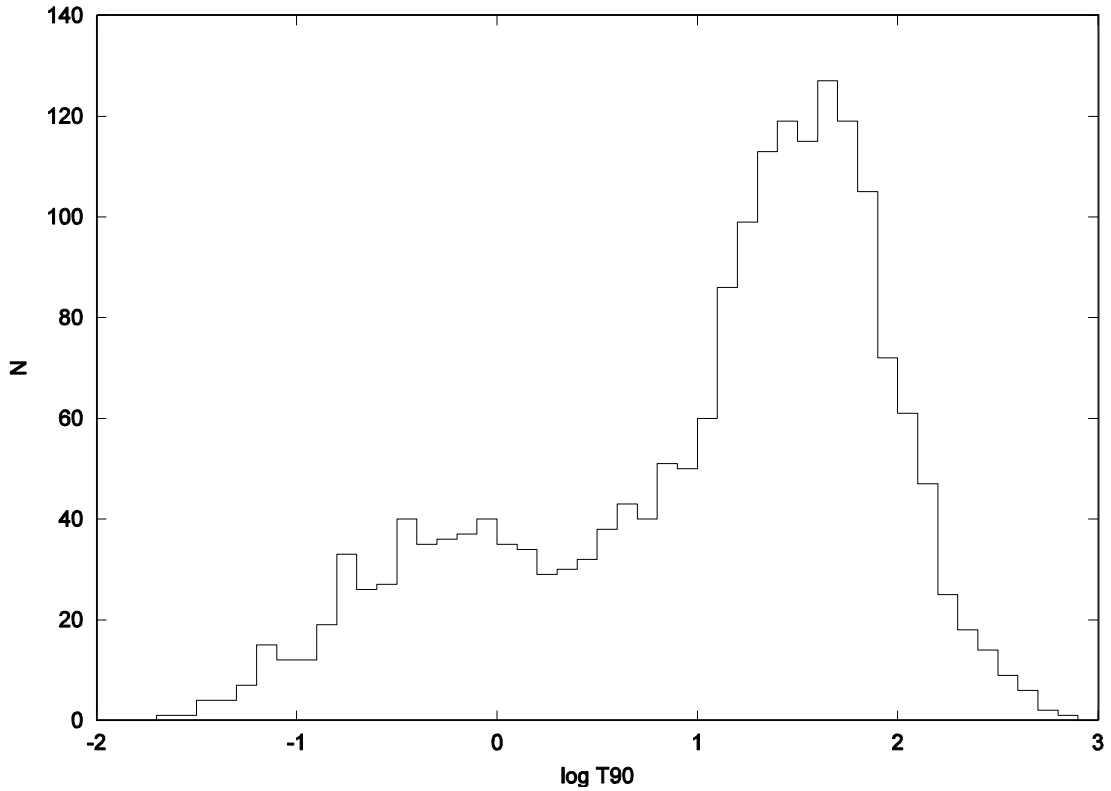
függvényt likelihood-függvénynek nevezzük.

A maximum likelihood módszer, hogy az a paraméter becslésére azt az értéket választjuk, ahol a likelihood-függvény értéke maximális. Ez az érték konzisztens és aszimptotikusan normális eloszlású. Az aszimptotikusan normális eloszlású becslések közül a maximum likelihood becslés a legjobb becslés [Bronstein, I. N. and Szemengyajev, K. A., 1980], [Michelberger, P., Szeidl, L. és Várlaki, P., 2003].

A BATSE végleges katalógus fent említett 1929 T_{90} adatának az eloszlását mutatja a 6.3.1. ábra.

Az egy Gauss-görbe illesztés, hasonlóan az előzőekhez, most sem ad jó egyezést. Két Gauss-görbét illesztve 5 illesztendő paraméterünk van. Egy Gauss-görbét 3 paraméterrel írhatunk le; az eloszlás maximumhelye, szórása és súlya (w , lásd a 6.3.3 és 6.3.4 egyenleteket). Következésképpen két Gauss-görbe esetén 6 illesztendő paraméte-

rünk van, de van egy feltétel is az amplitúdók összegére. Az amplitúdók összege vagy N (az észlelt objektumok száma), vagy ha a megtalálási valószínűség az illesztett függvény, akkor a teljes integrál értéke 1. A 6.3.4 egyenlettel leírt Gauss-eloszlás integrálja 1, tehát az előbb említett feltétel akkor elégíthető ki, ha az illesztés során használt w együtthatók (lásd a 6.3.3 egyenletet) összege 1.



6.3.1. ábra. A végleges BATSE katalógus 1929 időtartamadatának gyakorisága.

L -lel jelölve az l likelihood-függvény logaritmusát, a 6.3.2 egyenlet az alábbi alakú lesz :

$$L = \ln l = \sum_{i=1}^N \ln(w_1 f_1(x_i, T_1, \sigma_1) + w_2 f_2(x_i, T_2, \sigma_2)) \quad (6.3.3)$$

ahol f_k a már említett

$$f_k = \frac{1}{\sigma_k \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - T_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (6.3.4)$$

alakú Gauss-függvény. Két Gauss-görbe illesztése esetén az L maximális értéke 12320,11 [Horváth, I., 2002], három Gauss-görbe illesztése esetén L maximális értéke 12326,25. A likelihood maximális értékének javulása várható, hiszen több paraméterrel írjuk le az illesztett elméleti görbét. Jelen esetben 3-mal nőtt a paraméterek száma. Ez esetben az L értékek különbségének a kétszerese egy 3 szabadsági fokú χ^2 -eloszlást követ [Kendall, M. and Stuart, A., 1976]. Ezen

$$2(L_3 - L_2) = \chi_3^2 \quad (6.3.5)$$

képlet alapján számított valószínűség 0,5%.

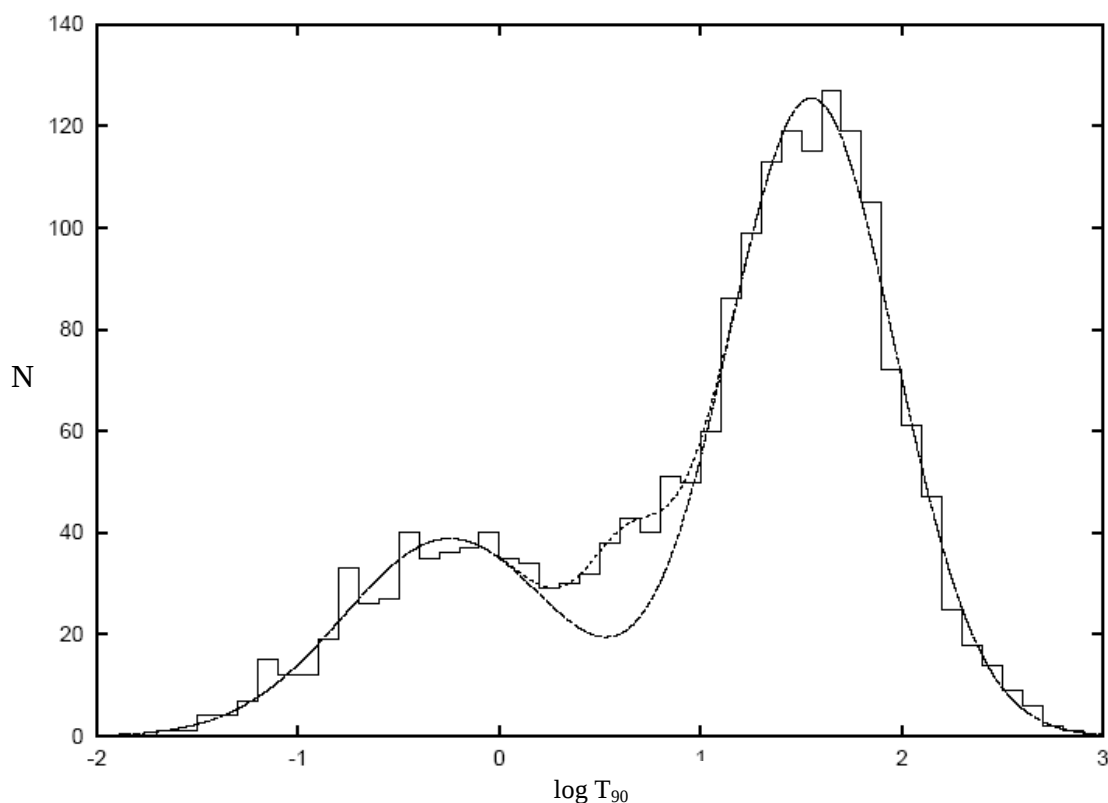
Az illesztéssel kapott „legjobb” görbéket két, illetve három Gauss-görbe esetén a 6.3.2. ábra mutatja. A 6.3.1 táblázatban és a 6.3.2 táblázatban az illesztésekből kapott paraméterek találhatók [Horváth, I., 2002]. A szignifikanciát Monte-Carlo módszerrel ellenőriztem.

6.3.1 táblázat. A rövid és hosszú csoportok paraméterei.

csoportok	középpont $\lg T_{90}$	szórás	súly
rövid	-0,11	0,61	0,32
hosszú	1,54	0,43	0,68

6.3.2 táblázat. A három csoport paraméterei.

csoportok	középpont $\lg T_{90}$	szórás	súly
rövid	-0,25	0,53	0,26
közepes	0,63	0,20	0,06
hosszú	1,55	0,42	0,68

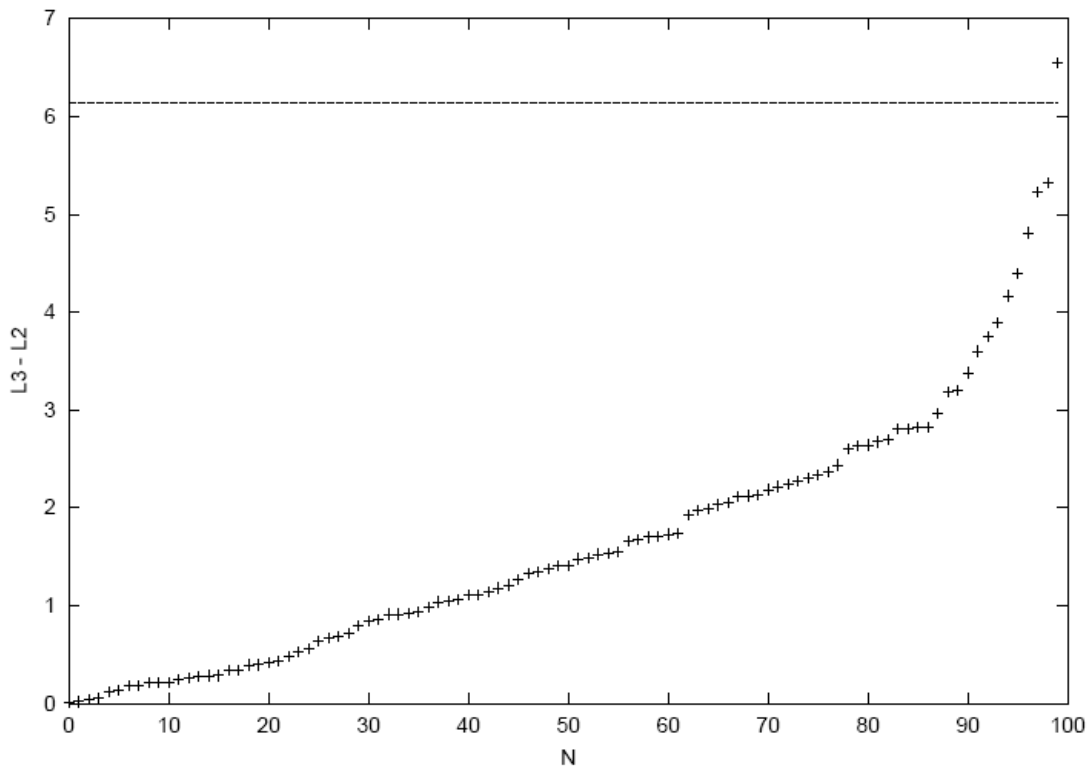


6.3.2. ábra. A két- (folytonos vonal) és háromkomponensű (szaggatott vonal) illesztés az időtartameloszlásra.

A 6.3.1 táblázat adataival, mint sűrűségfüggvénnyel, véletlenszerűen választottam 1929 számot. Ezen számokra elvégeztem a kétkomponens- és a háromkomponens-illesztést. Természetesen három komponens esetén a likelihood értéke magasabb lett. Ezt az eljárást elvégeztem még 99-szer (99x1929 véletlen számmal). A száz likelihood különbségeloszlását mutatja a 6.3.3. ábra.

Az eljárás során feltételeztem, hogy egy kétkomponensű mintából választok 1929 pontot. Feltételezve, hogy nincs harmadik komponens, a Monte-Carlo eljárással azt vizsgálom, hogy milyen eséllyel kaphatok a mérésnél tapasztalt likelihood javulást (6,14). Ez száz esetből egyszer történt meg, ami megerősíti a 3 szabadsági fokú χ^2 -eloszlást használva kapott 0,5% valószínűséget [Horváth, I., 2002].

Hogy a harmadik populáció nem véletlen fluktuáció eredménye, azt az is alátámasztja, hogy a száz esetből szintén csak egyszer fordult elő, hogy a mérésnél kapott hat százaléknál nagyobb lett a csoport mérete. Az átlagos csoportméret a Monte-Carlo szimuláció során 2,5% volt [Horváth, I., 2002].

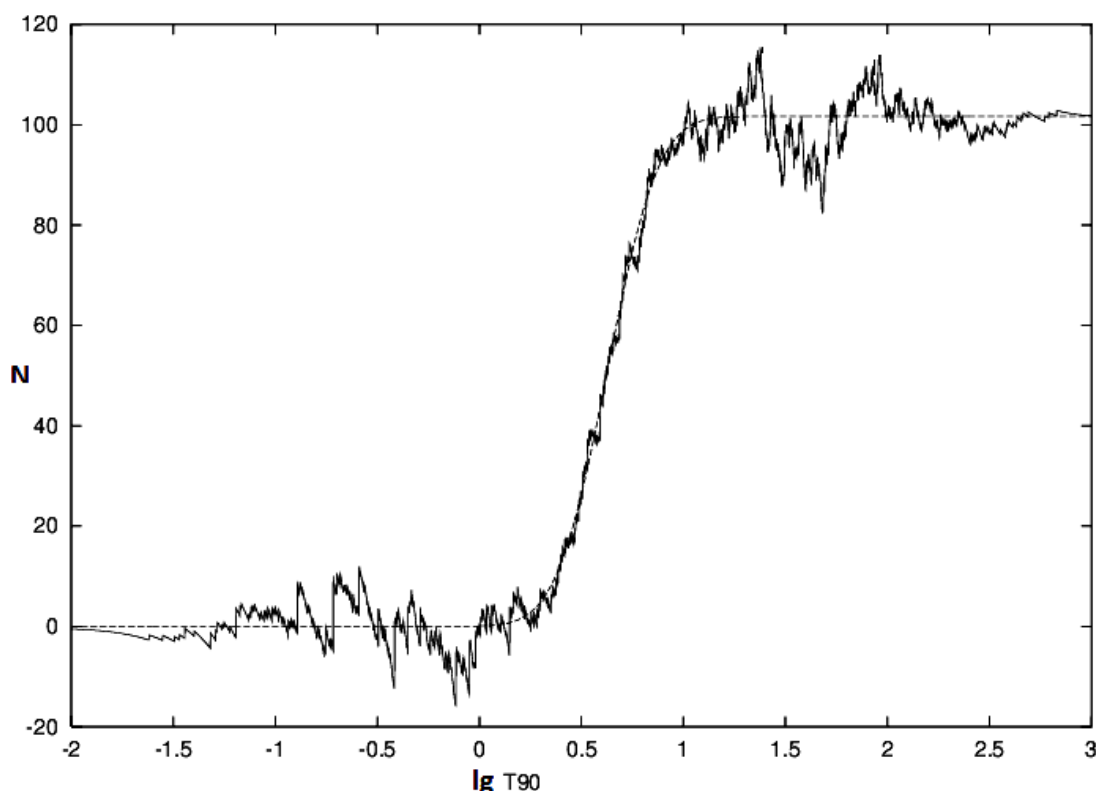


6.3.3. ábra. Az MC szimulált likelihood különbségek növekvő sorrendbe rendezett eloszlása. A szaggatott vonallal jelzett 6,14-es érték az elemzésben kapott likelihood javulás. Az MC szimulációkból ezt az értéket csak egy haladta meg.

A kapott paraméterek jó egyezést mutatnak a 6.2. fejezet adataival. Összehasonlítva a 6.2.1 táblázat adatait a 6.3.2 táblázat adataival, láthatjuk, hogy a csoportok középpontjai a közepes és hosszú kitörések esetén alig térnek el egymástól (0,63 – 0,64 valamint 1,55 – 1,52). A rövid kitörések centrumára a 6.2. fejezetben 0,56 másodpercet kaptam, míg a mostani elemzésnél 0,45 másodpercet. A szórások a rövid és hosszú kitö-

rések esetén kis mértékben változtak (0,53 – 0,50 és 0,42 – 0,37), míg a közepes csoportra kapott szórás ezen elemzésben 0,2, a 6.2. fejezetben kapott 0,14 értékhez képest. A csoportok részarányai a mintában a 6.2. fejezet 30 (rövid kitörések), 8 (közepes kitörések), 62 (hosszú kitörések) százalékához képest, ezen elemzésben 26, 6 és 68 százalék. A harmadik csoport nagyon hasonló paraméterekkel rendelkezik mind a két esetben (középérték, szórás és relatív darabszám). Az adatok szórásával, fluktuációjával kapcsolatban segít tájékozódni a 6.3.4. ábra, melyen a harmadik csoport elméleti és „mért” eloszlásfüggvényét ábrázoltam.

Az ábrán látható függvény a megfigyelt T_{90} adatok eloszlásfüggvénye, melyből levontam a rövid és hosszú kitörések három-Gauss illesztéssel kapott eloszlását (folytonos vonal). Szaggatott vonallal a három-Gauss illesztéssel kapott közepes csoport eloszlásfüggvényét rajzoltam. Az ingadozások maximum 10-15 darabszámmal térnek el az „elméleti” Gauss-görbétől, míg a harmadik komponens amplitúdója 102. Vagyis az ingadozásoknál 7-8-szor nagyobb „fluktuációnak” kellene létrehoznia a harmadik csoportnak megfelelő eltérést, ha nem lenne a harmadik csoport léte valós.

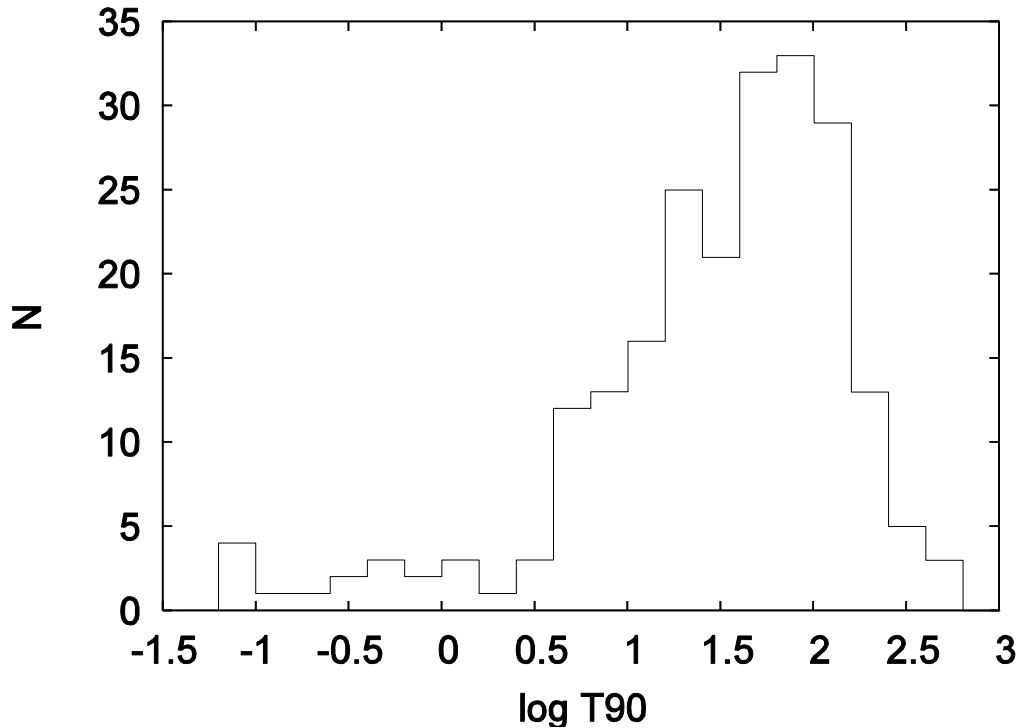


6.3.4. ábra. A harmadik csoport elméleti (szaggatott vonal) és mért (folytonos vonal) eloszlásfüggvénye (a részletes magyarázat a szövegben).

6.4. A Swift BAT katalógus időtartamainak az elemzése

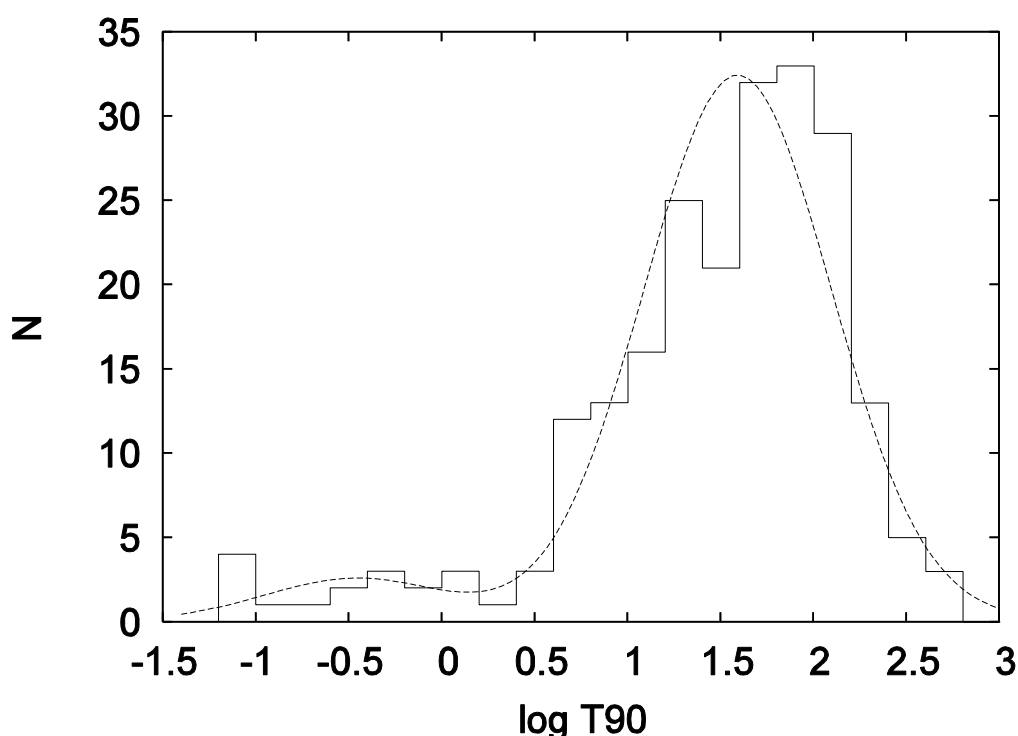
A Swift műhold – mint azt az előzőekben leírtam – 2004-ben kezdte meg működését. A megfigyelt gammakitörések adatait először 2008-ban, az első BAT katalógusban tették közzé [Sakamoto, T., et al., 2008]. Ez a katalógus 237 kitörés adatait tartalmazta, melyből 222-höz publikáltak időtartamadatot (a katalógus a 2004 decembe-re és 2007 júliusa közötti megfigyeléseket tartalmazta). Ez az adatbázis, ha nem is érte el a BATSE adatsor nagyságát, de attól teljesen független mérés volt, ezért jó lehetőséget nyújtott arra, hogy egy független adatsoron megvizsgáljam a gammakitörések csoportosíthatóságát.

A BAT katalógus a szokásos T_{90} és T_{50} adatokat is tartalmazta. Az előzőekkel összhangban az elemzést a T_{90} változóra végeztem el. A 222 darab GRB időtartamának gyakoriságát a 6.4.1. ábra hisztogramja mutatja logaritmikus skálán.



6.4.1. ábra. A Swift BAT katalógus 222 T_{90} adatának gyakorisága.

A már ismertetett módon maximum likelihood módszerrel lognormális görbét illesztettem a gyakoriság függvényre. A teljesség kedvéért az illesztéseket most is egy darab Gauss-görbével kezdtem. Egy Gauss illesztésre a legjobb likelihood 951,666 [Horváth, I., et. al., 2008], két Gauss-görbét illesztve a legjobb likelihood értéke 983,317. A legjobb illesztés paramétereit a 6.4.1. táblázat mutatja (lásd még a 6.4.2. ábrát). A likelihoodok különbségéből (31,6) adódó valószínűség kisebb mint 10^{-12} . Ez azt jelenti, hogy az egykomponensű eloszlás feltételezése extrém kis eséllyel lehet csak helyes.



6.4.2. ábra. A legjobb kétkomponensű illesztés sűrűségfüggvénye (szaggatott vonal). A mért adatokat a folytonos lépcsős függvény mutatja.

6.4.1 táblázat. Két komponens esetén a csoport paraméterek.

csoportok	középpont $\lg T_{90}$	szórás	tagok száma
rövid	-0,456	0,501	16,3
hosszú	1,606	0,507	205,7

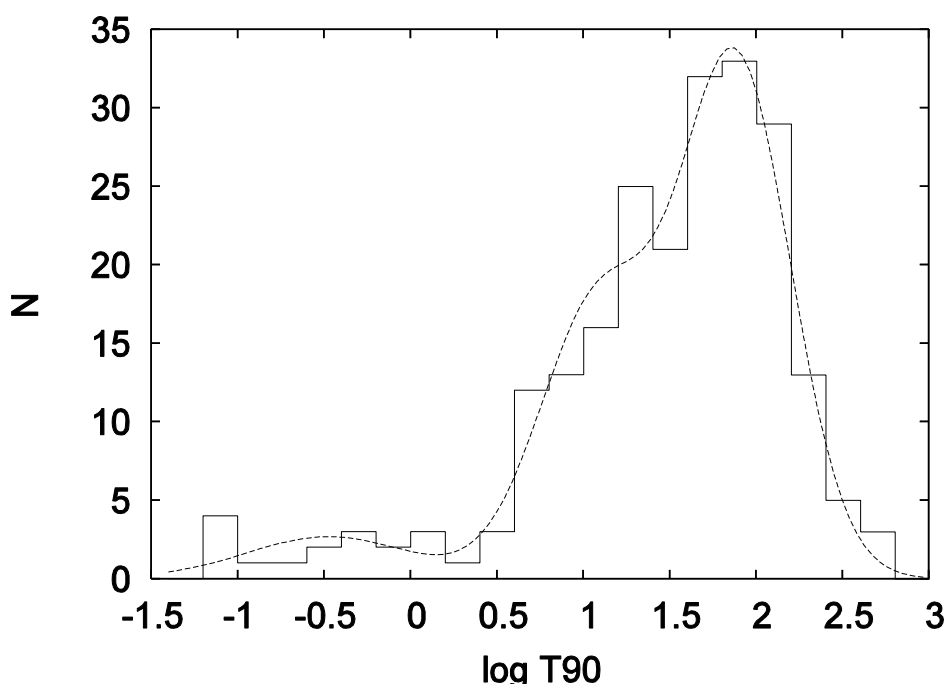
Három Gauss-eloszlást feltételezve (8 független illesztett paraméter) a legjobb illesztés paramétereit a 6.4.2 táblázat, a sűrűségfüggvényt a 6.4.3. ábra mutatja. Az ennél kapott likelihood érték 989,822. Kétkomponensű illesztés esetén a független illesztett paraméterek száma 5 volt. A már említett összefüggés alapján

$$2(L_3 - L_2) = \chi^2_3 \quad (6.4.1)$$

A kétkomponensű legjobb likelihood érték 983,317 volt, tehát a likelihood 6,505-et javult. Az ennek megfelelő három szabadsági fokú χ^2 valószínűség 99,54%, vagyis kb. fél százalék az esély arra, hogy véletlenül kapjunk három komponenset, holott a „valódi” eloszlás csak kétkomponensű.

Négy komponens esetén a legjobb likelihood érték 990,323. A javulás a három komponenshez képest csak 0,501, aminek 80,1% valószínűség felel meg. Ez azt jelenti,

hogya a negyedik komponens bevezetését ez a módszer nem tudja indokolni [Horváth, I., et. al., 2008].



6.4.3. ábra. A legjobb háromkomponensű illesztés sűrűségfüggvénye (szaggatott vonal). A mért adatokat a folytonos lépcsős függvény mutatja.

6.4.2 táblázat. Három komponens esetén a csoport paraméterek.

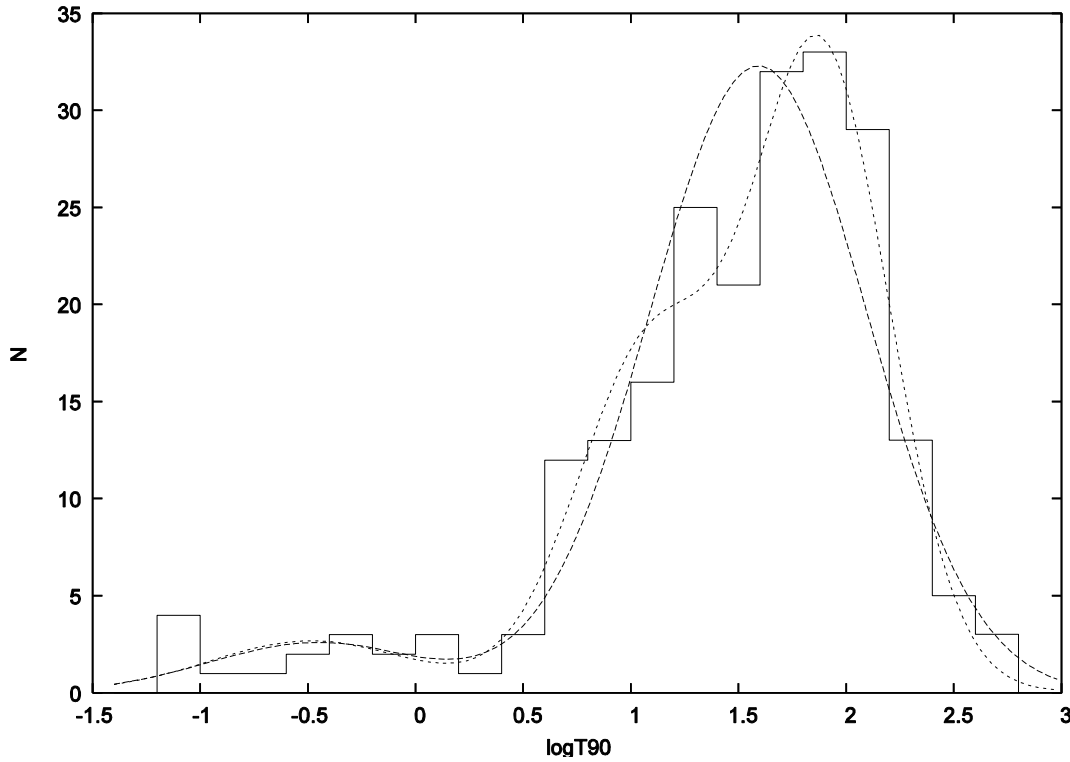
csoportok	középpont	szórás	tagok száma
rövid	-0,473	0,48	16,2
közepes	1,107	0,35	76,7
hosszú	1,903	0,32	129,1

6.4.3 táblázat. A különböző csoportszámokkal (i) való illesztéseknél kapott likelihood maximumok, és az azokból számolt szignifikanciák.

i	L_{imax}	$L_{imax} - L_{(i-1)max}$	szignifikancia
1	951,666		
2	983,317	31,6	$1 \cdot 10^{-12}$
3	989,822	6,505	0,9954
4	990,323	0,501	0,801

A 6.4.4. ábrán együtt ábrázolom a legjobb kétkomponensű és a legjobb háromkomponensű illesztést. A likelihood-függvények maximum értékeit és a 6.4.1 képletből kapott szignifikanciákat a 6.4.3 táblázatban foglaltam össze. Az egykomponensű feltételezés a vizsgálataim alapján kizárható. Minimum két komponenszt kell feltételezni (ha Gauss-eloszlást tételezünk fel a komponensekre). A harmadik komponens bevezetése 99,65%-ra szignifikáns, míg a negyedik komponens feltételezése egyáltalán nem szignifikáns.

A valószínűséget ebben az esetben is ellenőriztem Monte-Carlo szimulációval a 6.3. fejezetben leírt módon. A számítógépek gyorsaságának a fejlődése lehetővé tette, hogy ez esetben 1000 szimulációra végezzem el a számítást. Az illesztések esetén kapott legjobb likelihood értékek különbségének az eloszlását ábrázoltam a 6.4.5. ábrán. Nyolc esetben kaptam a mérési minta esetében kapott 6,505-es különbségnél nagyobb értéket. Ez a 99,2%-os szignifikancia jó egyezésben van a 6.4.1 képletből kapott 99,5%-os szignifikanciával. A 6.4.6. ábrán a három legjobban illeszkedő komponens sűrűségfüggvényét tüntettem fel.

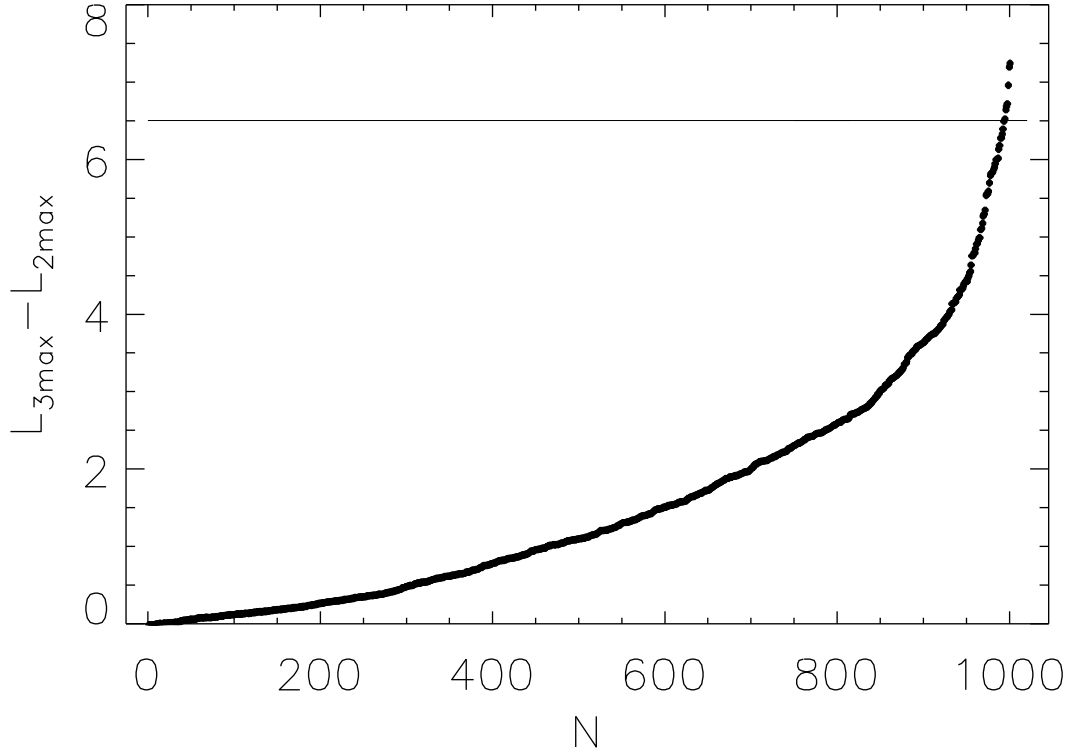


6.4.4. ábra. A legjobb kétkomponensű (szaggatott vonal) és a legjobb háromkomponensű (pontosított vonal) illesztés. A mért adatokat a folytonos lépcsős függvény mutatja.

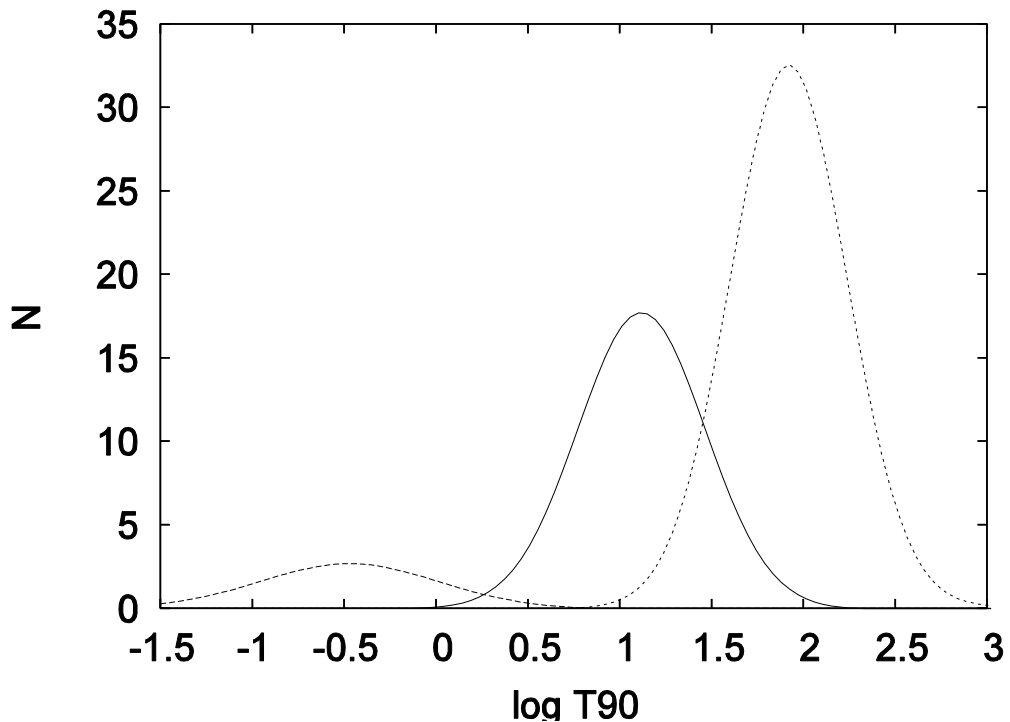
Érdeemes az e fejezetben kapott eredményeket összehasonlítani a BATSE adatsor elemzésénél kapott eredményekkel (6.3 fejezet). A 6.4.2 táblázat alapján a csoportok a teljes populáció 7 (rövid), 35 (közepes) és 58 (hosszú) százalékát teszi ki. A BATSE adatsornál ezek az értékek 26, 6 és 68 százalék voltak. A másodpercben mért időtartamok logaritmusának középértékei az egyes csoportoknál -0,47, 1,11 és 1,9. Ugyanezen értékek a BATSE adatok elemzése esetén -0,25, 0,63 és 1,55 voltak (6.3.2 táblázat). Mint azt későbbi munkáimban megmutattam [Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F. and Mészáros, A., 2006], [Horváth, I., et al., 2010], mind a BATSE, mind a Swift katalógus esetében a közepes időtartamú csoport spektruma a leglágyabb, míg a rövid gammakitörések spektruma a legkeményebb, azaz tipikusan nagyobb energiájú fotonokat figyelünk meg rövid kitörések esetében, mint hosszú kitöréseknél.

A BATSE műszer nagy hatékonysággal észlelte a fotonokat 25 keV-től egészen 1 MeV-ig [Meegan, C. A., et al., 1996], míg a Swift BAT detektora 15-150 keV között volt érzékeny [Gehrels, N., et al., 2004]. Tehát nem meglepő, hogy a Swift lényegesen kevesebb kemény kitörést (rövidek) tudott megfigyelni, mint lágyabbat (közepesek). A Swift által megfigyelt, és általam hosszú, ill. közepes időtartamú kitörésnek osztályozott kitörések átlagos időtartama nagyobbak adódtak az elemzések során, mint a BATSE esetében. Mivel a spektrumok a kitörés alatt lágyulnak (a kisebb energiás fo-

tonok részaránya növekszik [Golenetskii, S. V., Mazets, E. P., Aptekar, R. L. and Ilinskii, V. N., 1983], [Norris, J. P., Cline, T. L., Desai, U. D. and Teegarden, B. J., 1984]) ezért a kitörések utolsó szakaszában levő fotonokat a gyengébb gammában érzékenyebb Swift BAT detektor nagyobb hatékonysággal figyelte meg, mint a BATSE detektorai, ezért a kitörések hosszabb ideig voltak megfigyelhetők a Swift által.



6.4.5. ábra. Az ezer Monte-Carlo szimuláció esetén kapott likelihood értékek különbségének az eloszlása, a különbség szerint rendezve. A vízszintes vonal jelöli a mintára kapott értéket.

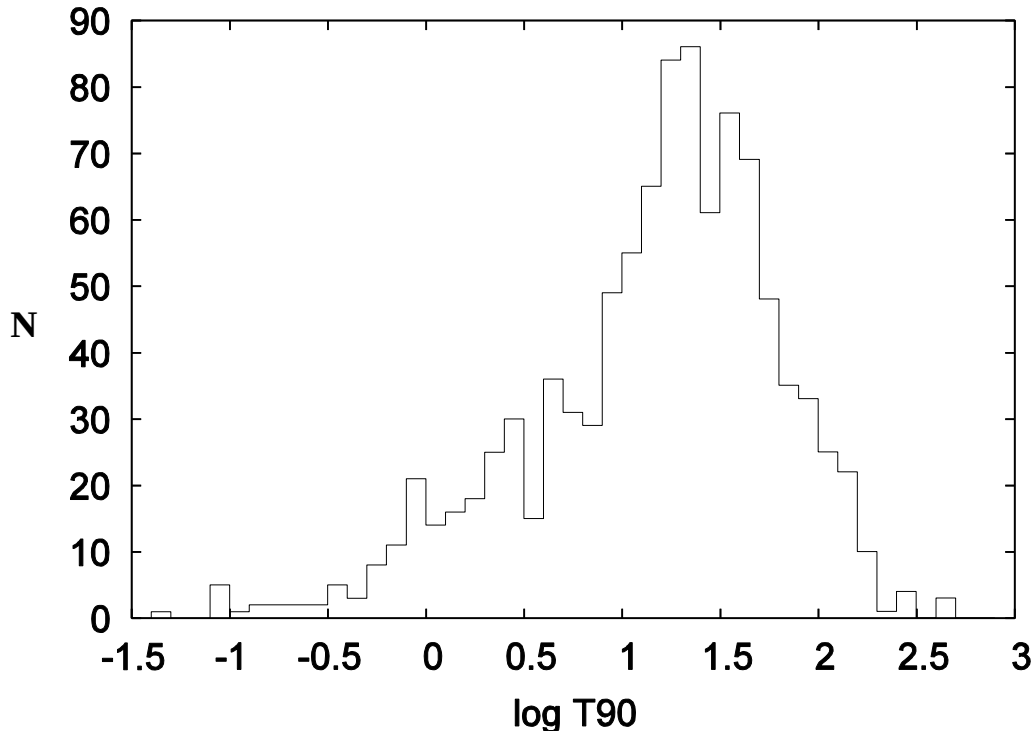


6.4.6. ábra. A három legjobban illeszkedő komponens sűrűségfüggvénye.

6.5. A Beppo-SAX műhold adatainak elemzése

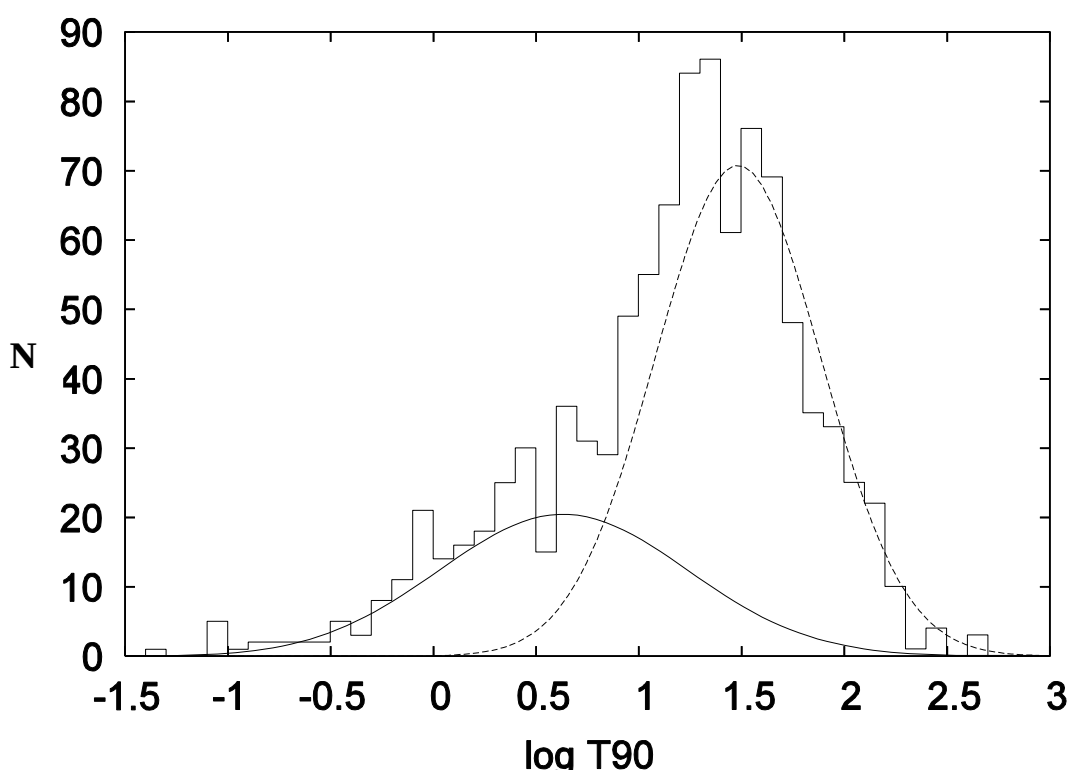
A Beppo-SAX műhold, mint már arról korábban írtam, legnagyobb felfedezése a kitörések forrásának megtalálása volt [Costa, E., et al., 1997]. A műhold 1996. (az áprilisi fellövést követő beüzemelés után 1996 júliusában történt az első megfigyelés) és 2002. (áprilisban volt az utolsó megfigyelés, megsemmisült egy évvel később) közötti időszakban több mint ezer gammakitörést figyelt meg. A 2008-ban publikált teljes katalógus [Frontera, F., et al., 2009] 1082 darab GRB-t tartalmaz. A katalógus ezek közül 1003 esetben ad meg időtartamot.

A katalógusban két időtartam van feltüntetve. A szokásos T_{90} és az úgynevezett T_{det} , ami lényegében azon másodpercek száma, amikor a megfigyelt fotonszám a kétszeres szórásnál jobban meghaladta a háttérrel. Jelen fejezet vizsgálataiban a T_{90} adatokat használtam fel, melyek megfigyelt gyakoriságát a 6.5.1. ábra mutatja.



6.5.1. ábra. A Beppo-SAX műhold által megfigyelt gammakitörések időtartamainak a gyakorisága.

Érdekes az előző fejezetekhez hasonlóan megvizsgálni, hogy az eloszlás hány komponenssel írható le. Maximum likelihood módszert alkalmazva a már ismert módon $k = 1, 2, 3$ illetve 4 Gauss-görbét illesztettem az eloszlásra. Egy Gauss-görbét illesztve a maximális likelihood $L_{I\max}=5951,895$ volt. Két Gauss-görbét illesztve a likelihood maximuma 6011,355 volt [Horváth, I., 2009]. A növekedés tehát több mint 59, ez kisebb, mint 10^{-14} -es valószínűségnek felel meg, vagyis a javulás jelentős: két Gauss-függvény összegével sokkal jobban leírhatjuk az eloszlást, mint eggyel. Az illesztett legjobb paraméterek a 6.5.1. táblázatban találhatók.



6.5.2. ábra. Az időtartamok gyakorisága és a két legjobban illeszkedő Gauss-komponens.

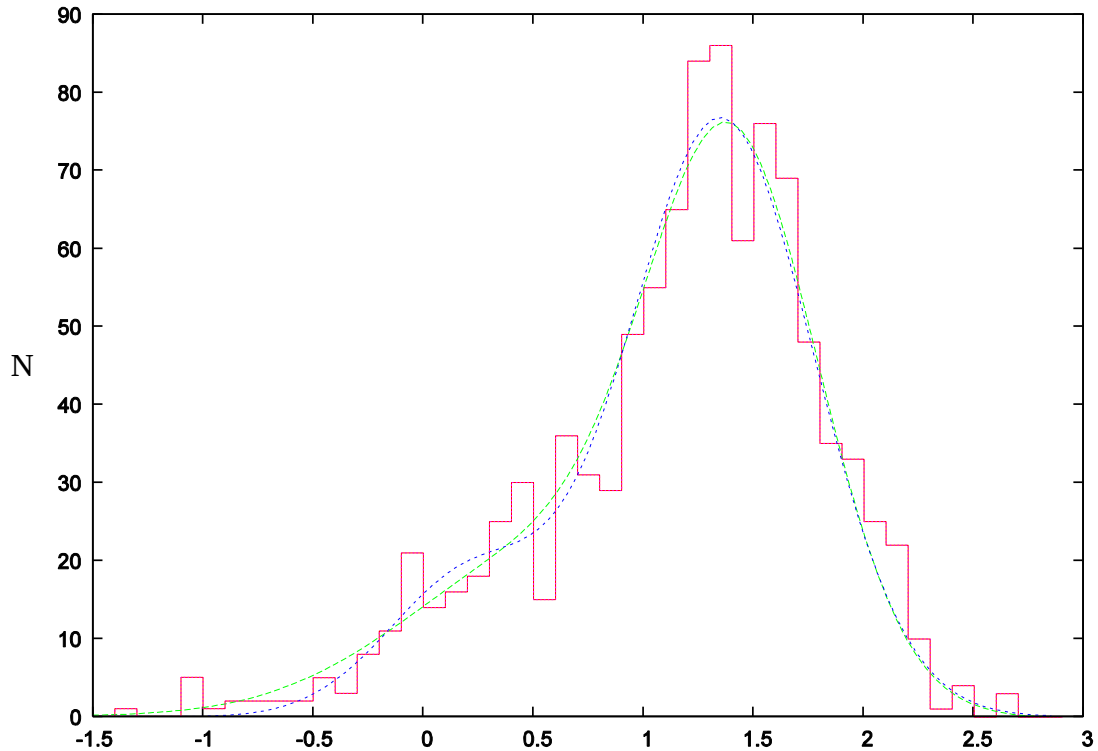
6.5.1 táblázat. A Beppo-SAX legjobb illesztés paramétereit.

	időtartam ($\lg T_{90}$)	szórás $\lg T_{90}$ -ben	elemszám
rövidebb	0,62	0,62	306
hosszú	1,45	0,40	697

Három Gauss-görbét illesztve a legjobb likelihood érték 6015,585 volt [Horváth, I., 2009], így a javulás 4,23. Ebből az értékből a 6.4.1 egyenlet szerint a szignifikancia kiszámítható, mely érték 96,3%. A 6.3. és 6.4. fejezetekben leírt módon ezt Monte-Carlo szimulációval is ellenőriztem. Ezer MC szimulációból 49 esetben kaptam nagyobb értéket a két likelihood különbségére, mint 4,23. Tehát a Monte-Carlo módszerrel számított szignifikancia 95,1%, a likelihoodok különbségéből számolt szignifikancia ezzel jó egyezésben 96,3%.

Egyik sem tekinthető erősen szignifikánsnak. Ám, mint az a 6.5.1 táblázatból látható, két csoport esetén az elemzés nem a szokásos rövid és hosszú kitöréseket azonosította, ugyanis nagyon kevés rövid kitörést látott a műhold. A rövid csoport a háromkomponensű illesztésnél jelenik meg, bár mint írtam, nem erősen szignifikánsan. A rövid csoport elemszámára a legjobban illeszkedő paraméter 10,9, tehát a megfigyelt

1003 gammakitörésnek csupán egy százaléka volt rövid kitörés. Ilyen elemszámú min-tán a rövid kitöréscsoport létét csak 95-96 százalékos szignifikanciával tudtam kimutatni.



6.5.3. ábra. A Beppo-SAX műhold által megfigyelt gammakitörések időtartam-gyakoriságára (rózsaszín) illesztett két- (kék) és háromkomponensű (zöld) fittek. A vízszintes tengelyen a T_{90} másodpercben vett értékének a logaritmusa van feltüntetve.

Ahhoz azonban, hogy a rövid kitörések csoportját azonosítsam, nem kell a Beppo-SAX műhold adatait elemeznem. A BATSE megfigyeléséből (és a Swift-éből) már tudjuk, hogy léteznek rövid gammakitörések.

A 6.5.1 táblázatból látható, hogy a két csoport, amit a maximum likelihood módszerrel azonosítottam a kitörések időtartamának az eloszlásában: a hosszú kitörések és a közepes kitörések. A csoportátlagok 1,45 és 0,62, melyek jó egyezésben vannak a BATSE elemzésnél kapott 1,55 és 0,63 értékekkel (lásd a 6.3.2 táblázatot).

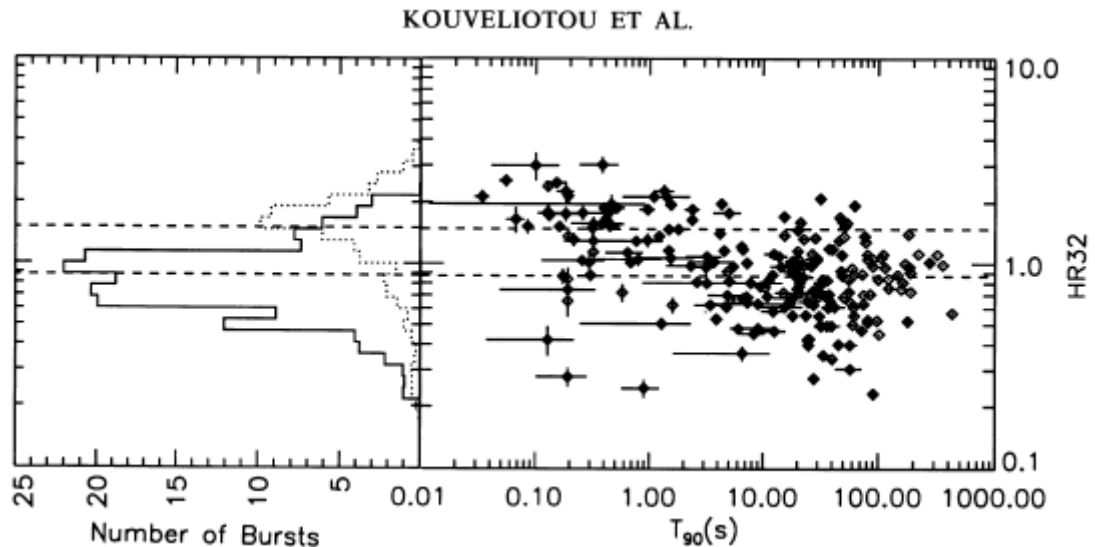
7. AZ IDŐTARTAM – SPEKTRÁLISKEMÉNYSÉG ELOSZLÁS

A harmadik csoportot felfedező két cikk a *The Astrophysical Journal* ugyanazon kötetében jelent meg [Horváth, I., 1998], [Mukherjee, S., et al., 1998]. A felfedezést követően vita indult meg, hogy vajon reálisan léteznek-e egy újabb kitöréscsoport, vagy esetleg egy műszereffektus okozza csak az adathalmaz torzulását [Hakkila, J., et al., 2000]. A BATSE adathalmazt megvizsgálva többen többféle statisztikai eljárást alkalmazva igazolták a harmadik csoport létét, illetve, hogy három csoport létezik [Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R., 2001], [Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002], [Horváth, I., 2002], [Hakkila, J., et al., 2003], [Hakkila, J., et al., 2004], [Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F. and Mészáros, A., 2006], [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007], [Horváth, I., et al., 2010], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012], [Koen, C. and Bere, A., 2012], [Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Takahashi, K. and Morihara, Y., 2013], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015], [Tarnopolski, M., 2016], [Arkhangelskaja, I. V., 2016].

Egyváltozós analízis helyett többen használtak többváltozós elemzést [Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002], [Hakkila, J., et al., 2004], [Borgonovo, L., 2004], [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007], [Horváth, I., et al., 2010], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012], [Koen, C. and Bere, A., 2012], [Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Takahashi, K. and Morihara, Y., 2013], [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014], [Yang, E.-B., Zhang, Z.-B., Choi, C.-S. and Chang, H.-Y., 2016]. Gammatartományban a BATSE-adatbázis elemzését 1998-ban végeztük el főkomponens analízissel [Bagoly, Z., Mészáros, A., Horváth, I., Balázs, L. G. and Mészáros, P., 1998]. Kilenc megfigyelt változót figyelembe véve kimutattuk, hogy kettő komponenssel leírható a megfigyelt adatok szerkezetének 92 százaléka. Az első főkomponens magyarázni tudja 65 százalékból a kilenc változót, míg a második főkomponens újabb 27 százalékot magyaráz. Az első két főkomponens összesen 92 százalékból magyaráz [Bagoly, Z., Mészáros, A., Horváth, I., Balázs, L. G. and Mészáros, P., 1998]. A harmadik főkomponensre, mely újabb 5 százalékból magyarázna, már nincs szükség a Jolliffe kritérium [Jolliffe, I. T., 1972], [Jolliffe, I. T., 1986], [Móri, F. T. and Székely, J. G., 1986] alapján (jelen esetben ez 7,8%). Az első főkomponens lényegében az időtartam volt.

A fentiekből két dolog is következik. Először, hogy célszerű egy változó vizsgálata mellett újabb változókat is használni, hogy a megfigyelt adatok szerkezetét jobban felderítsük. Másrészt egy jól megválasztott második változó esetén nincs szükség újabb változókra, hiszen két háttérváltozóval már jól jellemezhetjük a gammakitörésmegfigyeléseket.

Már a rövid és hosszú kitöréseket felfedező cikkben közölték Kouveliotou és társai [Kouveliotou, C., et al., 1993] a 7.1. ábrát, melyen az úgynevezett keménység eloszlását ábrázolták.



7.1. ábra. Kouveliotou et al. 1993 ábrája. Vízszintesen az időtartam, függőlegesen a kitörések spektrumára jellemző HR32 változó van ábrázolva.

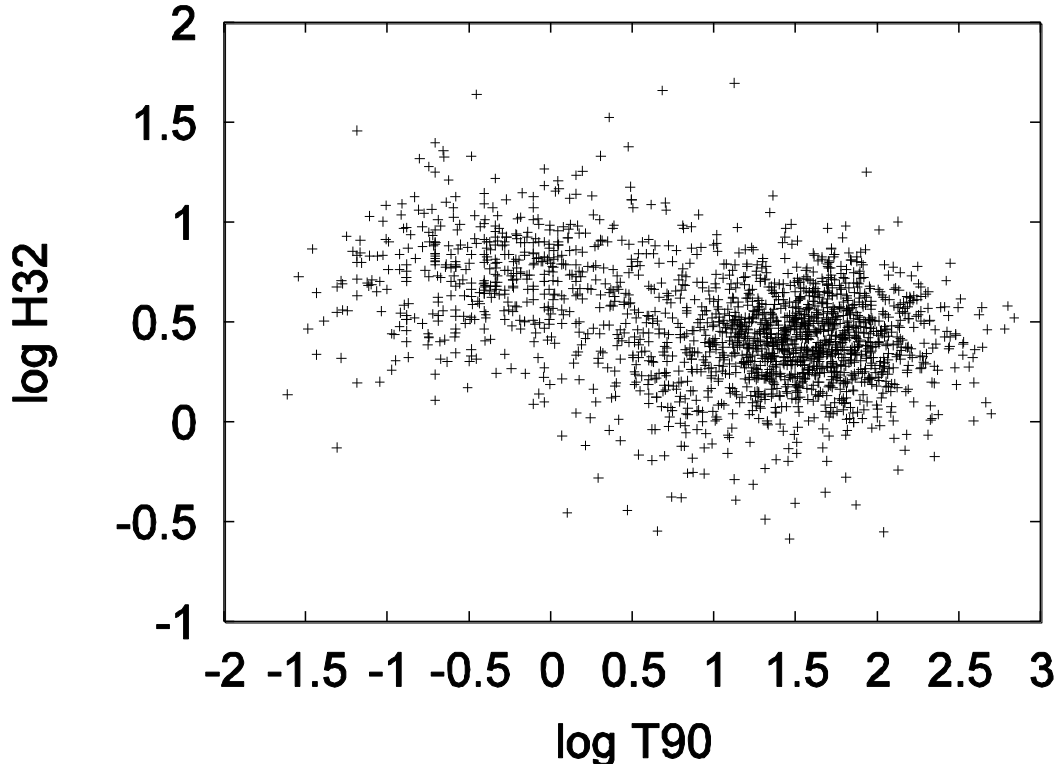
A BATSE műszer nyolc detektora négy energiacsatornába osztályozta a beérkező fotonokat. Ezek határai a következők:

1. csatorna 25 keV - 58 keV
2. csatorna 58 keV - 115 keV
3. csatorna 115 keV - 320 keV
4. csatorna 320 keV - 1 MeV [Meegan, C. A., et al., 1996]

Azon gammakitörések esetében, melyek alacsony energián sugároztak, lényegében csak az első csatornán mérték beütést. Ezeket a kitöréseket lágy kitöréseknek nevezzük. Azon kitörések, melyek keményebbek, azaz nagyobb energián is van lényeges kibocsátásuk, a magasabb energiacsatornákon is bocsátottak ki jelentős számban fotonokat. Egy tipikus gammakitörés legalább az első három csatornán produkált beütést, jellemzően a második csatornán a legtöbbet. A kemény kitörések relatíve több fotonbeütést okoztak a harmadik és negyedik csatornán, mint a kevésbé kemény gammakitörések.

A spektrális keménységet jól lehet jellemezni a két középső csatorna beütésszámainak a hányadosával. Az így definiált HR32 változó van ábrázolva a fenti 7.1. ábrán. A kitörések jelentős részének a spektruma hatványfüggvénnyel jellemezhető, ezekben az esetekben a keménységi hányados arányos az 5.1. fejezetben tárgyalt spektrális indexszel [Balázs, L. G., Horváth, I., Bagoly, Zs., Veres, P. and Szécsi, D., 2011].

Mint azt már a 6.3. fejezetben is említettem, a végleges BATSE katalógusban [Meegan, C. A., Pendleton, G. N. and Briggs, M. S.] 1956 olyan kitörés van, mely megtalálható mind az időtartam-, mind a fluxtáblázatban. A teljes adatbázist felhasználva nyerhető a 7.2. ábra, melyen az említett 1956 kitörés van ábrázolva az időtartam – keménység síkon. Ennek az adatbázisnak az értelmezésére, valamint az abból levonható következtetések levonására irányul a következő néhány fejezet.



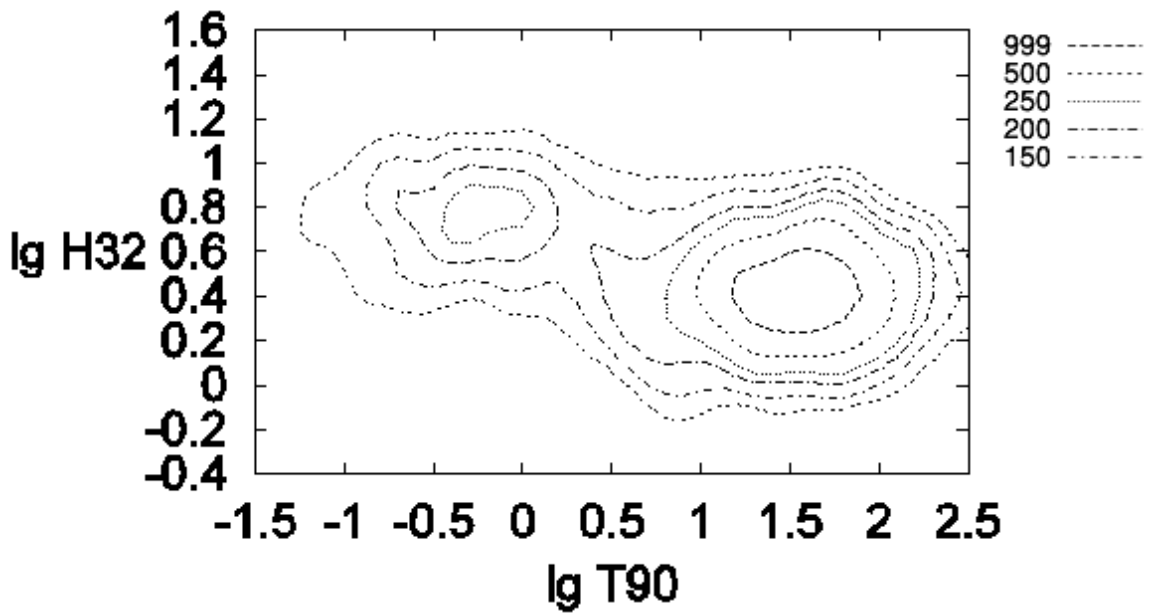
7.2. ábra. A BATSE által megfigyelt 1956 gammakitörés az időtartam – keménység síkon.

7.1. A végleges BATSE katalógus adatainak elemzése

Az időtartam változóra a 6.2. és 6.3. fejezetekben megmutattam, hogy a BATSE adatok sűrűségfüggvénye jól jellemezhető lognormális eloszlások összegével. Hasonló feltételezéssel élhetünk a keménység HR32 változó esetében. A 7.1.1. ábra a 7.2. ábra sűrűségfüggvényének szintvonalas ábrázolása. Az alakzat hasonlít két kétdimenziós Gauss-eloszlás összegéhez. E kétdimenziós eloszlást fogom a következőkben megvizsgálni.

A 6.3.1. fejezetben tárgyalt maximum likelihood módszert használva a megfigyelt 1956 kitörés adatait kétdimenziós Gauss-eloszlásokkal illeszttem, k az illesztett eloszlások száma. A kiszámolandó likelihood-függvény alakja

$$L = \sum_{i=1}^N \ln \left(\sum_{l=1}^k w_l f_l(x_i, y_i) \right) \quad (7.1.1)$$



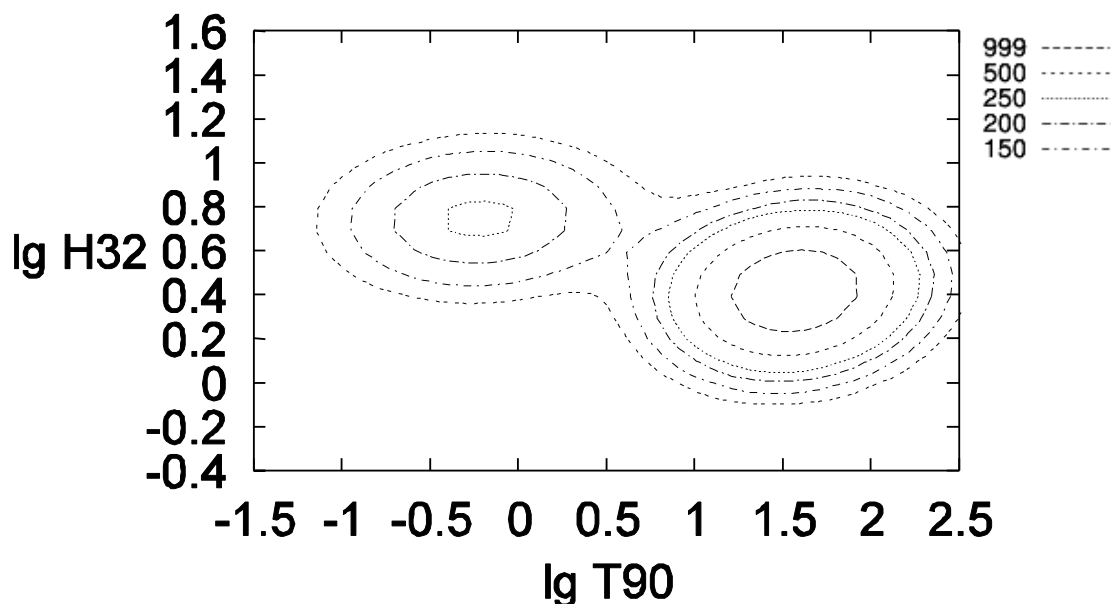
7.1.1. ábra. A 7.2. ábra sűrűségfüggvényének szintvonalas ábrázolása.

Az f_l függvény esetünkben egy kétdimenziós Gauss-eloszlás, öt paraméterrel. f alakja

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-r^2}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{(x-a_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-a_y)^2}{\sigma_y^2} - \frac{2r(x-a_x)(y-a_y)}{\sigma_x\sigma_y}\right)\right) \quad (7.1.2)$$

Jelen elemzés esetén T_{90} az x , HR32 az y koordináta, a_x és a_y a középpértékek, a szigmák a szórások és az r pedig a korrelációs koefficiens. A 7.1.1 egyenletben szereplő w_l súlyok összege természetesen 1 kell, hogy legyen.

Két komponens esetén 11 független paramétert kell illeszteni: négy középpértéket, négy szórást, két korrelációs koefficienst, valamint a két súlyt, amikből csak az egyik független. A legjobb illesztést ábrázoltam a 7.1.2. ábrán.

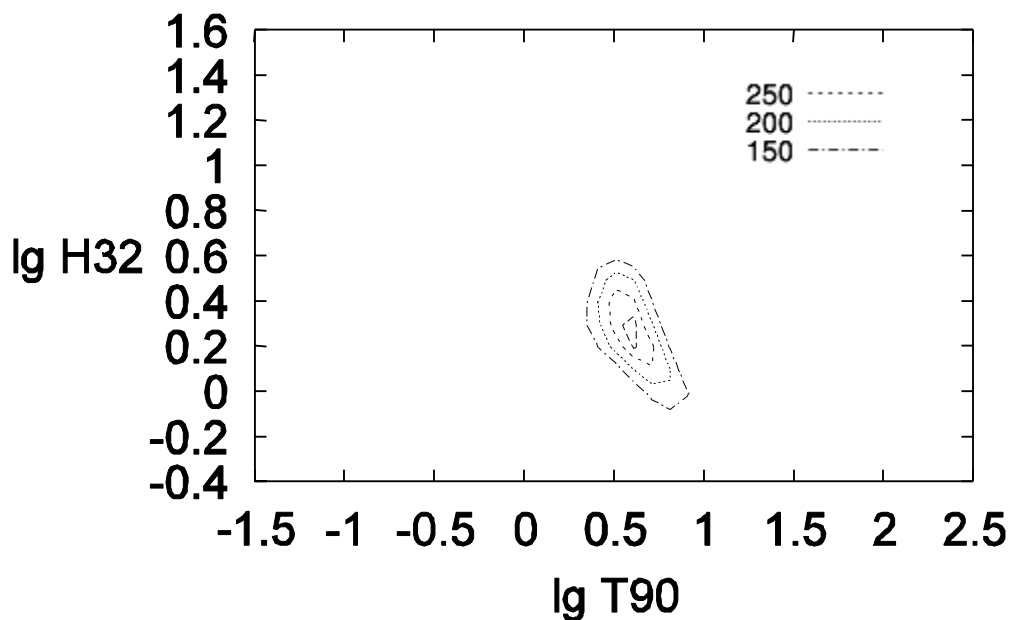


7.1.2. ábra. A kétkomponensű legjobb illesztés szintvonalas ábrázolása.

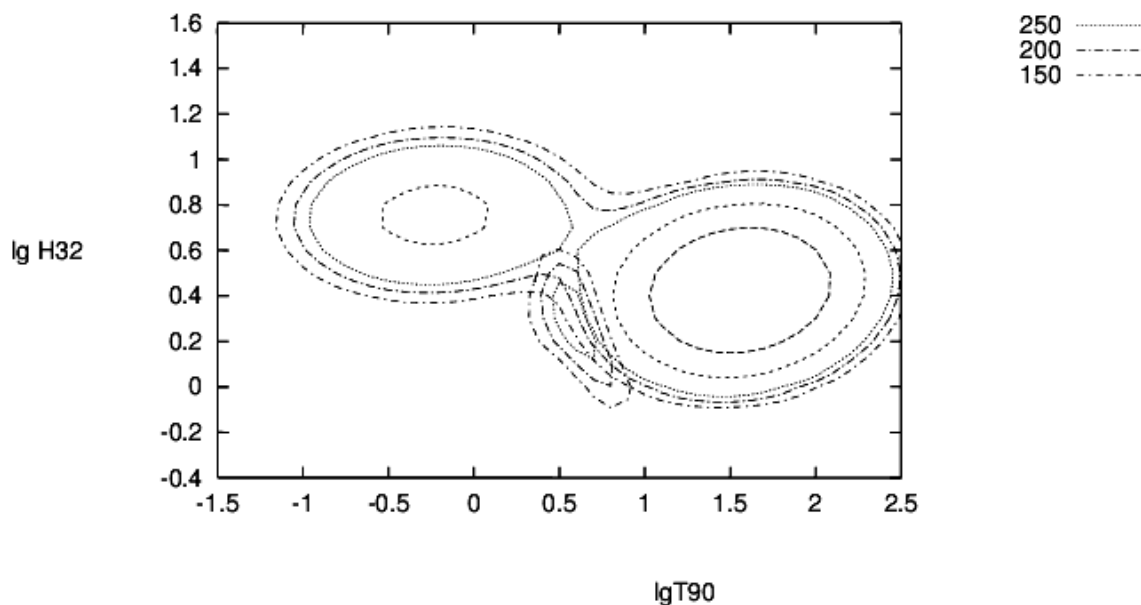
Megvizsgáltam, hogy mennyire tér el a megfigyelt eloszlás a kétkomponensű illesztéstől. A kettőt kivonva egymásból a különbséget szintvonalakkal ábrázoltam a 7.1.3. ábrán. Természetesen a különbségfüggvénynek mindenütt van értéke, de ez nagy részben véletlen ingadozás. Kérdés, hogy ezen ingadozások mellett, között található-e a fizikai valóságból származó rész. A legnagyobb érték felénél nagyobb értékeket mutatják a 7.1.3. ábra szintvonalai, melyek láthatóan egy adott területre koncentráálódtak. Segít a terület azonosításában a 7.1.4. ábra. Ezen az ábrán egyszerre ábrázoltam a 7.1.3. ábrán kiemelkedő területet, valamint a 7.1.2. ábrán mutatott kétkomponensű illesztést. Látható, hogy a hosszú kitörések középvértékeinél, ahol a mért (és az elméleti) eloszlás a legsűrűbb, nincs nagyobb eltérés a mért és az illesztett adatok között, pedig ott várható a legnagyobb fluktuáció. Ehelyett a legnagyobb eltérés a hosszú kitörések centrumától elkülönülten jelentkezik.

7.1.1 táblázat. Két komponens esetén a csoport paraméterek.

l	w_l	a_x	a_y	σ_x	σ_y	r
1	0,28	-0,233	0,74	0,54	0,26	0,049
2	0,72	1,488	0,40	0,47	0,24	0,128



7.1.3. ábra. A megfigyelt adatok és a legjobb kétkomponensű illesztés különbsége.



7.1.4. ábra. A 7.1.2-3. ábrák egymásra rajzolt szintvonal rendszere.

Természetesen e tájékozódó jellegű ábrák elkészítése után elvégeztem a 7.1.1-7.1.2 képletek alapján a maximum likelihood elemzést.

Két komponens esetén a legjobb likelihood értéke 1193 volt. Az ezen illesztéshez tartozó paramétereket a 7.1.1 táblázat tartalmazza. A $k = 3$ esetben a legjobb likelihood érték 1237 volt. A három komponens illesztett paramétereit a 7.1.2 táblázat tartalmazza.

A $k = 3$ és a $k = 2$ esetben kapott maximális likelihoodok különbsége 44. A 6.4.1. egyenlet esetünkben az alábbi alakot ölti:

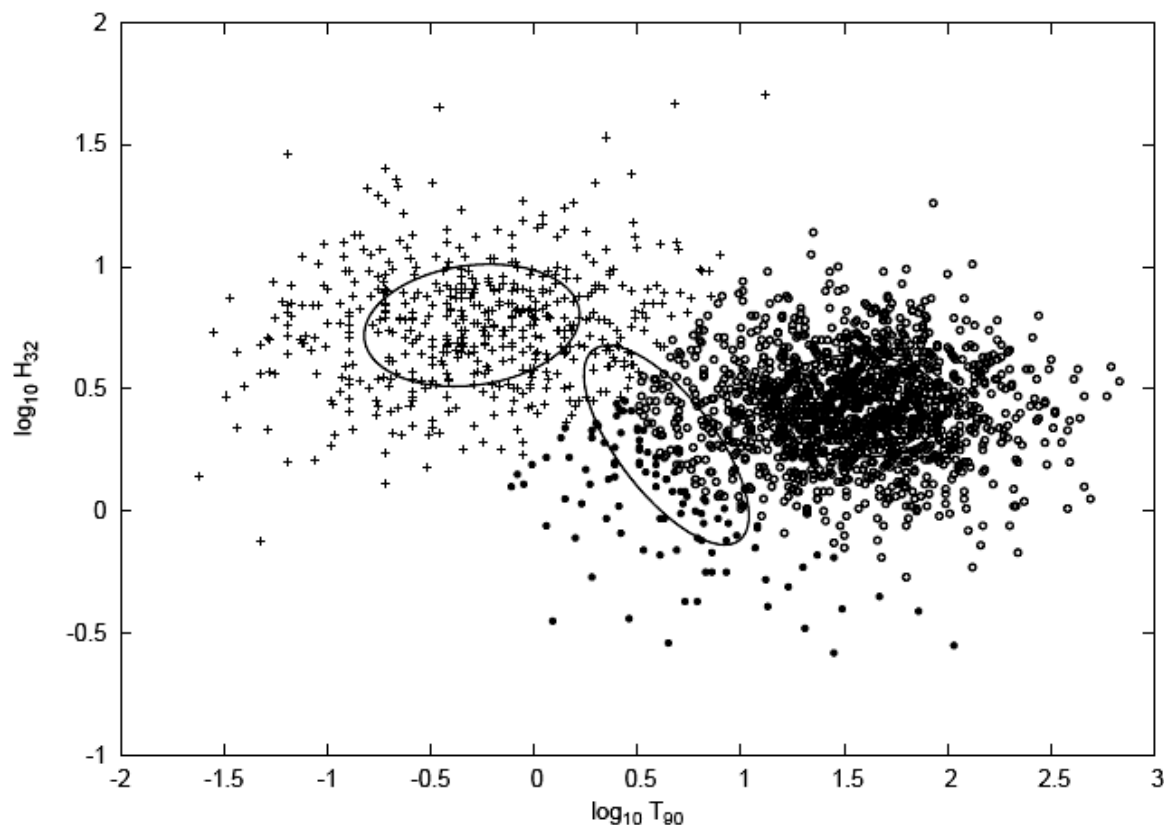
$$2(L_3 - L_2) = \chi_6^2 \quad (7.1.3)$$

hiszen a második illesztés esetén 6 új paramétert kellett illeszteni. Ez a különbség 44 a χ_6^2 -eloszlás esetén extrém kicsiny (kisebb, mint 10^{-10}) valószínűségnek felel meg. Emlekeztetnek arra, hogy egydimenziós illesztés esetén a BATSE estében (6.3. fejezet) a valószínűség a végső adatsor esetén 0,5% volt.

Abban az esetben amikor $k = 4$, a maximális likelihood 1243 volt, a javulás 6. A 7.1.3 képlet szerint ez 6,2%-os valószínűségnek felel meg. Ez nem kellően szignifikáns, tehát egy negyedik csoport létezését ez az elemzés nem támasztja alá.

7.1.2 táblázat. Három komponens esetén a csoport paraméterek.

l	w_l	a_x	a_y	σ_x	σ_y	r
1	0,245	-0,301	0,763	0,525	0,251	0,163
2	0,109	0,637	0,269	0,474	0,344	-0,513
3	0,646	1.565	0,427	0,416	0,210	-0,034



7.1.5. ábra. A három csoport (rövid +, hosszú o, közepes •) az időtartam – keménység síkon. Az ellipszisek az egy „szigma” ellipszisek.

A likelihood jelentős javulása három komponens esetén azt mutatja, hogy az adathalmazból nagy valószínűséggel következik egy harmadik csoport léte. Négy csoport esetén a likelihood nem javul szignifikánsan, tehát negyedik csoportot nem szükséges feltételezni (lásd még a 7.1.3 táblázatot). Az illesztett paramétereket tartalmazza a 7.1.2 táblázat, és az illesztett egy szigma-ellipsziseket mutatja a 7.1.5. ábra.

7.1.3 táblázat. A különböző csoportszámokkal (k) való illesztéseknél kapott likelihood maximumok, és az azokból számolt szignifikanciák.

k	$L_{k\max}$	$L_{k\max} - L_{(k-1)\max}$	szignifikancia
2	1193		
3	1237	44	$1 \cdot 10^{-10}$
4	1243	6	0,938

Felmerül a kérdés, hogy egy adott kitörés melyik csoportba tartozik az adott osztályozás szerint. Erre választ adhatunk az úgynevezett „fuzzy” klasszifikációval [McLachlan, G. J. and Basford, K. E., 1988], amely megadja a csoportba tartozás valószínűségét is. Ezen eljárás lényege, hogy adott paraméterekkel rendelkező kitörés esetén vesszük a paraméterértékeknél a feltételes valószínűséget, és a 7.1.4. képlet alapján kiszámoljuk az úgynevezett I indikátorfüggvény értékeit.

Az eljárás alapján az l -edik csoporthoz tartozás valószínűsége:

$$I_l(x, y) = \frac{w_l p(x, y | l)}{\sum_{l=1}^k w_l p(x, y | l)} \quad (7.1.4)$$

Jelen esetben $k = 3$, hiszen három csoportot találtam az elemzett adathalmazban. Tehát minden kitörés esetén megadható az I indikátor függvény, mely három értéke megadja az egyes csoporthoz tartozás valószínűségeit. Ezek közül a legnagyobb mondja meg, hogy melyik csoporthoz tartozás a legvalószínűbb. Ez alapján az összes kitörést osztályozni lehet. Ezen osztályozás szerint vannak a kitörések megkülönböztetve a 7.1.5. ábrán, rövid kitörés pluszjel, hosszú kitörés üres kör és közepes időtartamú kitörés tele kör.

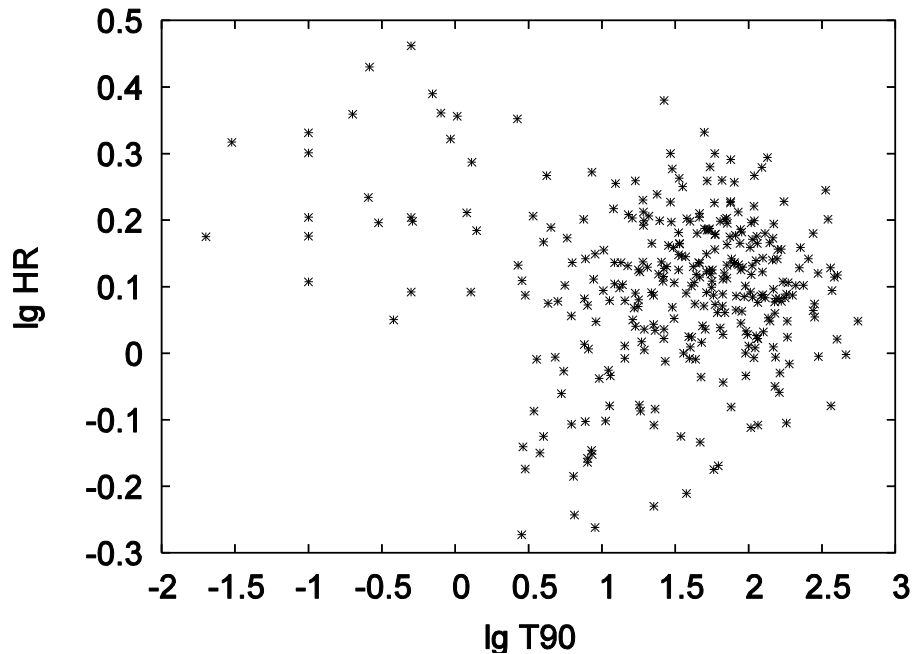
A 7.1.5. ábrán is látható, de a 7.1.2 táblázat negyedik oszlopából is kiolvasható a kitöréscsoportok közepes spektrális keménységének az értéke. Eddig is tudott volt, hogy a rövid kitörések keményebbek, mint a hosszúak [Kouveliotou, C., et al., 1993]. A fenti elemzéséből az is következik, hogy a közepes időtartamú gammakitörések még a hosszú kitöréseknél is lágyabbak, tehát ezek a kitörések a leglágyabb gammakitörések [Horváth, I., Mészáros, A., Balázs, L. G. and Bagoly, Z., 2004a], [Horváth, I., Mészáros, A., Balázs, L. G. and Bagoly, Z., 2004b], [Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F. and Mészáros, A., 2006], [Horváth, I., Ryde, F., Balázs, L. G., Bagoly, Z. and Mészáros, A., 2006].

A korrelációs koefficiensek értéke (7.1.2 táblázat utolsó oszlopa) a hosszú és rövid kitörések esetén lényegesen kisebb abszolút értékű, mint a közepes időtartamú

csoportnál, tehát e két csoport esetén az időtartam és a keménység között sokkal kisebb a lineáris kapcsolat, mint a közepes csoport esetében. A két adat (időtartam és spektrális keménység) a rövid és hosszú időtartamú csoporton belül lényegében független egymástól. A harmadik csoport esetében viszont ezektől eltérően antikorrelációt mutat az eredmény [Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F. and Mészáros, A., 2006].

7.2. A BAT katalógus időtartam – keménység adatainak elemzése

2008-ban tették közzé az első BAT katalógust [Sakamoto, T., et al., 2008]. Ebben 237 gammakitörés adatait közölték, amelyekből 222-nek volt időtartamadata. Az adathalmazt kiterjesztettük a Swift BAT első négy évének a megfigyelési adataira. Kollegám, Veres Péter a *batgrbproduct* szoftvert⁵ használva 103, a BAT katalógus után megfigyelt kitörés adatait számolta ki. A szoftvert ellenőrzésképpen futtatta a BAT katalógus adatain, és számolási hibán belüli egyezést kapott. Ezen 325 kitörés adatait használtam a következő kétdimenziós analízishez. Ezt a 325 kitörést mutatja a 7.2.1. ábra az időtartam – keménység síkon. [Horváth, I., et al., 2010]



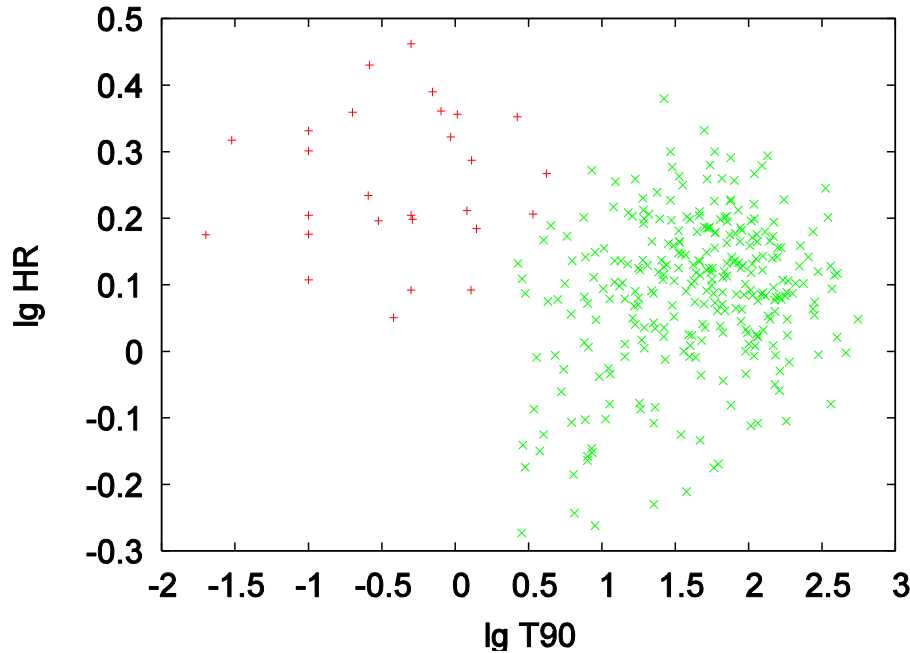
7.2.1. ábra. A Swift BAT által a működése első négy évében megfigyelt 325 gammakitörés logaritmikus skálán ábrázolva az időtartam (T_{90}) – keménység (H32) síkon.

⁵ A szoftver letölthető a <http://heasarc.nasa.gov/lheasoft/> címről.

7.2.1 táblázat. Két komponens esetén a csoport paraméterek. Hasonlóan a 7.1. fejezethez, T_{90} az x , HR32 az y koordináta, a_x és a_y ezek középértékei, a szigmák a szórásaik és az r pedig a korrelációs koefficiens.

l	w_l	a_x	a_y	σ_x	σ_y	r
1	0,082	-0,383	0,256	0,602	0,114	0,071
2	0,918	1,628	0,096	0,516	0,117	0,226

Hasonlóan a BATSE adatok elemzéséhez, a keménységet jelen esetben is a 3. és a 2. energiacsatorna megfigyeléseiből számoltam. A BAT katalógusban e két csatornára megadott fluenciaértékek hányadosa adja a kitörések spektrális keménységi hányadosát. A 7.1. fejezetben ismertetett módon a BAT adataira is elvégeztem az időtartam – keménység síkon a kétdimenziós illesztéseket a 7.1.1 és a 7.1.2 egyenleteknek megfelelően.



7.2.2. ábra. A rövid (piros) és hosszú (zöld) kitörések az időtartam (T_{90}) – keménység (HR32) síkon, ha két csoport létezését tételezem fel.

Két komponens esetén a likelihood maximális értéke 506,6 volt. Az illesztett paramétereket a 7.2.1 táblázat tartalmazza. $k = 3$ esetén a legjobb likelihood érték 531,4 volt. A három komponens illesztett paramétereit a 7.2.2 táblázatban tüntettem fel. [Horváth, I., et al., 2010]

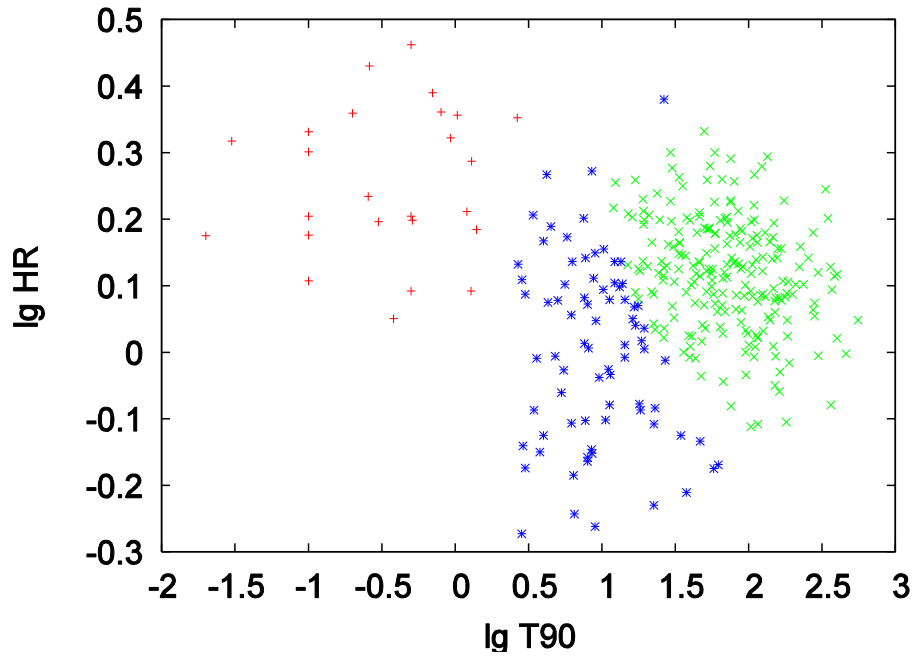
A $k = 3$ és a $k = 2$ esetén kapott maximális likelihoodok különbsége 25. A 7.1.3 egyenlet esetünkben is az alábbi alakot ölti:

$$2(L_3 - L_2) = \chi_6^2 \quad (7.2.1)$$

mivel a második illesztés esetén hat új paramétert is illesztettem. A kapott különbség 25, a χ_6^2 -eloszlás esetén nagyon kicsiny (kisebb mint 10^{-8}) valószínűségnek felel meg [Horváth, I., et al., 2010].

7.2.2 táblázat. Három komponens esetén a csoport paraméterek.

l	w_l	a_x	a_y	σ_x	σ_y	r
1	0,079	-0,426	0,259	0,576	0,114	0,120
2	0,296	1,076	0,025	0,376	0,129	-0,004
3	0,626	1.882	0,130	0,350	0,093	-0,237

**7.2.3. ábra.** A három csoport (rövid – piros, hosszú – zöld és közepes időtartamú – kék) az időtartam (T_{90}) – keménység (H32) síkon.

A maximális likelihood $k = 4$ estén 534,8 volt. A javulás 3,4, ami a 7.2.1 képlet szerint 34%-os valószínűségnek felel meg. Ez az eredmény nem kellően szignifikáns, tehát a negyedik csoport létezésére ebből az elemzésből nem tudok következtetni. Viszont a likelihood jelentős javulása három komponens esetén azt mutatja, hogy az adatokból következik egy harmadik csoport léte [Horváth, I., et al., 2010]. Az említett likelihood értékeket, különbségüket és a szignifikanciákat a 7.2.3 táblázatban külön is összefoglalom.

7.2.3 táblázat. A különböző csoportszámokkal (k) való illesztéseknél kapott likelihood maximumok, és az azokból számolt szignifikanciák.

k	L_{kmax}	$L_{kmax} - L_{(k-1)max}$	szignifikancia
2	506,6		
3	531,4	24,8	$1 \cdot 10^{-8}$
4	534,8	3,4	0,66

A 7.1. fejezetben már említett „fuzzy” klasszifikáció [McLachlan, G. J. and Basford, K. E., 1988] alapján, a BAT adatokra is elvégezhető a megfigyelt gammakitö-

rések csoportba sorolása. Abban az esetben amikor $k = 2$ a 7.2.2. ábra, $k = 3$ esetén pedig a 7.2.3. ábra mutatja a csoporttagok elhelyezkedését.

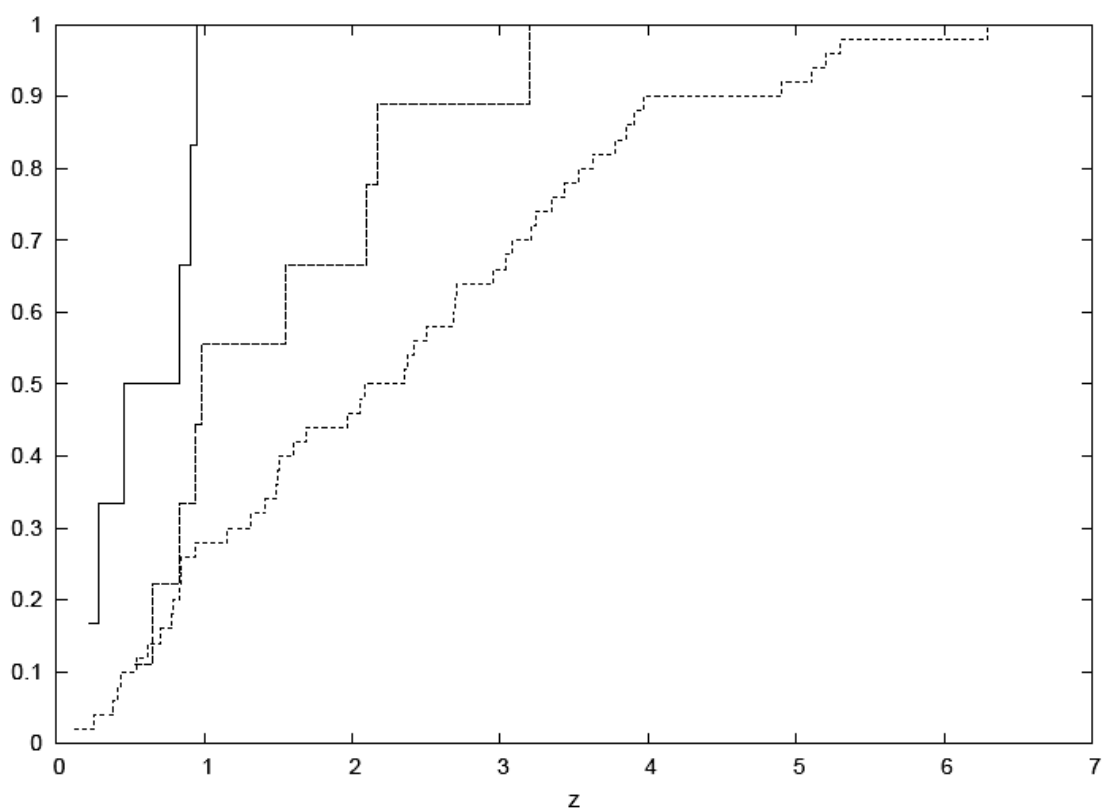
Mind az ábrák mind a táblázatok adatai mutatják, hogy a BAT adatokban talált csoportok lényegében megegyeznek a BATSE adatokban talált csoportokkal (lásd a 7.1. fejezet 7.1.2 táblázatát). A csoportok időtartamértékei egyszeres szóráson belül megegyeznek a két különböző műhold esetében. Például a rövid kitörések a BATSE esetén 0,15 – 1,67 másodperc hosszúak, a BAT esetén 0,10 – 1,41 másodperc időtartamértékekkel bírnak, mindkét esetben egyszeres szórással számolva.

Mind a BATSE, mind a BAT esetében a rövid kitörések keményebb spektrumúak, mint a hosszú kitörések, és mind a két esetben a közepes időtartamú csoport gammakitörései rendelkeztek a leglágyabb spektrummal.

A harmadik típus felfedezése [Mukherjee, S., et al., 1998], [Horváth, I., 1998] után több csoport is megerősítette, hogy a csoport statisztikusan kimutatható [Hakkila, J., et al., 2000], [Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R., 2001], [Horváth, I., 2002], [Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002], [Horváth, I., 2003], [Hakkila, J., et al., 2003], [Horváth, I., Mészáros, A., Balázs, L. G. and Bagoly, Z., 2004a], [Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F. and Mészáros, A., 2006], [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007], [Horváth, I., et al., 2008], [Horváth, I., Balázs, L. G. and Veres, P., 2009], [Ripa, J., et al., 2009], [Horváth, I., Veres, P. and Balázs, L. G., 2010], [Horváth, I., et al., 2010], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012], [Koen, C. and Bere, A., 2012], [Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Takahashi, K. and Morihara, Y., 2013], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015], [Tarnopolski, M., 2016], [Arkhangelskaja, I. V., 2016]. A 7.1. és 7.2. fejezetekben nagyobb szignifikanciával mutattam ki a harmadik típusú gammakitörések létezését. Dolgozatomban azonban csak a gammatartományban megfigyelt adatokat használtam fel a vizsgálatokhoz. Hasznos lenne az osztályozásnál figyelembe venni az elektromágneses spektrum más tartományából érkező sugárzást is. Két csoport munkája is ezen kérdések tisztázására irányul. Az egyik, egy olasz-spanyol-magyar együttműködés, melynek jómagam is résztvevője vagyok [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011], a másik, egy amerikai csoport, a kitörések utófényadatait is felhasználva próbálja a gammakitöréseket osztályozni [Zhang, B., 2007], [Gehrels, N., et al., 2008], [Zhang, B., et al., 2009], [Virgili, F. J., Zhang, B., O'Brien, P. and Troja, E., 2011], [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014].

7.3. A kitöréscsoportok fizikai jellemzői

A kétdimenziós osztályozás eredményét felhasználva megvizsgáltam a vöröseltolódás-adattal rendelkező kitörések távolságeloszlását [Horváth, I., et al., 2010]. A 7.1.4. képletben szereplő indikátorfüggvény alapján azon kitörések vöröseltolódását vettem figyelembe, melyek legalább 97% valószínűséggel az egyik csoportba tartoznak. Hat rövid, kilenc közepes, és 50 hosszú kitörés felelt meg ezen kritériumnak. A három csoport vöröseltolódás-eloszlásfüggvényét mutatja a 7.3.1. ábra.

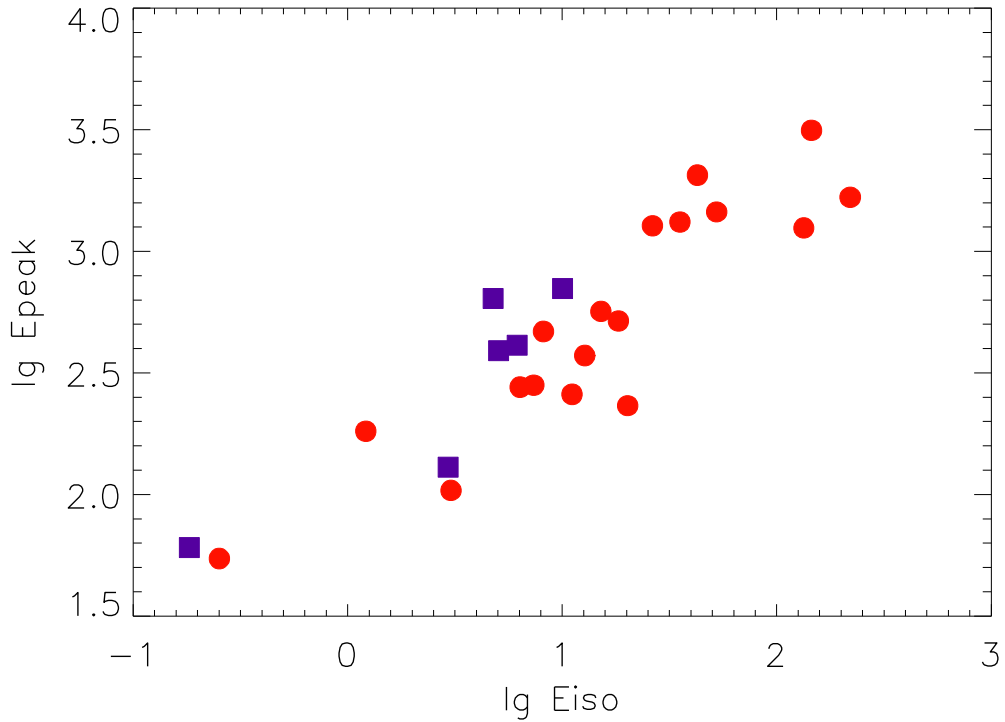


7.3.1. ábra. A rövid (folytonos vonal), a közepes (szaggatott vonal) és a hosszú (pontozott vonal) gammakitörések vöröseltolódás-eloszlása.

Eddig is ismert volt, hogy a rövid kitörések térben közelebb helyezkednek el hozzánk, mint a hosszú kitörések. A Kolmogorov–Szmirnov teszt szerint ezen adatokból a rövid és hosszú gammakitörések 99,4% szignifikanciára különböző távolságban helyezkednek el. A 7.3.1. ábra azt sugallja, hogy a közepes időtartamú kitörések térben is a rövid és hosszú kitörések között helyezkednek el. Több tesztet is elvégeztem (Kolmogorov–Szmirnov, Wilcoxon és Mann-Whitney), összehasonlítva a közepes kitörések eloszlását a másik kettővel, de sehol nem kaptam 95%-nál nagyobb szignifikanciát. Ennek oka feltehetőleg a kis (9) elemszám.

Az irodalomban közismert az úgynevezett Amati-reláció [Amati, L., et al., 2002], mely az E_{iso} és az E_{peak} mennyiségek között állapít meg összefüggést. Az E_{iso}

értékét a megfigyelések során detektált energiából számítjuk feltételezve, hogy az energia kisugárzása izotróp módon történik. Az E_{peak} pedig a spektrumban lévő törés helyét jelzi. E két mennyiség közötti relációt szemléltetem a 7.3.2. ábrán. A relációnak a rövid kitörések nem tesznek eleget. Ez arra utal, hogy a belső mechanizmusuk is más lehet, mint a hosszú kitöréseké. [Amati, L., et al., 2007]



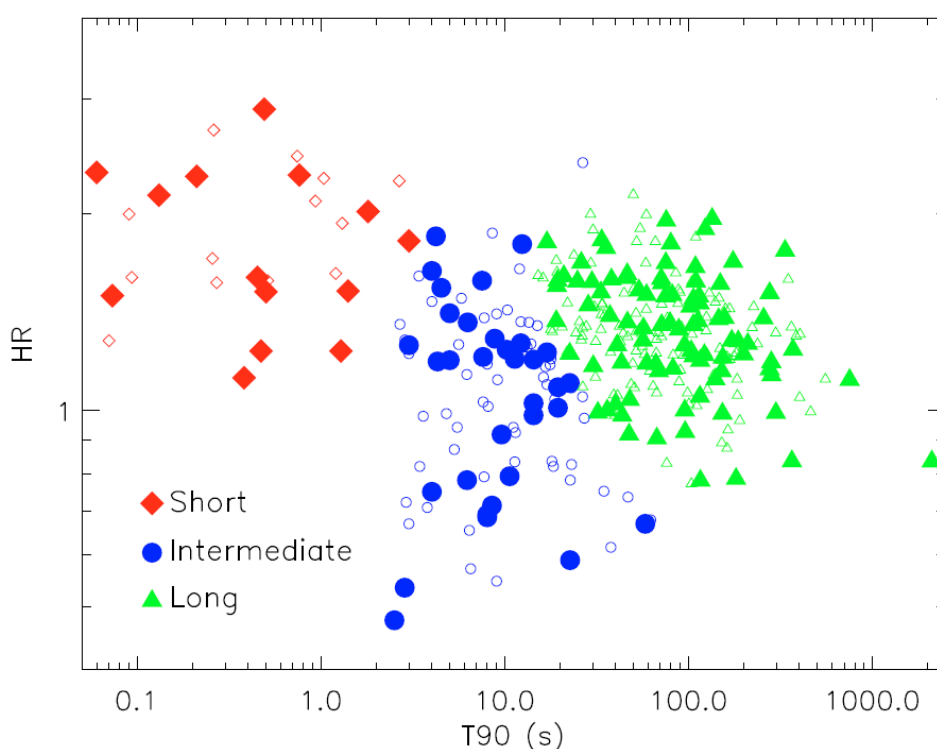
7.3.2. ábra. A közepes kitörések (kék négyzetek) a hosszú kitörések Amati-reláció diagrammján (E_{peak} -et keV-ben, E_{iso} -t 10^{52} erg/s-ben mérve).

Az a hat közepes időtartamú gammakitörés, amelyre Amatiék cikkében [Amati, L., et al., 2008] megtalálható az E_{iso} és az E_{peak} adat, illeszkedik a hosszú kitörések Amati relációjára [Horváth, I., et al., 2010]. E két utóbbi ábra alapján nem dönthető el a közepes kitörések hovatartozása, hiszen a vöröseltolódás-eloszlás azt sugallná, hogy a közepes kitörések különböznek a hosszú kitörésektől, míg az Amati-reláció ennek az ellenkezőjét mutatja. További megfigyelésekre van szükség, hogy statisztikailag kimutatható legyen, hogy a közepes kitörések közelebb vannak-e, mint a hosszú kitörések. Ha pedig közelebb vannak, akkor mi a magyarázata az Amati diagramnak? A közepes kitörések a hosszú kitörések egy alcsoportját alkotják-e, amelyek térben közelebb helyezkednek el, vagy a közepes gammakitörések a hosszú kitörésektől fizikailag is különböznek?

2011-ben az Antonio de Ugarte Postigo és általam vezetett magyar-spanyol-német-olasz-ír-izlandi-kínai csoport részletes cikket publikált a különböző gammakitörés-csoportok jellemzőiről [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011]. Az elemzésben a 7.2 fejezetben említett 325 darab, a Swift műhold által megfigyelt gammakitörést vizsgál-

tuk. A vizsgált adathalmaz megegyezett az általunk korábban elemzett adatsorral [Horváth, I., et al., 2010].

A már használt fuzzy osztályozással a 325 gammakitörésből 27 kitörés adódott rövidnek, 94 közepesnek és 204 hosszúnak (lásd a 7.3.3. ábrát). Az ábrán telített szimbólumokkal vannak jelölve a mért vöröseltolódással rendelkező gammakitörések. Mivel a fuzzy klasszifikáció csak valószínűségeket rendel a kitörésekhez (milyen valószínűséggel tagja egy kitörés valamely csoportnak), és én az elemzésnél a legnagyobb valószínűség által megjelölt csoportba rendelttem a kitörést, előfordulhat félreklasszifikálás. Csökkenthető a rosszul osztályozott gammakitörések száma, ha a legnagyobb valószínűsége (ami kedvezőtlen esetben esetleg csak 34%) magasabb szintet követel meg.

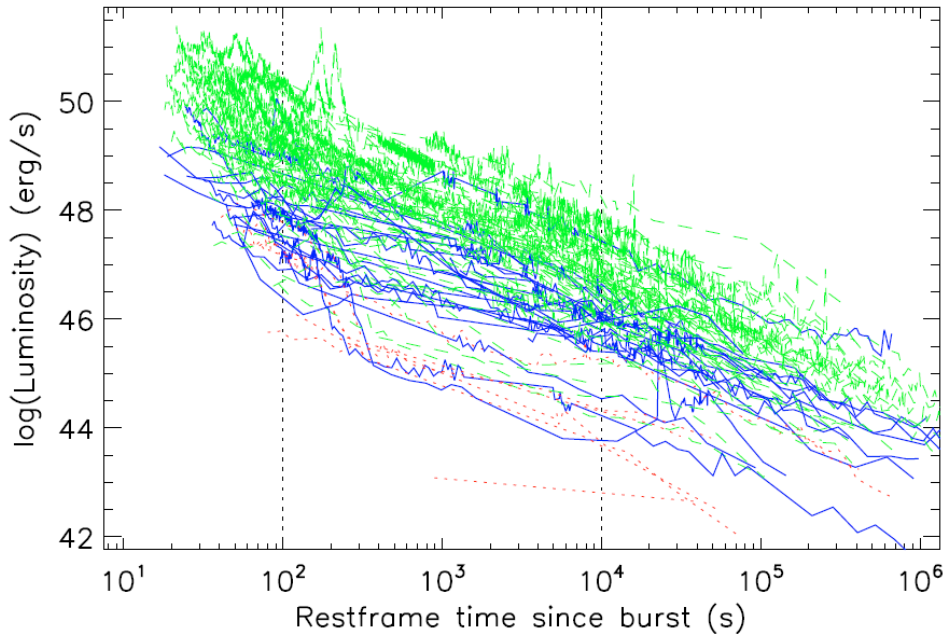


7.3.3. ábra. A három gammakitörés-csoport az időtartam – keménység síkon. Piros négyzettel a rövid kitörések, kék körrel a közepes időtartamú gammakitörések, míg zöld háromszöggel a hosszúak vannak ábrázolva. A telített síkidomok a mért vöröseltolódással rendelkező gammakitöréseket jelölik.

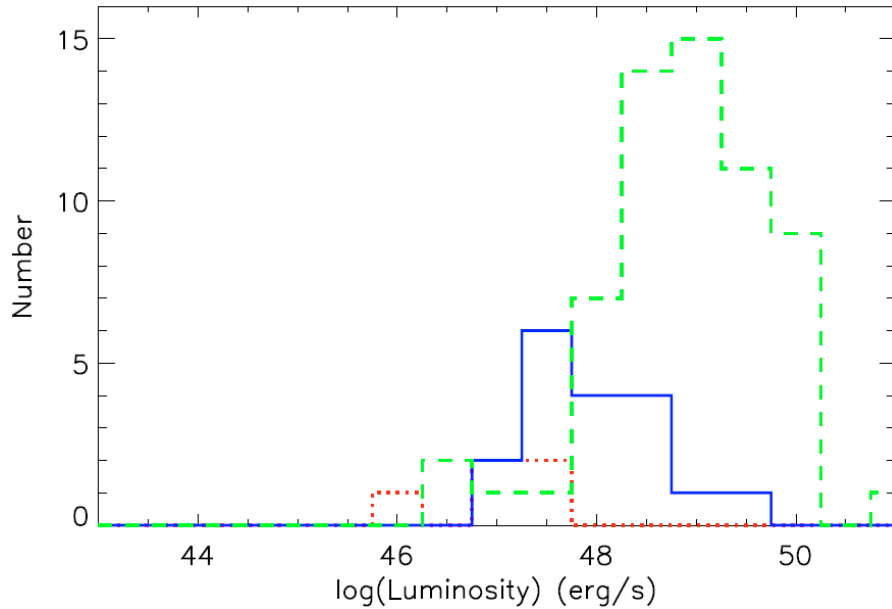
Ha ez a követelmény 68%, akkor 292 gammakitörést tudunk csoportba sorolni. Ezek közül 25 rövid, 77 közepesen hosszú és 190 hosszú gammakitörés. Ha legalább 90%-os szignifikancia a besorolás követelménye, akkor 219 klasszifikálható kitörésből 22 rövid, 49 közepes és 148 hosszú [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011]. A továbbiakban a 68%-os szintnek megfelelő 292 gammakitörést vizsgálom meg.

Az 5.1.10. ábrán bemutattam gammakitörések utófényeit a látható tartományban (a színkódok az eddigiek: piros-rövid, kék-közepes, zöld-hosszú). A röntgenutófények görbéi a 7.3.4. ábrán láthatók. A csoporttagok röntgentartományban mért luminozitásának vizsgálatánál lényeges eltérést találtunk [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011], [Veres, P., 2011]. Mérési eredmények állnak rendelkezésre a kitörés megfi-

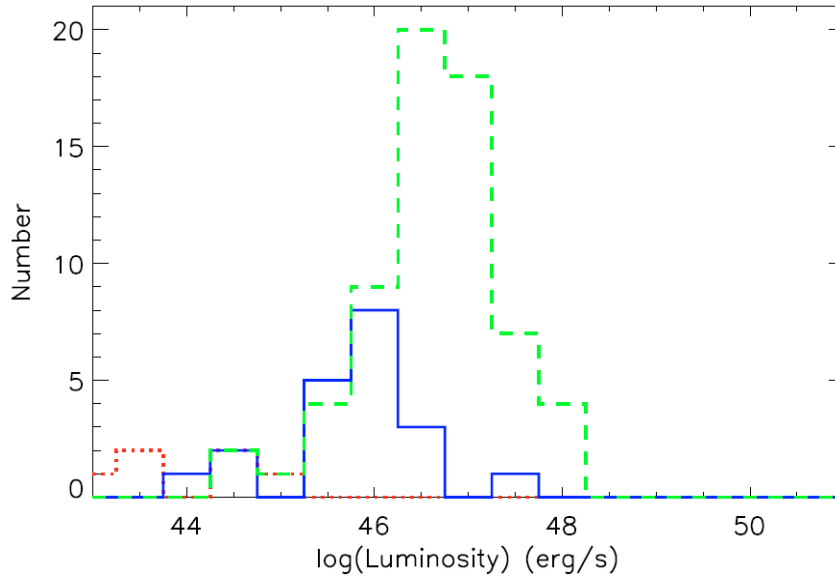
gyelése után 100 másodperccel mért röntgenfluxusra és a tízezer másodperc múlva mért röntgenfluxusra. Az ezekből számolt luminozitások eloszlását mutatja a 7.3.5. és 7.3.6. ábra.



7.3.4. ábra. A gammakitörések röntgenutófényei. A piros a rövid, a kék a közepes és a zöld szín a hosszú kitöréseket jelöli.



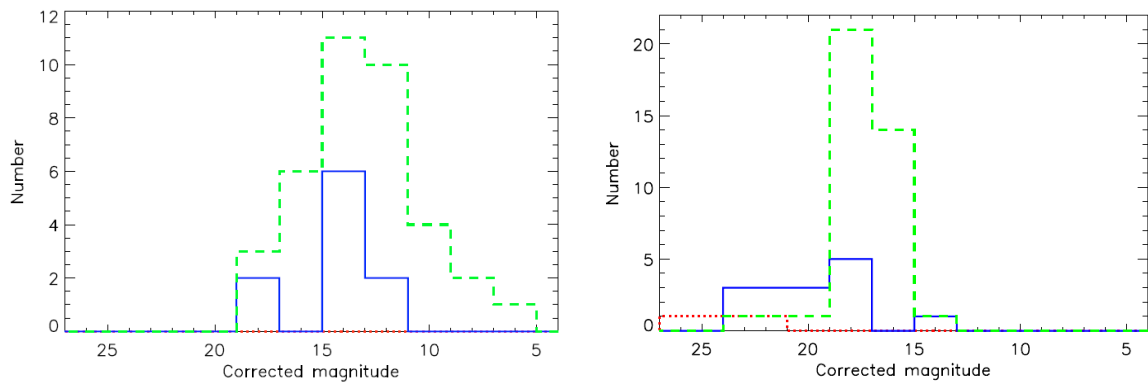
7.3.5. ábra. A hisztogram a gammakitörések regisztráció után 100 másodperccel mért röntgenluminozitásának az eloszlását mutatja. A piros a rövid, a kék a közepes és a zöld szín a hosszú csoportot jelöli.



7.3.6. ábra. A regisztráció után tízezer másodperccel mért röntgenluminozitás-eloszlások. A piros a rövid, a kék a közepes és a zöld szín a hosszú csoportot jelöli.

Megerősítve az addigi eredményeket [Gehlers, N., et al., 2008], [Nysewander, M., Fruchter, A. S. and Pe'er, A., 2009] a rövid kitörések röntgenutófényét találtuk a leghalványabbnak. A rövid kitörések röntgenluminozitásának a mediánja a századik másodpercben 47,0 (ez az erg/s-ban vett érték logaritmus), közepes kitörésekre ez 47,9. Mindkét esetben az egyszeres szórás 0,6. Hosszú gammakitörések esetén a röntgenluminozitás mediánja 49,1, ennek egyszeres szórása pedig 1,6. A hosszú kitörések értéke mind a két másik csoporttal összehasonlítva szignifikánsan eltér; a valószínűségek rendre 99,98% (rövidekkel hasonlítva), illetve 99,995% (közepesekkel hasonlítva). A közepes csoport értékét a rövid kitörések értékével hasonlítva az eltérés 98,4%-ra szignifikáns [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011], [Veres, P., 2011].

A tízezredik másodpercben mért röntgenluminozitás-értékeket összehasonlítva, mind a három esetben szignifikáns eltérést találtunk [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011], [Veres, P., 2011]. A valószínűségek megtalálhatóak a 7.3.1 táblázatban.



7.3.7. ábra. A bal oldali hisztogram a gammakitörések regisztráció után 100 másodperccel mért, a jobb oldali a gammakitörések tízezer másodperccel későbbi optikai luminozitásának-eloszlásait mutatja. A piros a rövid, a kék a közepes és a zöld szín a hosszú csoportot jelöli.

Az összehasonlító, elemző cikkünkben [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011] még további vizsgálatokat is végeztünk, például a 7.3.1 táblázatban is szereplő anyagaxisok összehasonlítását, melyben nem mutatkozott jelentős eltérés a különböző kitöréscsoportokra. Optikai utófények esetében is mértek luminozitást 100 másodperccel és tízezer másodperccel a kitörés kezdete után.

A Kann et al. [Kann, D. A., et al., 2010] és Kann et al. [Kann, D. A., et al., 2011] által kiszámított magnitúdókat használtam. Ezekben a cikkekben az adatok galaktikus elnyelésre és az anyagaxis elnyelésére is korrigáltak, illetve az összehasonlíthatóság végett $z = 1$ vöröseltolódásra számolták át a fényességet. Ezek eloszlását mutatom a 7.3.7. ábrán. Rövid kitörések esetén a kevés adat miatt nem lehetett összehasonlítást végezni, ezért csak a hosszú és közepes gammakitörésekre végeztem különbözőségvizsgálatot. A száz másodperces adatoknál 11% a valószínűsége, hogy különbözik a látható fényben mért luminozításeloszlás a két csoportra. A tízezer másodperces adatoknál ez a valószínűség 3,3%. Tehát 96,7% szignifikanciára különbözik a két csoport tízezer másodperces optikai fényességleoszlása.

Összefoglalva megállapítható, hogy a közepes időtartamú gammakitörések különböznek a rövid kitörésektől, de a hosszú kitörések és a közepes gammakitörések fizikai különbsége további vizsgálatot igényel. Az Antonio de Ugarte Postigo és általam vezetett csoportban végzett vizsgálatok szerint 11 elemzésből négy talált szignifikáns eltérést a közepes és hosszú gammakitörések jellemzői között, míg hét esetben nem találtunk szignifikáns eltérést. Ezen adatok nem elégségesek annak eldöntéséhez, hogy a két csoport valóban különbözik-e működési mechanizmusuk tekintetében. További vizsgálatokból, illetve a modellek részleteiből derülhet ki, hogy a központi motor, vagy esetleg a környezet különbözősége okozhatja az eredetileg esetleg hasonló gammakitörések különbözőségét.

7.3.1 táblázat. Néhány szignifikancia a de Ugarte Postigo és általam vezetett csoport által írt elemző cikkből [de Ugarte Postigo, A., et al., 2011]. Az erősen szignifikáns értékek vastagon szedve.

paraméter	rövid-hosszú	rövid-közepes	közepes-hosszú
vöröseltolódás	10^{-6}	0,15%	14%
100 s röntgen lum.	0,02%	1,6%	0,005%
10^4 s röntgen lum.	0,002%	0,08%	0,007%
időkésés	0,018%	0,009%	76%
100 s optikai lum.			11%
10^4 s optikai lum.			3,3%
anyagaxis	25%	75%	41%
E_{iso}	$10^{-6}\%$	0,5%	0,0006%

Szécsi et al. (2012) diszkriminancia analízissel összehasonlította a közepes és hosszú időtartamú csoportok gamma- és röntgenadatait. Az időbeli lefutás röntgenindexében és az egymásodperces csúcsfényességben nem találtak különbséget a két csoport adataiban (a szignifikancia 51 és 93% volt). Viszont a többi öt változóban szignifikáns eltérést mutattak ki. A szignifikancia négy esetben meghaladta a 99,9%-ot (foton index, röntgen spektrál index, korai röntgen fluxus és gamma fluencia), a hidrogén oszlopsűrűség esetén pedig 99,4% volt.

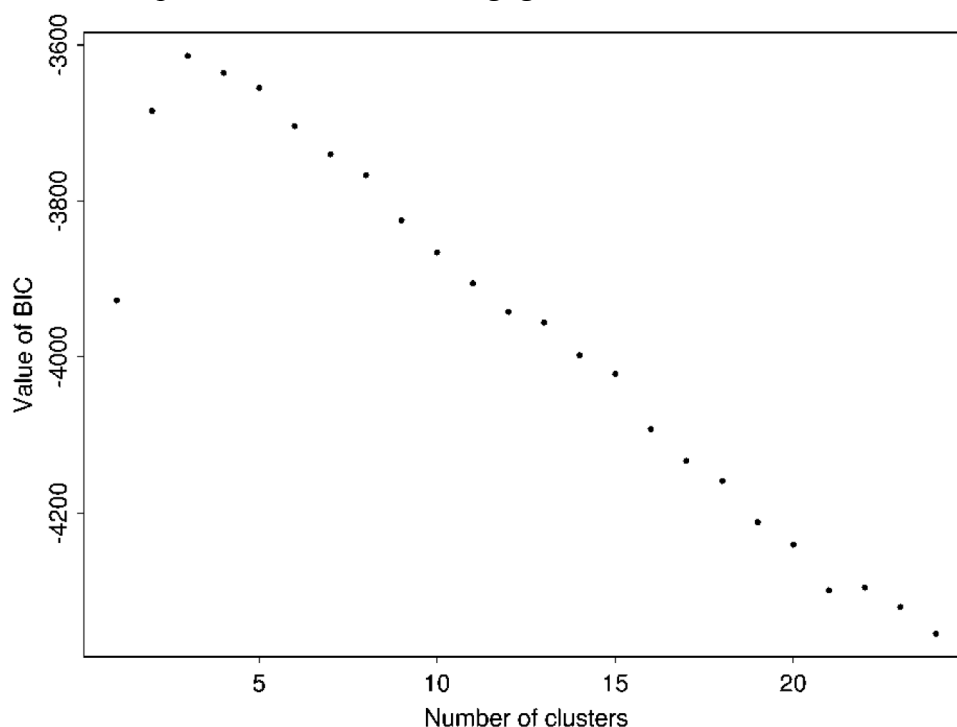
8. GAMMAKITÖRÉS-CSOPORTOK, IRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A gammakitörések eredetének és forrásmechanizmusának a feltárása máig sem teljesen megoldott feladat. Mióta több közeli gammakitörésnek és szupernóvának az azonos eredetét sikerült felismerni [Hjorth, J. and Bloom J. S., 2012], a kutatók jelentős része bizonyos abban, hogy egyes Ic típusú szupernóvák képesek gammakitörést is létrehozni. Probléma viszont, hogy nem minden Ic típusú szupernóva esetén figyeltek meg gammakitörést. Egyszerű magyarázat lenne, hogy csak bizonyos típusú Ic szupernóvák (kis fémtartalom, nagy forgási sebesség és esetleg más feltételek megléte esetén) képesek létrehozni gammakitörést. De ez az elképzelés sem helytálló, hiszen megfigyeltek nagyon közeli gammakitöréseket is, melyek helyén nem történt szupernóva robbanás [Qin, Y., et al., 2013], [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014]. A GRB 060614 kitörés vöröseltolódása 0,125, a GRB 060505 kitörés vöröseltolódása 0,089 volt. Egyik közelében sem figyeltek meg szupernóvát. Továbbá az eddig megfigyelt Ic típusú szupernóvák gammakitörés-párjai mind hosszú gammakitörések voltak, melyek így a rövid kitörések forrásainak mibenlétére nem adnak magyarázatot. Mi lehet a forrása a rövid kitöréseknek? Vannak-e más fizikai folyamatok, melyek rövid idejű gammafelvillanást tudnak produkálni?

Ezen kérdések megválaszolását nagymértékben segítheti ha tudjuk, hogy a megfigyelt gammakitörések jellemzői alapján hány típus különíthető el. Ezeknek a különböző típusú kitöréseknek lehet-e hasonló a forrása, vagy más fizikai mechanizmus felelős értük? A műholdak által megfigyelt gammakitörések osztályozása tehát egy fontos feladat. A gammakitörések gammafénygörbéje igen változatos, mint azt jelen dolgozat több ábráján is már bemutattam (3.4.2., 5.1.8., 6.1.1. és 6.1.6. ábrák). A különböző jellemzőikben és ezek eloszlásában nincsenek jól elkülönülő csoportok. Ez alól kivétel az időtartam, melyre Mazets és társai [Mazets, E. P., et al., 1981], valamint Norris és társai [Norris, J. P., Cline, T. L., Desai, U. D. and Teegarden, B. J., 1984] mutattak rá először. Csoportosulás van az 1-2 másodperces és az ennél lényegesen hosszabb (kb. 10-100 s) kitöréseknél. Az irodalom ezeket nevezi rövid illetve hosszú kitörésnek. Bár többen is rámutattak (például [Zhang, B., et al., 2009]), hogy a 2 másodperces határ használata nem helyes, mégis kiterjedten használják a 2 másodpercnél rövidebb kitörésekre a rövid, a 2 másodpercnél hosszabb kitörésekre a hosszú gammakitörés elnevezést. A 90-es években publikált időtartameloszlások azonban nem bimodálisak, hanem trimodálisak voltak. Erre a tényre 1998-ban mutattam rá [Horváth, I., 1998]. Ebben a cikkemben a 6.2. fejezetben bemutatott módon írtam meg, hogy van egy közepes időtartamú csoport.

Az *Astrophysical Journal* folyóiratban, a fent említett cikkemmel azonos kötetben jelent meg Mukherjee és társai munkája [Mukherjee, S., et al., 1998]. Mukherjee csoportja a BATSE 3B katalógus ugyanazon 797 gammakitörésének az adatait használták, mint az én publikációm. A többváltozós adatelemzés akkori korlátai miatt az adatbázis hat változóját használták az elemzéshez. Ezek a T_{50} , T_{90} , teljes fluencia, csúcshányados és a H32 és H321 keménységi hányadosok. Ezek definícióját a 6.1. fejezetben megadtam, kivéve a H32 keménységi hányadost, melyet a 7. fejezet elején definiáltam. A H321 változó a BATSE detektorok 3. csatornás beütésszámának aránya az

első két csatorna összefotonszámához képest. Hasonlóan az általam a 7. fejezetben bemutatott vizsgálatokhoz, az elemzésnél Mukherjee-ék csoportja az összes változó logaritmusát használta. Cikkükben megállapítják, hogy a két időtartam és a két keménységi hányados között fennálló korreláció miatt ezek lényegében csak egy független változót jelentenek. Idézik a magyar gammakitörés-csoport egyik első cikkét [Bagoly, Z., Mészáros, A., Horváth, I., Balázs, L. G. and Mészáros, P., 1998], melyben megállapítjuk, hogy két vagy három változó elegendő a kitörések azonnali gammafénylésének a leírására. Ennek ellenére Mukherjee-ék csoportja az említett hat változóval végzi számításait. Két módszerrel is elvégezték a gammakitörések csoportosítását (Nonparametric hierarchical cluster analysis és Model-based maximum likelihood clustering). Egy elkülönülő kitöréstől eltekintve mindkét módszer három csoportot azonosított. Az általuk azonosított csoportok időtartameloszlását már bemutattam a 6.2.7. ábrán. Az eredményük hasonló a már említett cikkemben [Horváth, I., 1998] kapott eredményhez, a rövid kitörések többsége 2 másodpercnél rövidebb, a hosszú kitörések többsége 10 másodpercnél hosszabb, míg a köztes intervallumban helyezkedik el egy közepes időtartamú csoport. A hierarchikus csoportosításnál, egytől több mint húsz csoportba való besorolásnál kiszámolták a Bayesi Információs Értéket (Bayesian Information Criterion, BIC, [Schwarz, G., 1978]), mely értékeket itt is bemutatom a 8.1. ábrán. A tíznél nagyobb eltérés a BIC értékben erős evidenciát mutat. Mivel a három csoporthoz tartozó érték 68-cal haladja meg a két csoporthoz tartozó értéket, ezért kijelentik, hogy egy harmadik gammakitörés-csoport létezése statisztikailag igazolt.



8.1. ábra. Mukherjee et al. 1998 által számított BIC értékek. A három csoporthoz tartozó érték lényegesen nagyobb, mint a négyhez, illetve a kettőhöz tartozó.

E két cikket követően több publikáció jelent meg a témában. A harmadik csoport statisztikusan igazolt létét nem kérdőjelezték meg, azonban a fizikai létezése vitatott. Hakkila és társai [Hakkila, J., et al., 2000], valamint Rajaniemi és Mahönen

[Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002] műszereffektussal próbálták magyarázni a harmadik csoport létét.

2001-ben spanyol kutatók [Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R., 2001] a BATSE műszer aktualizált katalógusának [Paciesas, W. S., et al., 1999], [Meegan, C. A., Pendleton, G. N. and Briggs, M. S.] kilenc változóját használták elemzésükhöz. Végeztek a MIDAS statisztikai csomaggal klasztervizsgálatot, valamint mesterséges intelligenciás neural network elemzést. Elemzéseik csak részben támasztották alá az előző vizsgálatokat. Három csoportot találtak ugyan, de például szinte minden négy másodpercnél rövidebb kitörést rövid gammakitörésnek klasszifikáltak. Ez teljesen szokatlan az irodalomban. A közepes kitöréseket 25 másodperc körülinek találták.

Egy indiai csoport 2007-ben a végleges BATSE katalógus adatait elemezte [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007] két módszerrel is, K-means klasszifikációval és Dirichlet Process Model Based klasszifikációval. A rövid és hosszú kitörések mellett a 15 másodperc körüli kitöréseket találták különálló csoportnak.

Az irodalmi ismertetésben természetesen a magyar csoport eredményeit is meg kell említeni. 2002-ben a végleges BATSE katalógus időtartamadatait elemeztem [Horváth, I., 2002] a 6.3. fejezetben bemutatott módon. Ezen elemzésben a közepes csoport időtartama 3-10 másodpercnél adódott. 2006-ban vezetésemmel a magyar csoportban a 7.1. fejezetben bemutatott módon két változó felhasználásával végeztünk csoportosítást szintén a végleges BATSE katalógus adatait használva. Szignifikáns módon megerősítettük az általam előzőleg publikált eredményeket.

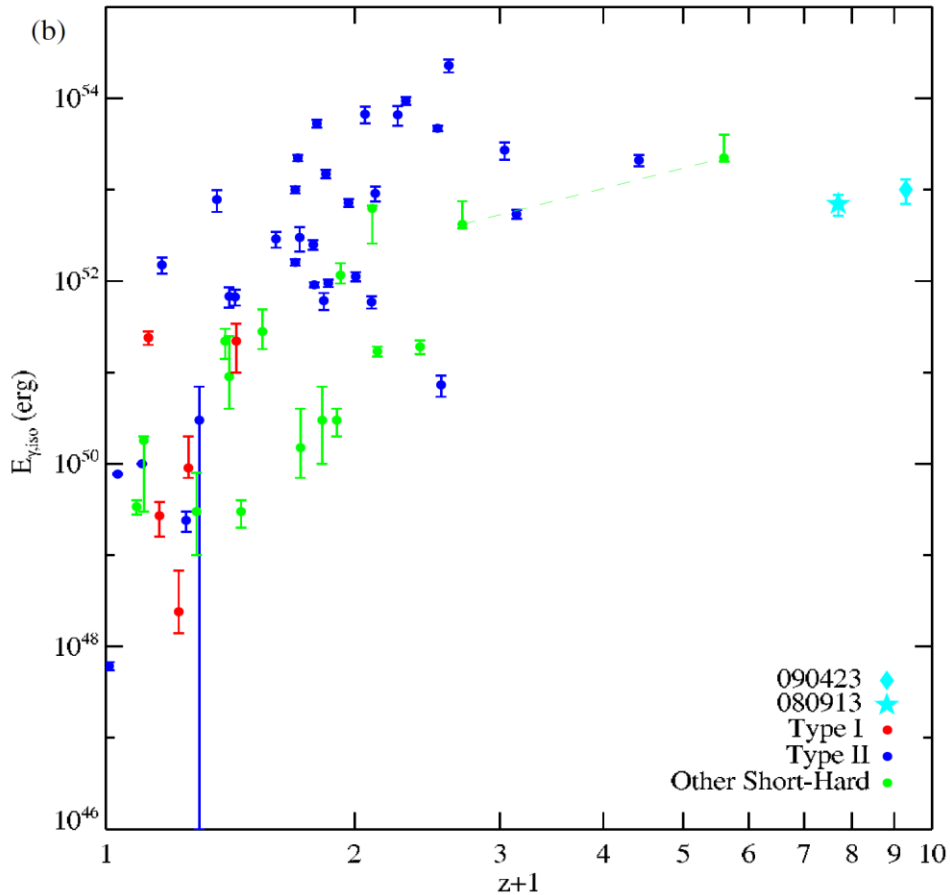
A Swift műhold adatait használva 2008-ban [Horváth, I., et al., 2008] (6.4. fejezet), majd a Beppo-SAX műhold végleges katalógusának adatait használva 2009-ben (6.5. fejezet) mutattam meg [Horváth, I., 2009] három gammakitörés-csoport létezését a megfigyelt adatokban.

Egy cseh csoport a RHESSI műhold adatait elemezte [Ripa, J., et al., 2009], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012]. A RHESSI műhold a nevéből (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) adódóan a Nap megfigyelésére készült [Lin, R. P., et al., 2002]. Nincs önálló gamma-riasztórendszere, így csak utólag lehet a már más műholdak által megfigyelt gammakitöréseket az adatokban vizsgakeresni. Ezért elhibázottnak tartom a RHESSI adatbázis elemzését. További gond a kitörések viszonylag kis száma (alig több mint 400). Statisztikai elemzéseknél fontos a homogén minta és a minél nagyobb elemszám. A CGRO több ezer gammakitörést rögzített, a BeppoSax is több mint ezret. A jelenleg is működő Fermi és Swift műholdak is elérték már az ezres elemszámot. Ezért komoly statisztikus elemzésre csak e műholdak adatai alkalmasak. Hasonló okból nem elemeztem a HETE-2 műhold adatait. A műhold jelenleg is földkörüli pályán van, de 2006 óta nem triggerel gammakitöréseket, mert a NiCd akkumulátorai teljesen elhasználódtak. A HETE-2 összesen 250 kitörést figyelt meg (ebből csak 118-ra volt lokalizáció) [Pélangeon, A., et al., 2008].

A legtöbb elemzés esetén a kitörések időtartama és az ahhoz szorosan kapcsolódó paraméterek voltak a csoportok megkülönböztetésében a meghatározóak. Zhang és társai [Zhang, B., et al., 2009] 2009-ben javasolták az azonnali gamma megfigyeléseken kívüli más jellemzők vizsgálatokba való bevonását is: a hagyományos időtartam, keménységi hányadoson kívül még azokat, melyek valószínűleg a fizikai jellemzőkkel szorosabb kapcsolatban vannak. A bevonni javasolt jellemzők többek között a szupernóva kapcsolat, távolság a szülőgalaxis középpontjától, kibocsájtott összenergia, az utófény további jellemzői, valamint, hogy az anyaggalaxis milyen csillagkeletkezési régiójában volt a kitörés. Ezek alapján I. és II. jelzésű osztályba sorolták a kitöréseket (lásd például a 8.2. ábrát). Az I. osztályú kitörésekre, melyek lényegében azonosak a

rövid kitörésekkel, egy öt kitörésből álló aranymintát állítottak össze a későbbi elemzésekhez. Az elgondolást jónak tartom, de sajnos más kutatók nem alkalmazzák a Zhangék által javasolt módszert.

Zhang és Choi [Zhang, Z-B. and Choi, C-S., 2008] vizsgálta a kitörések időtartameloszlását. Azt találták, hogy a Swift műhold előtti (így természetesen beleértve a BATSE által megfigyelteteket is) hosszú kitörések időtartameloszlása különbözik a Swift műhold által megfigyelt hosszú kitörések időtartameloszlásától. A Swift által megfigyelt hosszú kitörések időtartameloszlása szélesebb, azaz nagyobb dinamikai skálát ölel át.

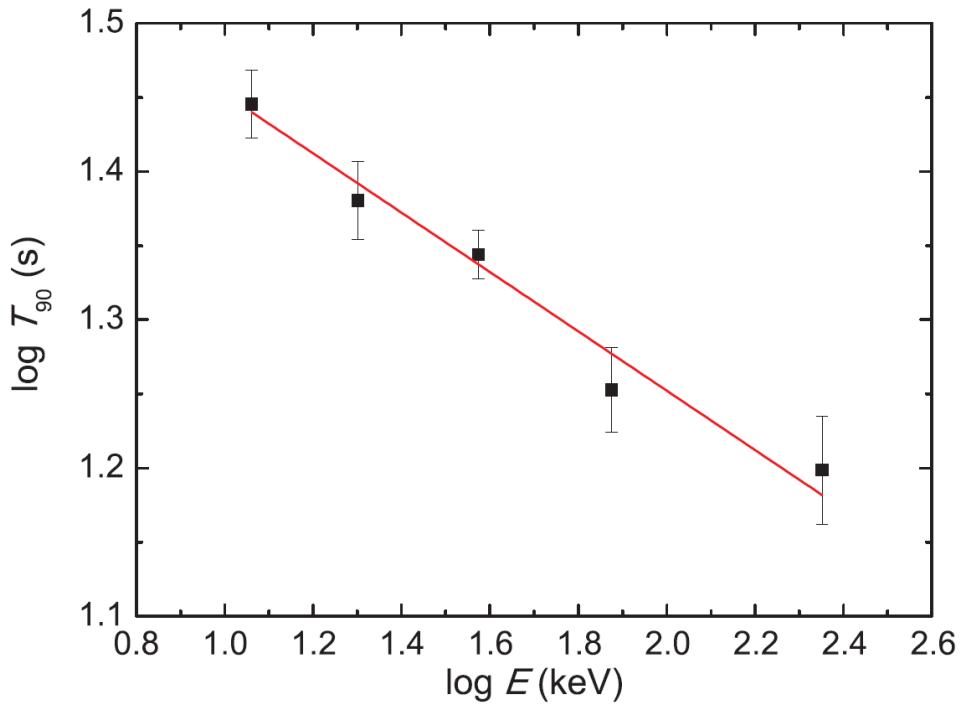


8.2. ábra. Zhang et al. 2009 által bevezetett I. osztály (piros) és II. osztály (kék) a vöröseltolódás – kibocsájtott energia síkon.

Koen és Bere [Koen, C. and Bere, A., 2012] osztályozásuknál az autokorrelációs függvényt és az időtartam – keménység síkot használta. Kétváltozós elemzésük eredménye alapján a Swift műhold által megfigyelt 325 gammakitörés három csoportot alkot. A marginálisok eloszlására azt találták, hogy a $\log T_{90}$ eloszlásnál a likelihood jelentősen javul egy harmadik komponens esetén, míg a keménység (logaritmus) eloszlása esetén nem. A keménységeloszlás jellemzéséhez elegendő két Gauss-komponens.

Qin és társai [Qin, Y., et al., 2013] a Fermi műhold 315 gammakitörés adatát elemezték. Bayesi blokkok alkalmazásával határozták meg a kitörések időtartamát a különböző energiatartományokban. A hat különböző energiacsatornából a két legalacsonyabb energiás (8-15 keV és 15-25 keV) csatornában nem volt szignifikáns a

kétkomponens-illesztés. Tehát még a rövid és hosszú kitöréscsoportokat sem lehetett elkülöníteni e két energiatartományban. A többi tartományban szignifikáns volt a kétkomponens-illesztés. A teljes energiatartományban azt találták, hogy a rövid és a hosszú kitörések aránya 1:6,5, mely lényegesen eltér a BATSE által megfigyelt 1:3 aránytól. Ez magyarázatra szorul, hiszen a BATSE és a GBM detektorok nagyon hasonló energiaérzékenységek. Két következtetést vonnak le: egyrészt, hogy a kitörések időtartama függ a vizsgált energiatartománytól (lásd a 8.3. ábrát), másrészt, hogy a kétkomponensű eloszlás csak bizonyos energiákon érvényes. Azt gondolják, hogy mind a rövid, mind a hosszú kitörések időtartama lényegesen hosszabb lehet, és a megfigyelt kétkomponensű eloszlás esetleg csak egy szelekciós műszereffektus. Ez utóbbi megállapítást a magam részéről nehezen tudom elképzelni.



8.3. ábra. Qin et al. 2013 ábrája az időtartam energia függéséről.

Tsutsui és társai [Tsutsui, R., et al., 2009] három, az azonnali gammában megfigyelt paraméter (spektrális csúcsenergia E_{peak} , luminozitás idő T_L és luminozitás csúcs L_{peak}) közötti korrelációt kihasználva egy fundamentális síkot definiáltak. Későbbi munkájukban [Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Takahashi, K. and Morihara, Y., 2013] ezt a síkot felhasználva csoportosítják a hosszú kitöréseket. Az általuk definiált ADCL (absolute deviation from constant luminosity) változóban bimodális eloszlást tapasztalnak. Az összefoglalóban megállapítják, hogy a nagyjából 5 másodperc hosszúságú csoport megfelel a [Horváth, I., 1998] cikkben publikált közepes időtartamú csoportnak. Tsutsui és Shigeyama [Tsutsui, R. and Shigeyama, T., 2014] tovább folytatja ezeket a vizsgálatokat és megállapítják, hogy nem csak az azonnali adatok, hanem a röntgen és az optikai utófényadatok alapján is három csoportba sorolhatók a gammakitörések.

Lü és társai [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014] egy amplitúdó paraméter nevű mennyiséget vezetnek be a kitörések erősségének a jellemzésére, ami az egy másodperces csúcsfényesség viszonya a háttérhez. To-

vábbi csoportosítást nem végeznek, hanem a rövid és hosszú kitörések viszonyaival foglalkoztak. Megvizsgálják többek között azt a régi elképzelést, hogy lehetnek-e a rövid kitörések olyan halvány hosszú kitörések, melyeknek csak a legnagyobb csúcsát tudjuk megfigyelni. Ilyen esetek nem zárhatók ki, de megállapítják, hogy a legtöbb rövid kitörésre ez nem igaz.

8.1 táblázat. Zitouni és társai (2015) által közölt táblázat, melyben a BATSE kitörések csoportosításánál kapott eredményeiket hasonlítják össze az általam közölt eredményekkel [Horváth, I., 2002].

átlagos időtartam	Zitouni et al. 2015	Horváth 2002
2 csoport, rövid	0,99 mp	0,78 mp
2 csoport, hosszú	33,11 mp	34,67 mp
3 csoport, rövid	0,61 mp	0,56 mp
közepes idejű csoport	4,26 mp	4,26 mp
3 csoport, hosszú	31, 82 mp	35,48 mp

Zitouni és társai bevallottan a harmadik, közepes időtartamú kitöréscsoportot keresik a 2015-ben írt cikkükben [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015]. Elemzik a CGRO/BATSE adatokat és a Swift/BAT megfigyeléseket is. A BATSE adatok esetén külön táblázatban közlik a csoportok időtartamainak a középértékét két, illetve három Gauss-görbe illesztésével. Ugyanebben a táblázatban közlik az általam végzett elemzés [Horváth, I., 2002] eredményeit is (lásd a 8.1 táblázatot). Hasonló összefoglaló táblázatban közlik a Swift műhold adatainak a két, illetve három Gauss-görbe illesztésével kapott csoportok időtartamainak a középértékeit összehasonlítva a Horváth et al. 2008 eredményeivel (lásd a 8.2 táblázatot). Az adatok jó egyezést mutatnak, bár Zitouni et al. 757, míg a Horváth et al. 222 gammakitörés időtartamértékét használja. Zitouniék megerősítik azt a többek által hangoztatott álláspontot, hogy a két másodperces időtartamhatár a csoporttagok megkülönböztetésére tarthatatlan. Megjegyzik továbbá, hogy az, hogy a három Gauss-görbés illesztés jobb, mint a két Gauss-görbés, még nem feltétlenül jelenti azt, hogy három fizikailag különböző csoport létezik. Amennyiben a hosszú gammakitörések időtartamának logaritmikus eloszlása nem szimmetrikus, úgy egy újabb Gauss-komponens bevezetésével a szignifikancia jelentősen javulhat.

8.2 táblázat. Zitouni és társai (2015) által közölt táblázat, melyben a Swift/BAT kitörések csoportosításánál kapott eredményeiket hasonlítják össze az általam közölt eredményekkel [Horváth, I., et al., 2008].

átlagos időtartam	Zitouni et al. 2015	Horváth et al. 2008
2 csoport, rövid	0,33 mp	0,35 mp
2 csoport, hosszú	45,0 mp	40,36 mp
3 csoport, rövid	0,29 mp	0,34 mp
közepes idejű csoport	9,06 mp	12,79 mp
3 csoport, hosszú	69,72 mp	79,98 mp

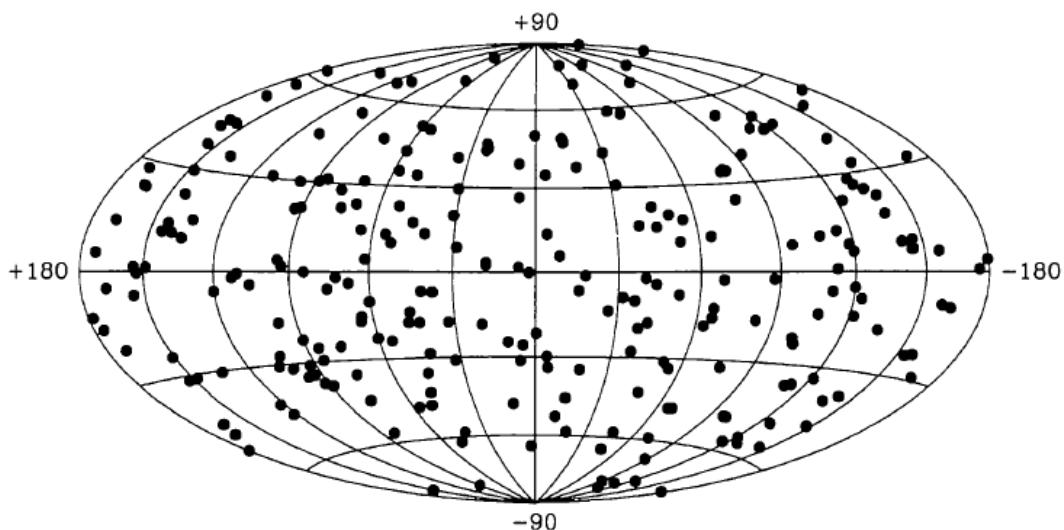
Marius Tarnopolski négy tanulmányt is közölt 2015-ben [Tarnopolski, M., 2015a], [Tarnopolski, M., 2015b], [Tarnopolski, M., 2015c], [Tarnopolski, M., 2016]. Az *Astrophysics and Space Science* folyóiratban közölt cikkében [Tarnopolski, M., 2015c] a rövid és hosszú kitörések időtartam határával foglalkozik, tehát nem közöl három-csoport illesztéseket. Arra a megállapításra jut, hogy a BATSE kitöréseknél nem 2 másodpercre kell a határt tekinteni a rövid és hosszú kitörések esetében, hanem $3,38 \pm 0,27$ másodpercre. A *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* folyóiratban közölt cikkében [Tarnopolski, M., 2015b] is a rövid és hosszú kitörések megkülönböztethetőségével foglalkozik. Az időtartam mellett elemzésében felhasználja a minimális változás időtartamát (minimum variability time-scale) és a Hurst exponenst. Két megállapítást tesz. Az egyik, hogy a T_{90} időtartam használatával viszonylag jól elkülöníthető a rövid és hosszú kitörések csoportja, a másik, hogy a két új változó használata nem javítja tovább a csoportosíthatóságot.

További cikkeiben Tarnopolski elemzi a Fermi [Tarnopolski, M., 2015a], illetve a Swift [Tarnopolski, M., 2016] műhold által megfigyelt gammakitörések időtartameloszlását. A Fermi műhold adatainak az időtartameloszlását különböző binméret esetén vizsgálja. Bár minden esetben jobbnak találja a háromkomponens illesztéseket, de nem találja szignifikánsnak azokat. Sajnálatos, hogy a χ^2 statisztika mellett nem használja az általa más cikkek esetében is alkalmazott maximum likelihood eljárást. A Swift műhold adatainál már használja a likelihood-függvényt, megvizsgálja a BAT műszer által megfigyelt 947 kitörés időtartameloszlását, valamint azon 347 gammakitörés időtartameloszlását, amelyekre van megfigyelt vöröseltolódás. Ez utóbbi esetben a kibocsájtórendszerbeli időtartamok eloszlását is elemzi. Mindhárom esetben használja az Akaike Információs Értéket [Akaike, H., 1974], [Burnham, K. P. and Anderson, D. R., 2004] és a már említett Bayesi Információs Értéket. A teljes mintára (947 GRB) a három-Gauss illesztést találja a legjobbnak. A kibocsájtórendszerbeli időtartameloszlásra pedig a két-Gauss-t.

Ugyancsak 2016-ban Arkhangelskaja [Arkhangelskaja, I. V., 2016] is tárgyalta a problémát. Megállapítja, hogy a nem triggerelt katalógusokban nem tudja kimutatni a közepes időtartamú csoportot, míg a BATSE és BAT katalógusokban igen.

9. A GAMMAKITÖRÉSEK IRÁNY SZERINTI ÉS TÉRBELI ELOSZLÁSA

A gammakitörések vizsgálatában fontos szerepet játszott égi pozíciójuk meghatározása. A kitörések fizikájának megértéséhez elengedhetetlenül szükséges a források beazonosítása és tanulmányozása. Ezek megtalálásával a gammakitörések felfedezése után szinte azonnal próbálkoztak, lásd a 3.2. és a 4. fejezeteket. A halvány források tanulmányozásához pontos égi pozícióra van szükség, hiszen ha nagy területen lehet a forrás, akkor nagyon sok a lehetséges jelölt. Következésképpen minden gammakitörés-megfigyelő műszernél (mely tipikusan műhold, hiszen a légkörön kívül kell a megfigyélést végezni) cél volt a pozíciók pontos meghatározása.



9.1. ábra. A BATSE első katalógusban közölt 260 kitörés eloszlása az égen.

Ahogy azt korábban már említettem, a Compton Gamma Űrobszervatórium (CGRO) önállóan is képes volt a megfigyelt gammakitörések égi pozícióját meghatározni. A 3.1. fejezetben leírt módon határozták meg a kitörések koordinátáit, mely értékeket 1-1,5 fok szisztematikus és 1-16 fok statisztikus hiba terhelte [Fishman, G. J., et al., 1994]. Ez alapján érthető, hogy miért nem fedezték fel a kitörések utófényét a CGRO BATSE műszer adatai alapján, hiszen egy óriástávcső tipikus látómezeje lényegesen kisebb ezeknél a hibáknál (az utófények felfedezését a 3.2. fejezetben tárgyaltam); az égbolton való eloszlás tanulmányozásához azonban már a BATSE adatok alkalmasak voltak. A CGRO kilenc és fél éves működése alatt több ezer GRB-t figyelt meg, a végső katalógusba [Meegan, C. A., Pendleton, G. N. and Briggs, M. S.] 2704 kitörés égi koordinátája került. Ezek eloszlását mutattam be a 4.2. ábrán. 1990-re az IPN

megfigyelések alapján már gyanítható volt, hogy a kitörések eloszlása az égen egyenletes [Atteia, J.-L., et al., 1987], bár még akkoriban is megjelent olyan publikáció, melyben az irány szerinti eloszlás korrelált volna galaxisunk síkjával [Quashnock, J. M. and Lamb, D. Q., 1993]. A BATSE első katalógusának [Fishman, G. J., et al., 1994] adatai (lásd a 9.1. ábrát) arról győzték meg a kutatóközösség tagjait, hogy a kitörések irány szerinti eloszlása véletlenszerű. A 4.2. ábra a végső BATSE katalógus 2704 kitörésének égi eloszlását mutatja.

A 6. és 7. fejezetben megmutattam, hogy a kitöréseknek három altípusa létezik. Érdemes megvizsgálni a kitörések egyes csoportjainak irány szerinti eloszlását külön-külön. Ezek szisztematikus vizsgálatát Balázs Lajossal és Mészáros Attilával együtt végeztük el [Balázs, L. G., Mészáros, A. and Horváth, I., 1998].

9.1. A gammakitörések irány szerinti eloszlása

A leggyakrabban alkalmazott eljárás egy gömbi eloszlás izotropiájának a vizsgálatánál a szférikus harmonikusok alkalmazására épül [Briggs, M. S., et al., 1996], [Tegmark, M., Hartmann, D. H., Briggs, M. S. and Meegan, C. A., 1996].

Ha az $f(l, b, x_1, \dots, x_n)$ függvény írja le egy objektumnak az infinitezimálisan kicsiny térszögben való megtalálásának a sűrűségfüggvényét, és az l, b eloszlás (itt és a továbbiakban is l és b a galaktikus koordinátákat jelöli) független a többi tulajdonságtól, akkor f felbontható a következő módon:

$$f(l, b, x_1, \dots, x_n) = \omega(l, b)g(x_1, \dots, x_n) \quad (9.1.1)$$

Az $\omega(l, b)$ függvény hagyományos szférikus harmonikus felbontása a következő:

$$\begin{aligned} \omega(l, b) = & \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \omega_0 - \frac{3}{\sqrt{4\pi}} (\omega_{1,-1} \sin l \cos b + \omega_{1,0} \sin b - \omega_{1,1} \cos l \cos b) + \\ & + \frac{15}{\sqrt{16\pi}} (\omega_{2,2} \cos 2l \cos^2 b - \omega_{2,1} \cos l \sin 2b - \omega_{2,-1} \sin l \sin 2b + \omega_{2,-2} \sin 2l \cos^2 b) + \\ & + \frac{5}{\sqrt{16\pi}} \omega_{2,0} (3 \sin^2 b - 1) + \text{magasabb rendű tagok}, \end{aligned} \quad (9.1.2)$$

ahol hagyományosan az $\omega_{1,-1}$; $\omega_{1,1}$ és $\omega_{1,0}$ tagokat dipóltagoknak, az $\omega_{2,-2}$; $\omega_{2,2}$; $\omega_{2,-1}$; $\omega_{2,1}$ és $\omega_{2,0}$ tagokat kvadrupóltagoknak nevezzük. Az akkori (1998-as) Current BATSE katalógus [Meegan C. A., Pendleton G. N. and Briggs M. S.] 2025 gammakitörés égi koordinátáit tartalmazta. Ezekre a fenti gömbi harmonikusokat a Student-féle t-tesztel megvizsgálva azt kaptuk, hogy két tag is szignifikánsan nem nulla [Balázs, L. G., Mészáros, A. and Horváth, I., 1998]. Ezen eredményeket tartalmazza a 9.1.1 táblázat.

9.1.1 táblázat. A gömbi harmonikusokra kapott Student t értékek, és azok valószínűségei.

	$\omega_{1,-1}$	$\omega_{1,1}$	$\omega_{1,0}$	$\omega_{2,-2}$	$\omega_{2,2}$	$\omega_{2,-1}$	$\omega_{2,1}$	$\omega_{2,0}$
t	1,51	1,77	0,71	2,76	1,54	3,26	0,98	0,36
%	13,4	7,7	47,7	0,6	12,1	0,1	33,3	71,9

A másik módszer, amit cikkünk [Balázs, L. G., Mészáros, A. and Horváth, I., 1998] alkalmazott, az egyszerű Bernoulli teszt. Az égbolt két részre való osztásával és $p = 0,5$ értékkel számolva binomiális tesztet alkalmaztunk, mely szintén anizotrópiát mutatott.

Megvizsgálva a hosszú kitöréseket, különböző hosszúságúhatárt alkalmazva, nem adódott szignifikáns anizotrópia. A rövid gammakitöréseknél mind a három különböző hosszúságúhatár esetén szignifikáns anizotrópia mutatkozott, mindhárom esetben 99%-nál nagyobb szignifikanciával (lásd. a 9.1.2 táblázatot). Az összes kitörés 98,0%-os szignifikanciát mutatott.

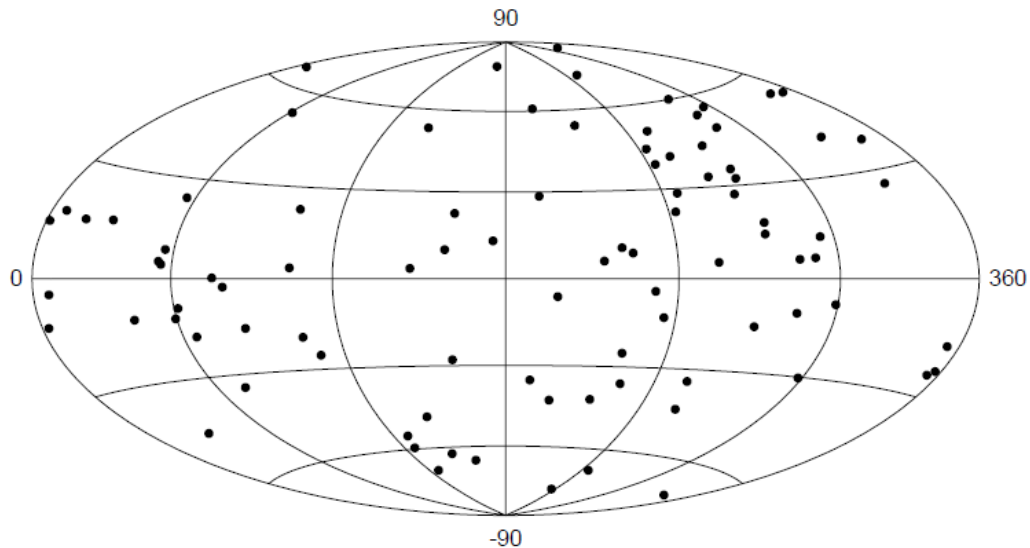
9.1.2 táblázat. Az égi helyzet véletlenszerű eloszlására Balázs és társai által alkalmazott binomiális tesztek és azok valószínűségei.

csoport	N	n_1	n_2	%
összes kitörés	932	430	502	2,0
$T_{90} < 1 \text{ s}$	206	82	124	0,43
$T_{90} < 2 \text{ s}$	251	103	148	0,55
$T_{90} < 10 \text{ s}$	372	154	218	0,11
$T_{90} > 2 \text{ s}$	681	327	354	32
$T_{90} > 10 \text{ s}$	560	276	284	77
$T_{90} > 15 \text{ s}$	507	257	260	59

Egy másik munkánkban [Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Vavrek, R., 1999] csoportunk megmutatta, hogy ha a rövid és a hosszú kitörések égi eloszlását hasonlítjuk össze, akkor azok 98,7%-os szignifikanciával térnek el egymástól.

Későbbi vizsgálataink azt mutatták, hogy a 6. fejezetben tárgyalt osztályozásban talált közepes gammakitörés-csoport égi eloszlása nem egyenletes [Mészáros, A., Bagoly, Z., Horváth, I., Balázs, L. G. and Vavrek, R., 2000]. A cikkben vizsgált 92 gammakitörés égbolton való eloszlását mutatja a 9.1.1 ábra. Részben ezt erősítette meg Litvin és társai vizsgálata [Litvin, V. F., Matveev, S. A., Mamedov, S. V. and Orlov, V. V., 2001], akik igazolták, hogy a közepes időtartamig tartó kitörések ($2 \text{ s} < T_{90} < 8 \text{ s}$) égbolteloszlása anizotróp. Mind a két csoport, csakúgy, mint mások (például [Meegan, C. A., et al., 1992], [Briggs, M. S., et al., 1996], [Tegmark, M., Hartmann, D. H., Briggs, M. S. and Meegan, C. A., 1996], [Magliocchetti, M., Ghirlanda, G. and Celotti, A., 2003]), a hosszú gammakitörések égi eloszlását izotrópnak találta.

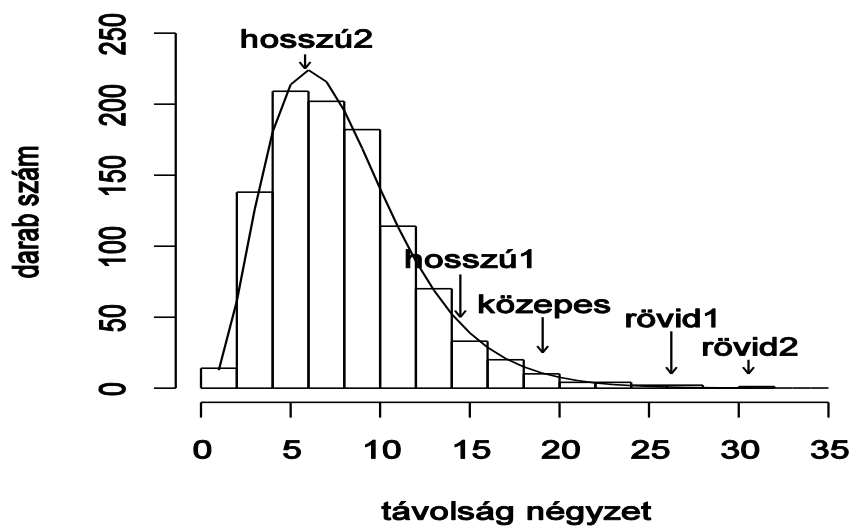
Egy másik részletes, a BATSE kitöréseket elemző vizsgálatban [Vavrek, R., Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Bagoly, Z., 2008] Voronoi tesszeláció, multifraktál spektrum és a gráfoknál használt minimális kifeszítőfa eljárások segítségével tizenhárom változó eloszlását hasonlítottuk össze a véletlen eloszlás változóival.



9.1.1. ábra. A magyar GRB csoport által vizsgált 92, a BATSE katalógusban található közepes időtartamú gammakitörés eloszlása az égen.

A 2-10 másodperc hosszúságú gammakitöréseket tekintettük közepes időtartamú kitörésnek. Csak a Pendleton és társai [Pendleton, G. N., et al., 1997] által bevezetett határnál fényesebb (256 ms-os csúcsfényesség $0,65 \text{ foton/cm}^2\text{s}$) kitöréseket vettük figyelembe. A 2 másodpercnél rövidebb kitörések alkották a *rövid2*, a 10 másodpercnél hosszabb kitörések alkották a *hosszú2* csoportot. A $2 \text{ foton/cm}^2\text{s}$ csúcsfényességnél fényesebb kitöréseket elhagyva kaptuk a *rövid1* és *hosszú1* csoportokat. Mind az öt csoportra előállt a 13 tesztváltozóból alkotott hosszúságnégyzet mennyiség. Ezek értékeit hasonlítottuk össze 1000 véletlen eloszlás eredményével (lásd a 9.1.2 ábrát).

Az elemzés a rövid kitörések égi eloszlását több mint 99%-os szignifikanciával anizotrópnak találta, míg a közepes gammakitörések esetén a szignifikancia 98,5 százalékos volt. A hosszú kitörések égi eloszlását ez az elemzés is véletlenszerűnek találta.

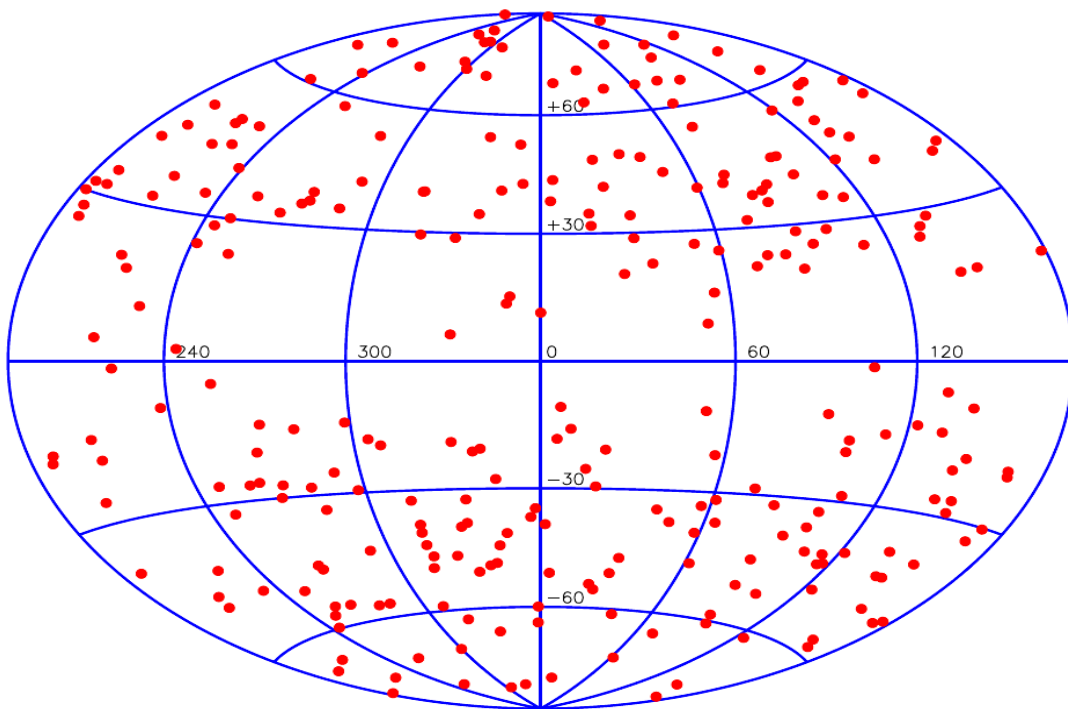


9.1.2. ábra. A gammakitörések anizotrópiájára vonatkozó szignifikanciák Monte-Carlo szimulációval történő kiszámításának az eredménye Vavrek és társai 2008-as cikkében.

9.2. A gammakitörések térbeli eloszlása

Mint már említettem, a kitörések égi eloszlásának vizsgálatát nagyban nehezíti a nem egyenletes égboltlefedés [Bagoly, Z., et al., 2015]. Az egyes műholdak detektorai különböző valószínűséggel észlelik a gammavillanásokat, illetve nem egyforma ideig figyelik meg az égbolt különböző területeit. Ezen lefedési függvényt a CGRO BATSE esetében közölték [Meegan, C. A., et al., 1996], míg a Swift műhold esetében publikációkban számolták (például [Bagoly, Z., et al., 2015], [Ukwatta, T. N. and Wozniak, P. R., 2016]).

A helyzet a kitörések távolságának (vöröseltolódásának) meghatározásával csak kis mértékben változott, hiszen ez a több ezer gammakitörésnek csak kis részére történt meg. A 2010-es évek elejére már elérte a néhány százat a megmért vöröseltolódású GRB-k száma. A 2012 júliusáig megfigyelt kitörések égi eloszlását mutatja a 9.2.1 ábra galaktikus koordinátákban.⁶ A galaktikus egyenlítő közelében láthatóan a kitörések ritkábban helyezkednek el. Ennek oka a galaktikus por, melynek a galaxisunk síkjában való elnyelése miatt az utófényeket nehezebb megfigyelni, ennek hiányában viszont nem határozható meg a vöröseltolódás.



9.2.1. ábra. A 2012-ben ismert vöröseltolódású 283 gammakitörés eloszlása az égbolton galaktikus koordináta-rendszerben.

Bonyolult eljárásokkal lehet csak figyelembe venni a lefedési függvény okozta effektusokat. Azonban ha feltételezzük, hogy a lefedési függvény nem függ a távolságtól, összehasonlíthatjuk az egyes alosztályok égi eloszlását egymással. Ha két kitörés

⁶ Az adatok a <http://lyra.berkeley.edu/grbox/grbox.php> helyről származnak.

különböző távolságban van, de látszó fényességük hasonló, akkor semmi nem indokolja, hogy az egyiket nagyobb valószínűséggel mérjék a műszerek, mint a másikat, ha azonos irányban látszanak. Eltérő irány esetén, mint láttuk, van eltérés, pl. a galaktikus síktól való távolság függvényében. A gammakitörések belső (intrinsic), a kibocsájtáskori fényessége több nagyságrendben mutat szórást [Piran, T., Sari, R. and Mochkovitch, R., 2012]. Ez bizonyosan nagyobb, mint a távolsági faktorból eredő fényességkülönbség [Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Mészáros, P., 2003]. Ez erősíti a lefedési függvény vöröseltolódás-függetlenségére tett feltevésünket.

Ha nézzük a 100 legközelebbi gammakitörés eloszlását az égen, és például a 100 legtávolabbi kitörés eloszlását, akkor ezek hasonló effektusokkal terheltek (a lefedési függvényük nagyon hasonló). Ezért a lefedési függvény konkrét ismerete nélkül is összehasonlíthatjuk a két eloszlást, megvizsgálva van-e közöttük különbség. A 2012 júliusáig megfigyelt 283 GRB-t oszthatjuk három hasonló darabszámú csoportra is, és összehasonlíthatjuk páronként a csoportokat egymással. Figyelembe véve, hogy a kitörések igen nagy távolságban vannak (100 Mpc-től több ezer megaparszekig), a kozmológiai elvárások szerint az égi eloszlást véletlenszerűnek várjuk. Tehát, ha két csoportot összehasonlítva az égi eloszlásukat hasonlóknak találjuk, de a harmadik csoport égi eloszlása mind a kettőtől különbözik, akkor ennek a harmadik csoportnak megfelelő távolságban a gammakitörések eloszlása nem egyenletes.

9.2.1. Kétdimenziós eloszlások gömbön

A másik probléma e vizsgálat során, hogy az eloszlások összehasonlítására használatos legelterjedtebb Kolmogorov–Szmirnov próba (lásd. pl. [Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1992]) csak egy dimenzióban (egy változó esetén) használható. Egy változó eloszlása esetén adódik egy olyan természetes rendezés, amely két vagy több változó esetén nem létezik. További probléma, hogy az égbolt topológiája nem egyezik meg az euklideszi sík topológiájával. Egyszerű (sík) topológia esetére dolgozta ki Peacock [Peacock, J. A., 1983] a következő eljárást.

Az egydimenziós Kolmogorov–Szmirnov próbát úgy alkalmazzák, hogy veszik a két eloszlásfüggvény maximális eltérését, és ezt az értéket helyettesítik be a szignifikanciát adó képletbe. Két változó esetén Peacock azt javasolta, hogy az x , y síkon (ha x és y a két változónk) vegyünk véges sok pontot. Ezek mindegyike négy részre osztja a síkot;

$$1, x < x_0, y < y_0$$

$$2, x < x_0, y > y_0$$

$$3, x > x_0, y < y_0$$

$$4, x > x_0, y > y_0, \quad \text{ahol } (x_0, y_0) \text{ az egyik választott pont koordinátái.}$$

Az összehasonlítandó két kétdimenziós eloszlás „kumulatív” értékeit (az egyes síknegyedekben levő elemszámokat) ezeken a tartományokon hasonlítjuk össze. Dolgozatomban a két összehasonlítandó eloszlás elemszáma minden esetben megegyezik.

Tehát, ha a két kétdimenziós ponthalmaz (eloszlás) N elemet tartalmaz, akkor az egyes síknegyedekbe eső x_1, x_2, x_3, x_4 elemszámokat kell összehasonlítani a másik ponthalmaz y_1, y_2, y_3, y_4 értékeivel. Természetesen

$$x_1+x_2+x_3+x_4=N \quad \text{és} \quad y_1+y_2+y_3+y_4=N.$$

A véges sok helyen vett $|x_i - y_i|$ maximális értékét tekintjük a két eloszlás maximális távolságának.

A témában jó összefoglalást ad Lopes és társai munkája [Lopes, R. H. C., Hobson P. R. and Reid I. D., 2007]. A Peacock-féle eljárás jelentős számítógépidőt igényel nagyobb elemszámok esetén. Az osztópontok megválasztására dolgozott ki algoritmust Fasano és Franceschini [Fasano, G. and Franceschini, A., 1987]. Ezzel a számítógépes futásidőt lényegesen csökkentették a nyers erő-típusú számításokhoz képest. A szignifikanciák megállapításával kapcsolatban az irodalomban Monte-Carlo szimulációt javasolnak [Justel, A., Pena, D. and Zamar, R., 1997].

9.2.1.1 táblázat. A kétdimenziós Peacock-féle összehasonlító eljárás eredményei kilenc távolságcsoporthoz. A táblázat szimmetrikus, ezért csak a főátló feletti értékeket közlöm.

csoport	gr1	gr2	gr3	gr4	gr5	gr6	gr7	gr8	gr9
gr1		9	9	15	11	13	9	12	8
gr2			10	18	7	15	11	9	12
gr3				14	9	11	14	9	10
gr4					15	10	15	17	11
gr5						13	13	8	10
gr6							10	13	8
gr7								10	10
gr8									11
gr9									

Ezt a Peacock-féle kétdimenziós eljárást alkalmaztam az előzőekben tárgyalt 283 gammakitörés esetében. Négy távolságcsoporthoz például 70 pont (gammakitörés) van egy csoportban, ezek égi eloszlását hasonlítottam össze egymással [Horváth, I.,

Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2013]. Egészen kilenc távolságcsoporthoz elvégeztem az összehasonlításokat, azonban tíz, vagy még több különböző távolságcsoporthoz esetén az egyes csoportok elemszáma túlságosan kicsiny lenne statisztikai vizsgálatokhoz. A konkrét elemzést a kilenc távolságcsoporthoz való osztás esetén mutatom be. Mivel $31 \cdot 9 = 279$ ezért, hogy mind a kilenc csoport elemszáma 31 legyen, a legközelebbi négy kitörést kihagytam a vizsgálatból. Így a vöröselölódás-osztópontok a következők lettek; $z = 0,41; 0,72; 0,93; 1,25; 1,60; 2,10; 2,73$ és $3,60$. Az első csoportba (gr1) a $z = 3,6$ -nál nagyobb vöröselölódású kitöréseket osztottam. A második csoportba (gr2) a $z = 2,73$ és $z = 3,6$ közötti vöröselölódású kitöréseket osztottam, és így tovább egészen a kilencedik csoportig, melybe a $z = 0,41$ -nél kisebb vöröselölódású gammakitörések tartoztak.

A Peacock-féle eljárás eredményeit mutatja a 9.2.1.1 táblázat, amelyben a nagyobb szám nagyobb eltérést, nagyobb különbséget jelent a két csoport égi eloszlásában. Ezek a csoportok azok, amelyeknél a táblázatban a legnagyobb számok találhatók. Tehát például a kilencedik csoport égi eloszlása (gr9) kevésbé tér el a hetedik csoporttól (gr7), mint a nyolcadiktól (gr8). De a hatodik csoport égi eloszlásától még kevésbé tér el, hiszen a táblázatban levő szám (8) kisebb, mint a másik két kiszámolt érték, a hetedik (10) és a nyolcadik (11) csoporttal való összehasonlításnál.

A nyolc legnagyobb számból hat, a hat legnagyobb számból pedig öt a negyedik csoporthoz (gr4) tartozik. Hozzávetőleges valószínűséget számoltam véletlen eloszlások összehasonlításával (Monte-Carlo módszerrel). Itt is megjegyzem, hogy a jelenleg általánosan elfogadott kozmológiai modellek nagy skálán homogén és izotróp világot tételeznek fel. Ez esetben az általam most részletezett skálán nem lehetne megfigyelhető struktúra, azaz az égbolton a kitöréseket a távolságuktól függetlenül véletlenszerűnek kellene észlelnünk.

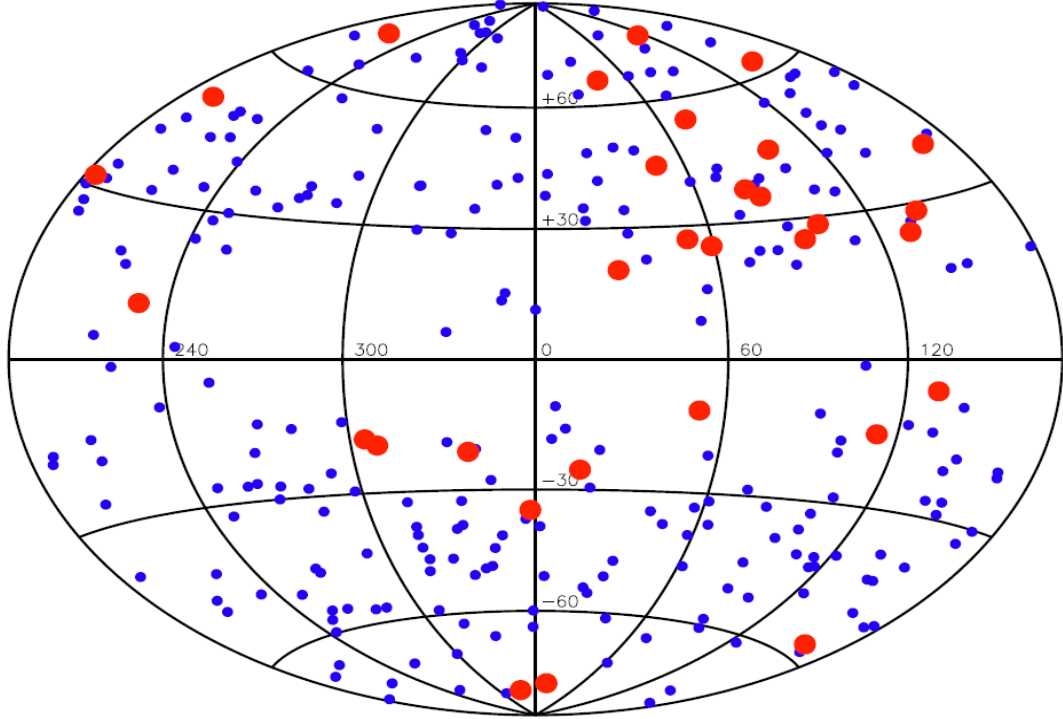
Negyvenezer véletlen szimulációt végeztem [Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2013], melyek során vettem 31 pont helyzetét az égen (két koordináta) területarányos véletlen eloszlásban. Másik 31 véletlenszerű pozícióval összehasonlítva megkerestem, a kétdimenziós összehasonlítás legnagyobb eltérését. Ezt az eljárást negyvenezereszer megismételtem, így kaptam egy statisztikát. Tizennyolcnál nagyobb értéket tíz esetben kaptam, 18-at huszonnyolc esetben. Tehát körülbelül $(10+28)/40000 = 0,00095$ az esély arra, hogy 17-nél nagyobb számot kapjunk. A Monte-Carlo módszerrel kapott eredmény 16-ra $p = 0,0029$, ugyanez 15-re $p = 0,0094$, továbbá annak a valószínűsége, hogy ez az érték 14-nél nagyobb legyen $p = 0,0246$ [Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2014]. A 13-ra kapott érték ($p = 0,057$) már statisztikailag nem tekinthető szignifikánsnak.

Normális eloszlást feltételezve, két szigmára szignifikáns a 13-nál nagyobb, és három szigmára szignifikáns a 15-nél nagyobb érték. A táblázatban 36 szám található. Ezek egymástól nem függetlenek, hiszen összesen kilenc eloszlást hasonlítottunk össze páronként egymással. Ha függetlenek lennének, akkor várhatóan 1,6 esetben (azaz 1 vagy 2 esetben) fordulna elő 13-nál nagyobb érték, illetve 15-nél nagyobb értéket nem is várnánk (a várható szám 0,09). A 9.2.1.1 táblázat adataira ez igaz, ha nem tekintjük a gr4 jelű csoportot. Ezen csoport nélkül két szám nagyobb 13-nál, és ezek egyike sem nagyobb 15-nél. A negyedik csoportnál viszont a nyolc értékből hat szignifikáns eltérést mutat a többi csoporttól [Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2014]. Ezek közül kettő a három szigma szignifikanciát is meghaladja.

Ha nem kilenc, hanem nyolc, hét, hat, öt vagy négy csoportra osztottam a 283 kitörést, a távolságuk (vöröselölódásuk) szerint rendezve, akkor attól függően tapasztaltam anizotrópiára utaló jelet, hogy a kilenc csoportra osztásnál rendellenesen viselked-

dő $z=1,60-2,10$ tartomány mekkora része esett az egyes csoportokba. Ennek értelmében a következőkben ezen 31 pont elhelyezkedését fogom vizsgálni az éggömbön.

A 9.2.1.1 ábra mutatja a negyedik csoport (gr4) égbolton levő eloszlását [Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2013].



9.2.1.1. ábra. Az ismert vöröseltolódású 283 gammakitörés eloszlása az égbolton. Piros körök jelölik az $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású 31 gammakitörést.

9.2.2. Legközelebbitárs-elemzések

Az égbolton található struktúrák keresésében a csillagászatban elterjedten használt módszer a legközelebbitárs-módszer [Scott, D. and Tout, C. A., 1989], [Slechta, M. and Mészáros, A., 1997]. Keressük meg 31 adott pont esetében az egyes pontokhoz legközelebb eső, de tőle különböző pont távolságát. Így 31 távolságadatot kapunk, melyek eloszlását meg lehet vizsgálni. Ha N pont véletlenszerűen oszlik el az égen, akkor a legközelebbi társ valószínűségi sűrűség-függvénye

$$P(\alpha) = \frac{(N-1)}{2^N} (\sin \alpha) (1 + \cos \alpha)^{N-2} \quad (9.2.2.1)$$

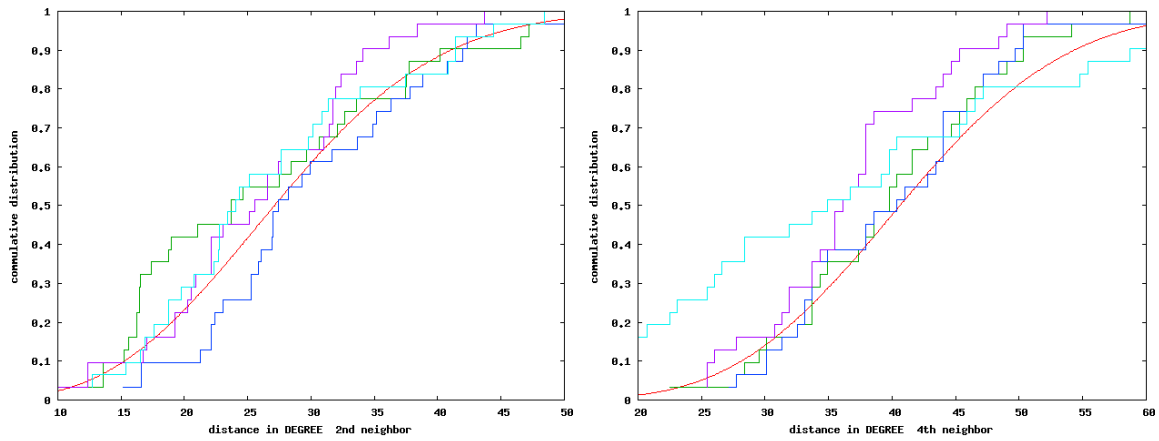
A második legközelebbi társ valószínűségi sűrűségfüggvénye

$$P(\alpha) = \frac{(N-2)(N-1)}{2^{N-1}} (\sin \alpha) (1 - \cos \alpha) (1 + \cos \alpha)^{N-3} \quad (9.2.2.2)$$

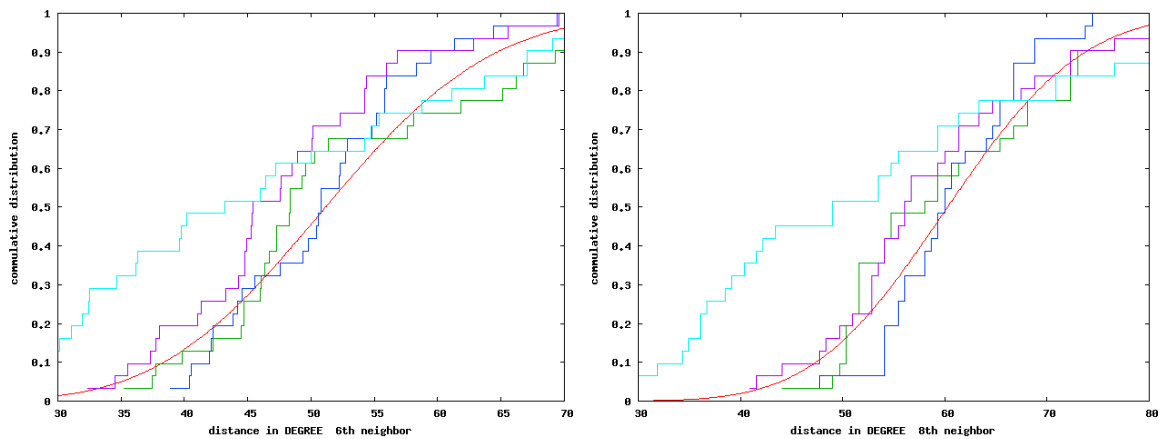
ahol α a két pont (szög)távolsága egymástól a gömbön, lásd például [Scott, D. and Tout, C. A., 1989]. Ha N pont véletlenszerűen oszlik el az égen és az M -edik legközelebbi-társ-eloszlását keressük, akkor Scott és Tout [Scott, D. and Tout, C. A., 1989] szerint a valószínűségi sűrűség-függvény

$$P_M(\alpha) = \frac{(N-1)!}{2^{N-1}(N-M-1)!(M-1)!} (\sin \alpha)(1 - \cos \alpha)^{M-1}(1 + \cos \alpha)^{N-M-1} \quad (9.2.2.3)$$

A következő oldalakon levő ábrákon ez az elméleti függvény mindig piros színnel van ábrázolva. A 9.2.1. fejezetben bevezetett csoportok (gr1,...,gr9) esetében mind a kilenc 31-elemű csoportnál megvizsgáltam a legközelebbi társ, a második legközelebbi társ, stb. a 30. legközelebbitárs-eloszlásokat. A 9.2.2.1 ábrán mutatom az első négy csoport esetén a második és negyedik legközelebbitárs-eloszlásokat, az első csoport zöld, a második csoport kék, a harmadik csoport lila, a negyedik csoport világoskék színnel van ábrázolva.

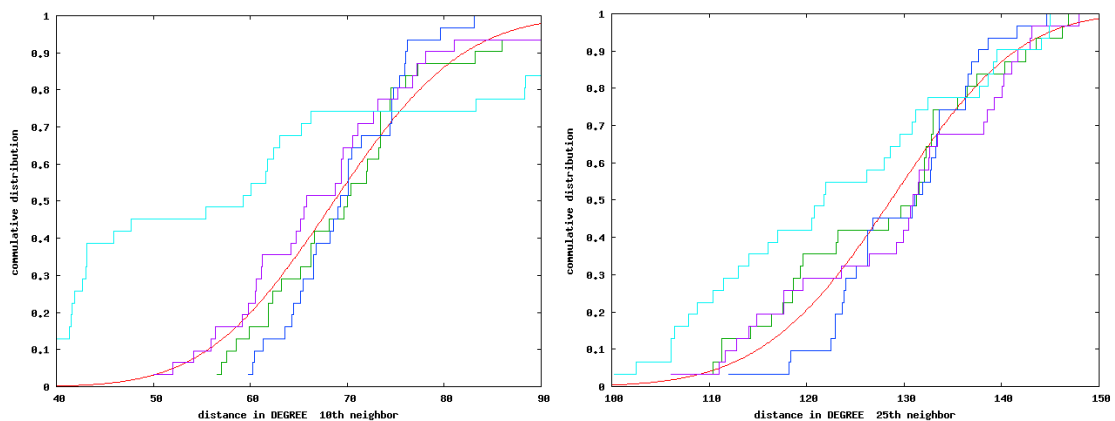


9.2.2.1. ábra. A 2. és a 4. legközelebbi társak eloszlásfüggvénye az első (zöld), második (kék), harmadik (lila) és negyedik (világoskék) csoportok esetén. Vízszintesen a távolság van feltüntetve fokokban.



9.2.2.2. ábra. A 6. és a 8. legközelebbi társak eloszlásfüggvénye az első (zöld), második (kék), harmadik (lila) és negyedik (világoskék) csoportok esetén. A piros görbe a véletlen eloszlás esetén várt eloszlásfüggvény.

A 9.2.2.2 ábrán, hasonlóan a 9.2.2.1 ábrához az első négy csoport esetén a hatodik és nyolcadik legközelebbitárs-eloszlásokat ábrázoltam (az első csoport zöld, a második csoport kék, a harmadik csoport lila, a negyedik csoport világoskék színnel). A 9.2.2.3 ábra bal oldalán látható a 10. legközelebbi szomszédok eloszlása az első négy kitöréscsoport (távolság szerint osztályozva) esetén, hasonló színekkel ábrázolva, mint az előzőekben. Mindegyik csoport mutat ugyan eltérést a piros görbétől, de az ezekből az eltérésekből számított Kolmogorov–Szmirnov valószínűségek nyolc csoportnál egyáltalán nem szignifikánsak. Ez már az ábrák szemrevételezésével is látszik, hiszen például a 8. és 10. szomszédok esetén a világoskék csoport (gr4) lényegesen jobban eltér, mint bármely más ábrán, bármely más csoport. Hasonló képet mutat az itt nem ábrázolt, de általam ugyancsak megvizsgált 5., 6., 7., 8. és 9. csoport legközelebbitárs-eloszlásai. A pontos valószínűségeket a 9.2.2.4 ábrán láthatjuk.

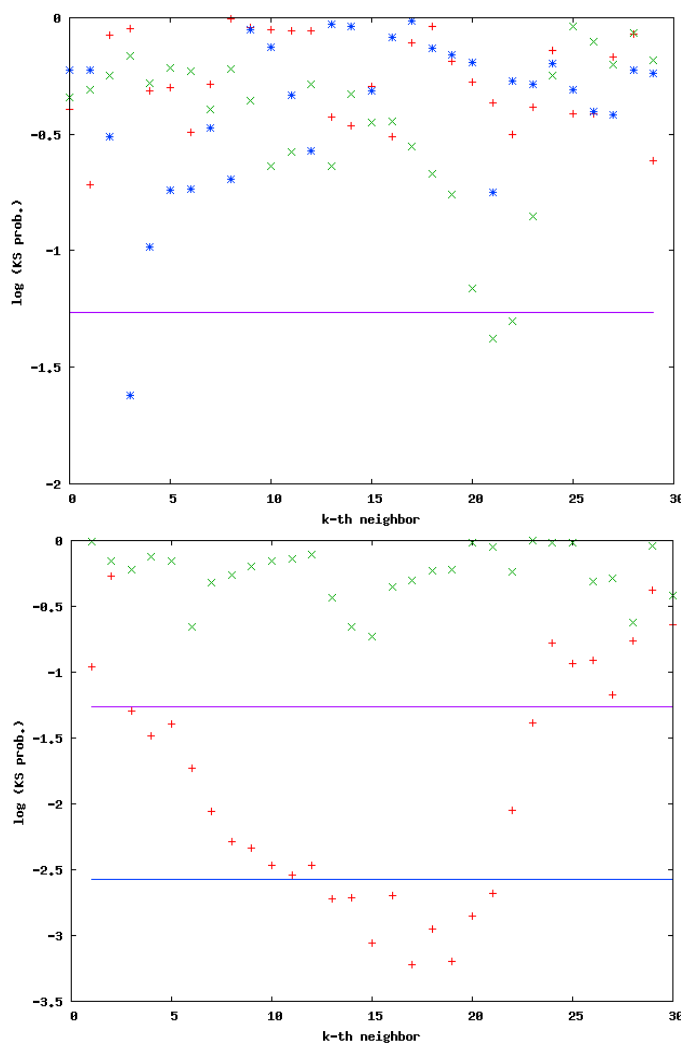


9.2.2.3. ábra. A 10. és a 25. legközelebbi társak eloszlásfüggvénye az első (zöld), második (kék), harmadik (lila) és negyedik (világoskék) csoportok esetén. A piros görbe a véletlen eloszlás esetén várt eloszlásfüggvény. Vízszintesen a távolság van feltüntetve fokokban.

Az, hogy nyolc csoportnál (mindegyik egyenként 31 gammakitörést tartalmazott) a legközelebbitárs-eloszlás nem mutatott szignifikáns anizotrópiát összhangban van azzal, hogy a gammakitörések nagyon távoliak, és ekkora skálán a Világegyetem már homogén és izotróp. A 9.2.2.4 bal oldali ábráján láthatók az első három csoport esetén az első 30 legközelebbiszomszéd-eloszlásokra kapott Kolmogorov–Szmirnov valószínűségeket (a függőleges tengely logaritmikus). Az első csoport esetén (piros szín) egyetlen egy sem érte el a 95%-os szignifikanciát (két-sigma jel). Ugyan a másik két csoportnál (kék és zöld szín) egy, illetve két esetben kaptunk $p = 0,05$ -nél (két-sigma jel) kisebb értéket, de ez nem tekinthető szignifikánsnak, hiszen összesen 120 adatpont van az ábrán. Ezek persze nem teljesen független valószínűségek, de 120 tesztnél már véletlen eloszlás esetén is várhatunk néhány két-szigmás jelet.

A 9.2.2.4 jobb oldali ábráján mutatom a negyedik és az ötödik csoport esetén az első 30 legközelebbiszomszéd-eloszlásokra kapott Kolmogorov–Szmirnov valószínűségeket (a függőleges tengely itt is logaritmikus). Az ötödik csoport esetén sem találtam szignifikáns valószínűségeket, szemben a negyedik csoport valószínűségeivel. Már a harmadik szomszédok eloszlása esetén két-sigma az eltérés a negyedik csoportnál (piros pluszjelek a 9.2.2.4 ábra jobb oldali ábráján), de láthatóan az első öt szomszédnál nincs különösebb tendencia. Ezután viszont egészen a 11. legközelebbi társig a

szignifikancia (1-p) folyamatosan nő egészen a három-sigma szintig (99,7%), majd eléri, és többször meghaladja a 99,9%-os szignifikanciát [Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2013]. A 19. társtól a szignifikancia rohamosan csökken. Ezek azt mutatják, hogy nem kisszámú kitörés van egymáshoz közel, hanem legalább 11, de maximum 18 kitörés alkot egy csoportosulást az égen. A 18 már meg is haladja a teljes elemszám (31) felét. A 14-elemű csoport körülbelül a teljes égbolt nem egészen egy nyolcadán helyezkedik el, ami jelen esetben, 31 pont esetén $p = 0,0000055$ binomiális valószínűséget jelent.



9.2.2.4. ábra. A Kolmogorov–Szmirnov próbából kapott valószínűségek a k -adik legközelebbi társak eloszlásfüggvényében a különböző csoportokra. Felső ábra; piros (első csoport), zöld (második csoport), kék (harmadik csoport). Alsó ábra; piros (negyedik csoport), zöld (ötödik csoport). A lila és kék vízszintes vonalak a két-sigma és a három-sigma értékeket jelölik.

A fenti eljárás hibája, hogy nem veszi figyelembe a lefedési függvényt. Pontosabban a lefedési függvény nem egzaktul ismert, ezért a véletlen eloszlásoknál nem tudtam figyelembe venni. Bár az ebben a fejezetben tárgyalt eljárások a tendenciákat mutatják (8 csoportnál nincs anizotrópia, a negyedik csoportnál viszont jelentős), a szignifikanciák és valószínűségek nem pontosak. A következő fejezetben e probléma megoldására vonatkozó vizsgálataim eredményeit fogom bemutatni.

9.2.3. Monte-Carlo bootstrap vizsgálat

Bár a vizsgált 283 gammakitörés észlelési valószínűségének a helyfüggése (lefedési függvény) ismeretlen, feltehető, hogy a lefedési függvény nem függ a távolságtól. A galaktikus extinkció helyfüggő ugyan, de a különböző távolságban levő gammakitörések hasonló műszer-, illetve galaktikus effektusokkal terheltek, hiszen a műszerek (és hasonlóan a galaxisunk) itt vannak a közelünkben.

Vagyis a lefedési effektusokat hasonlóan vesszük figyelembe, ha ugyanabból a mintából választunk pontokat. A $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású 31 gammakitörés égi helyzetét összehasonlíthatjuk másik 31 gammakitörés égi helyzetével.

Vegyünk az égen egy tetszőleges pontot, és tekintsük például az e pont körüli 10 fok sugarú kört. Számoljuk meg a körben található pontokat, azaz nézzük meg, hogy a 31 eredeti pontból (a 31 GRB koordinátája az égen) mennyi található 10 foknál közelebb a választott ponthoz. Legyen ezek száma 1. Majd vegyünk egy tetszőleges másik pontot. Ennek 10 fokos környezetében például 2 GRB található, és így tovább. Ismételjük meg az eljárást tízezerszer. A tízezer értékből vegyük a legnagyobbat. Ez a szám lesz a statisztikai változó. A 31 gammakitörés esetén az eljárással kapott értékeket tartalmazza a 9.2.3.1 táblázat.

9.2.3.1a táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
darabszám	5	6	9	9	10	11	12	12	14	14	15	16	16	17	17

9.2.3.1b táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
darabszám	18	19	20	20	20	20	20	21	21	22	22	22	22	22	22

9.2.3.1c táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
darabszám	22	22	22	23	23	23	23	24	24	24	25	25	26	26

A 9.2.3.1a-c táblázatban található körméret adat, területben egyenközű. A legkisebb kör mérete a teljes ég (vagy gömb) felszínének 80-ad része, azaz $4\pi/80$ szteradián. A következő kör mérete a teljes ég (vagy gömb) felszínének 40-ed része, azaz $4\pi/40$ szteradián. A következő kör mérete a teljes ég (vagy gömb) felszínének három 80-ad része, azaz $12\pi/80$ szteradián, és így tovább, tehát például a 40. kör mérete éppen a fél égbolt (2π szteradián). A 31 darab $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású gammakitörés esetében a táblázatok mutatják, hogy a legkisebb kör esetében a tízezer véletlenszerűen elhelyezett kör közül legalább egyszer 5 gammakitörés koordinátája esett ebbe a kis körbe. A második körméret esetén már volt olyan kör, melyben 6 GRB volt található.

A szignifikancia kiszámításánál Monte-Carlo bootstrap módszerrel vettem a megfigyelt gammakitörések közül 31 véletlenszerűen kiválasztott kitörést, és ezekre megismételtem a fenti eljárást. Ez esetben is kaptam mind a 80 körméret esetében maximális értékeket, vagyis azt, hogy maximálisan hány GRB volt található egy körön belül az adott körméret mellett. Ezután vettem más véletlenszerűen kiválasztott 31 gammakitörést a megfigyelt vöröseltolódású kitörések közül, és ezekre is elvégeztem az eljárást. Ezt összesen négyezerszer ismételt meg, így felépítettem egy statisztikát, vagyis minden körméret (mind a 80 körméret) esetén kaptam egy 4000 elemű eloszlást.

Megvizsgáltam, hogy ezen eloszlások esetén a $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású gammakitöréseknél tapasztalt számok (lásd. a 9.2.3.1a-c táblázatban), hol helyezkednek el. A legkisebb kör esetén a 4000 esetből 325 esetben volt 5 vagy annál nagyobb az érték. A második legkisebb kör esetén a $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású gammakitöréseknél ez a szám 6 volt. A 4000 Monte-Carlo esetben 544 volt 6 vagy annál nagyobb. Ezek a számok találhatóak a 9.2.3.2a-c táblázatokban.

9.2.3.2a táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
elemszám	325	544	15	95	78	54	45	117	13	47	31	14	32	18	43

9.2.3.2b táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
elemszám	26	11	7	16	26	41	73	32	52	22	36	51	66	95	131

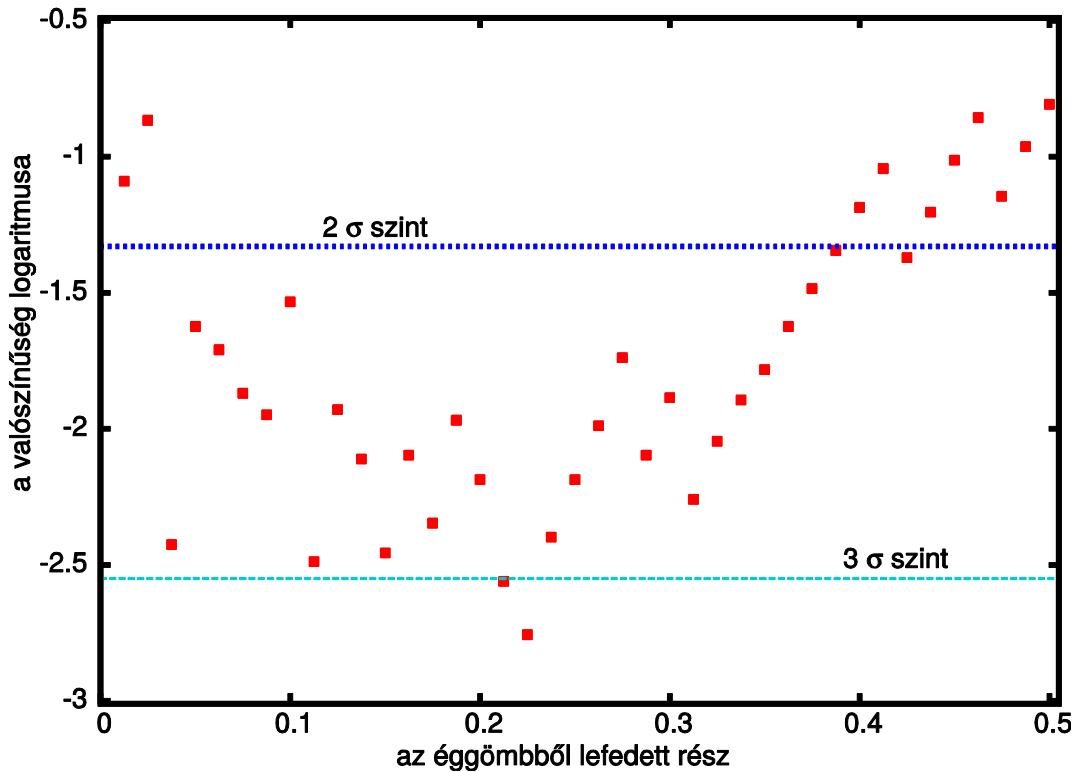
9.2.3.2c táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
elemszám	181	260	361	170	250	388	556	286	435	623	319	477	240	384

Az ezekből számolt valószínűségek 8 százalék és 14 százalék, mivel $325/4000=0,08125$ és $544/4000=0,136$. A szignifikanciák nem jelentősek (92% és 86%). Vagyis az 5 és 6 elemű csoportosulás a vizsgált 31 gammakitörésnél nem különleges. A más vöröseltolódású kitöréseknél hasonlóan kis tartományban előfordulnak hasonló csoportosulások. A harmadik legkisebb kör esetében a 9.2.3.2a-c táblázatban 15-ös érték található, azaz a 4000 Monte-Carlo esetben csak 15 esetén találtam ilyen csoportosulást. Ennek a szignifikanciája 99,6%, hiszen $1-15/4000=0,00375$. Hasonlóan a további szignifikanciák 98%, 98%, 98,6%, 98,9%, stb. A legszignifikánsabb eredményt a 18. körnél kaptam 99,82%, mivel $1-7/4000=0,00175$.

A 9.2.3.2a-c táblázat adataiból számolt szignifikanciaszinteket a 9.2.3.1 ábrán ábrázoltam logaritmikus skálán. A vízszintes tengelyen a körméret található 4π egységekben, tehát a 0,5 a 2π szteradiánnak felel meg, azaz a félgömb méretet jelenti. Ez a 40. gömbméret a fenti táblázatokban. A függőleges tengelyen az 1 mínusz a szignifikancia (azaz a valószínűség) található logaritmikus skálán ábrázolva.

95%-nál nagyobb szignifikanciájú eltérés mutatkozik 0,5 és 5 szteradián méret esetén. A szignifikancia kétszer is (egymás melletti pontokban) meghaladja az úgynevezett három-sigma szintet 2,6-2,8 szteradián méret esetén. 19 illetve 20 pont található az égbolt 22-23%-án. A binomiális valószínűség e számok esetén $p = 0,00000067$.



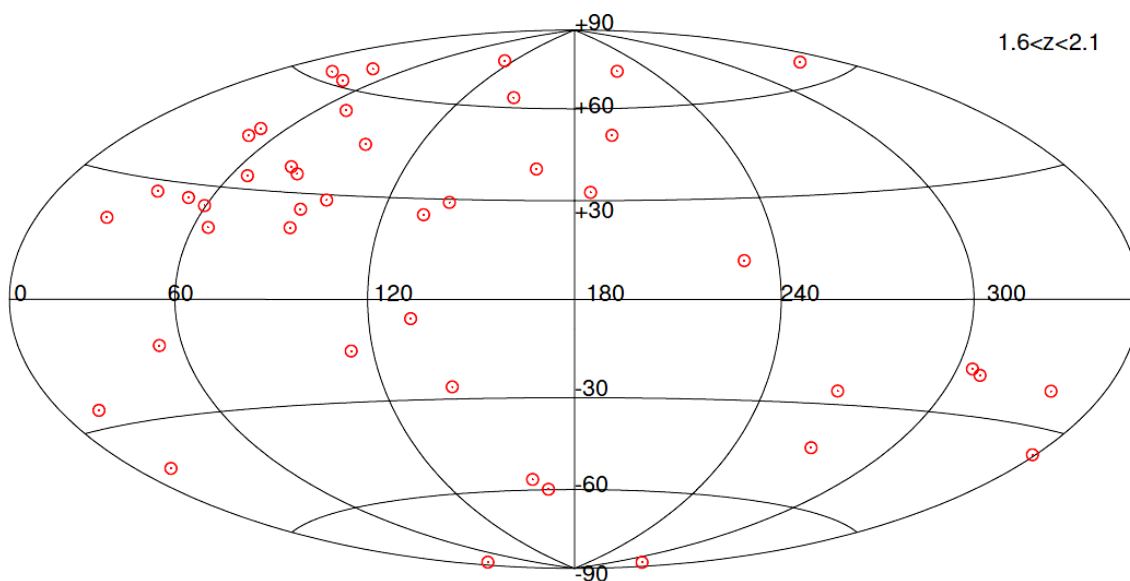
9.2.3.1. ábra. A 9.2.3.2a-c táblázat adataiból számolt valószínűségek (függőleges tengely). A kék vonal a 0,0455 szintet (két-sigma szint) a világoskék vonal a 0,0027 szintet (három-sigma szint) jelöli. A vízszintes tengelyen a körméret található 4π egységekben, tehát a 0,5 a 2π szteradiánnak felel meg.

9.3. Vizsgálatok újabb adatokkal bővítve

A Berkeley-i csillagászok üzemeltette internetes lap⁷ nagyjából félévente frissült. Ide 2013 novemberéig 78 olyan újabb gammakitörés került fel, melynek a vöröseltolódására is volt adat, így összesen 361 kitörés térbeli elhelyezkedése lett ismert. Ezen adatokkal újra elvégeztem a 9.2 fejezetben tárgyalt elemzéseket [Horváth, I., Bagoly, Z., Hakkila, J. and Tóth, L. V., 2015a], [Horváth, I., Bagoly, Z., Hakkila, J. and Tóth, L. V., 2015b]. Ritkán, de előfordul, hogy az internetes címen a már közölt adatokat időközben frissítik (változtatják), ezért az elemzésben használt adatokat függelékben

⁷ <http://lyra.berkeley.edu/grbox/grbox.php>

közlöm dolgozatom végén. Az előző fejezetben vizsgált $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódás-tartományban ezen 361 gammakitörésből 44 volt található. Ezek égi eloszlását mutatja a 9.3.1 ábra.



9.3.1. ábra. A vizsgált 44 gammakitörés helyzete az égen.

A 9.2.3. fejezetben alkalmazott Monte-Carlo bootstrap módszert használtam most is. Vettem az égen egy adott sugarú kört, majd az éggömbön egy tetszőleges pontot, és megszámoltam a körben található pontokat. Azaz megnéztem, hogy a 44 eredeti pontból mennyi volt található az adott sugárnál közelebb a véletlenszerűen választott ponthoz. Ezután vettem egy tetszőleges másik pontot, és megszámoltam az ennek adott sugarú környezetében található gammakitöréseket (a 44 vizsgált gammakitörést figyelembe véve), és így tovább. Majd megismétltem az eljárást tízezerszer és a tízezer értékből vettem a legnagyobbat. Ez a szám a statisztikai változóm. A 44 gammakitörés esetén az eljárással kapott értékeket tartalmazza a 9.3.1 táblázat.

9.3.1a táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
darabszám	6	9	13	13	15	17	18	18	19	20	21	22	23	24	25

9.3.1b táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
darabszám	25	25	26	26	27	28	28	29	29	30	30	31	31	31	31

9.3.1c táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
darabszám	31	31	31	31	32	32	34	34	34	34	35	35	36	37	38

A 9.3.1a-c táblázatban található körméretadat itt is területben egyenközü. A legkisebb kör mérete a teljes éggömb felszínének a 80-ad része, a következő kör mérete a teljes éggömb felszínének a 40-ed része, és így tovább. A 44 darab $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású gammakitörés esetében a táblázat mutatja, hogy a legkisebb kör esetében a tízezer véletlenszerűen elhelyezett kör közül legalább egyszer 6 gammakitörés koordinátája esett ebbe a kis körbe. A második körméret esetén már 9 esetben fordult ez elő.

A szignifikancia kiszámításánál Monte-Carlo bootstrap módszerrel vettem a megfigyelt gammakitörések közül 44 véletlenszerűen kiválasztott kitörést, és ezekre megismételtem a fenti eljárást. Ez esetben is megkaptam a különböző körméretek esetén, hogy mennyi volt az adott körben tapasztalt legnagyobb elemszám. Majd vettem más véletlenszerűen kiválasztott 44 gammakitörést a megfigyelt vöröseltolódású kitörések közül, és ezekre megismételtem az eljárást. Ezt összesen tizenhétezer-ötszázszor végeztem el, és az így kapott statisztikát felhasználva tudtam szignifikanciát számolni, hiszen minden körméret esetén kaptam egy 17500 elemű eloszlást.

Megvizsgáltam, hogy ezen eloszlások esetén a $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású gammakitöréseknél tapasztalt számértékek (9.3.1 táblázat) hol helyezkednek el. A legkisebb kör esetén a 17500 esetből 1210 esetben volt 6 vagy annál nagyobb érték, a második legkisebb kör esetén a $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású gammakitöréseknél ez a szám 9 volt. A 17500 Monte-Carlo szimulációra 121 esetben volt 9 vagy annál nagyobb. Ezek a számok találhatók a 9.3.2 táblázatban.

9.3.2a táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
elemszám	1210	121	5	28	10	9	4	21	16	18	16	12	10	5	2

9.3.2b táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

körméret	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
elemszám	7	37	22	60	42	35	67	43	68	41	68	35	62	96	139

9.3.2c táblázat. Adott körmérethez tartozó elemszám.

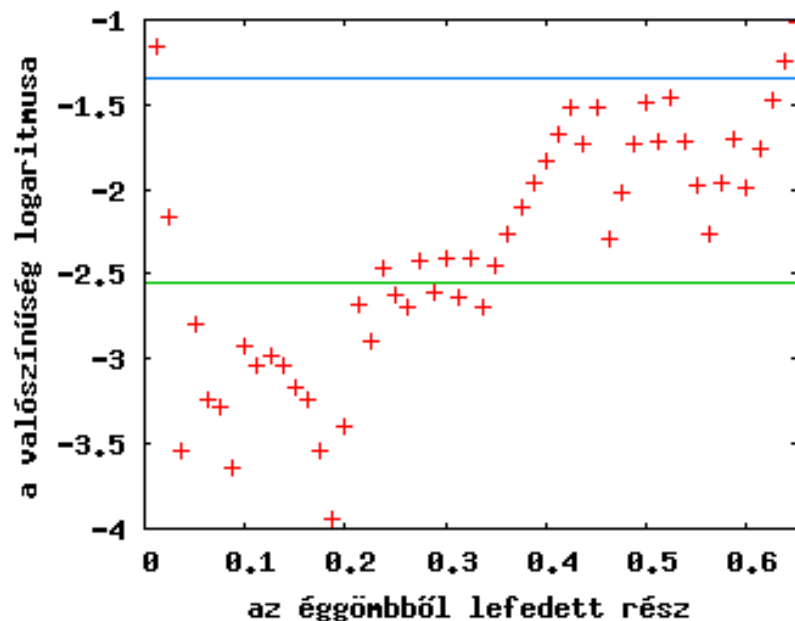
körméret	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
elemszám	190	255	370	541	320	535	90	170	327	570	334	598	331	187

Az ezekből számolt valószínűségek 7 százalék és 0,7 százalék, mivel $1210/17500=0,0691$ és $121/17500=0,0069$. A szignifikancia az első esetben 93%, a második esetben 99,3%. A harmadik legkisebb kör esetében a 9.3.2a-c táblázatban 5 található, azaz a 17500 Monte-Carlo esetben csak 5 esetén találtam ilyen csoportosulást. Ez esetben a szignifikancia 99,97%, hiszen $1-5/17500=0,00029$. A további szignifikanciák 99,84%, 99,94%, 99,95%, 99,98%, stb. A legszignifikánsabb eredményt a 15. körméretnél kaptam, ami 99,989% volt, mivel $1-2/17500=0,00011$.

A 9.3.2a-c táblázat adatait a 9.3.2 ábrán ábrázoltam logaritmikus skálán. A vízszintes tengelyen a körméret található 4π egységekben, a függőleges tengelyen az 1 mínusz a szignifikancia (azaz a valószínűség) látható logaritmikus skálán ábrázolva. Az ábra a 361 kitörésből a $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódás-tartományba eső 44 gammakitörés felhasználásával készült. A korábbi elemzésben [Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z., 2014] is publikált 9.2.3.1 ábra 283 darab GRB (melyből 31 esett a megfelelő távolságtartományba) adatainak felhasználásával készült. Míg a 9.2.3.1 ábrán 29 pont éri el a két-sigma szintet, és csak két pont a három-sigma szintet, a 9.3.2 ábrán 50 pont éri el a két-sigma szintet, és 21 pont a három-sigma szintet. A szignifikancia az 5. és a 16. körméret között a legnagyobb. A 9.3.1 táblázatban az ezeknek megfelelő elemszám 15-25. Vagyis ennyi megfigyelt gammakitörés alkothatja a halmazt, ami az anizotrópiát okozhatja.

Az előző fejezetben 19-20 pont volt található az égbolt 22-23%-án (kb. 2,6-2,8 szteradián méret). Most a legszignifikánsabb esetben, az égbolt kevesebb mint 19%-án található 25 gammakitörés, azaz a megfigyelt 44 kitörés 57%-a, az előző elemzésben a 19 gammakitörés a 31 kitörés 61 %-a volt (de az égbolt 22%-án). A körülírt égboltterület hasonló mind a két elemzésben, míg kis elemszám esetén a statisztikus fluktuáció bekövetkezése lehetséges, úgy az elemszámok növekedésével ennek valószínűsége egyre csökken.

Érdemes még megjegyezni, hogy az időközben megfigyelt 13 gammakitörésből 7 esett az égboltnak azon részére, ahol a megfigyelt csoportosulás található (a 9.2 fejezetben 31 gammakitörés volt a vizsgált $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódás-tartományban, míg jelen fejezetben már 44 kitörés esett e tartományba). Bár a 13, mint elemszám, még kisebb minta, mint az eredeti (eredetileg 31 gammakitörés égi eloszlását vizsgáltam), de megnyugtató, hogy az új adatokban is 50% feletti a gyakoriság. Ellenkező esetben kétértelmű lenne az eredmény relevanciája.



9.3.2. ábra. A 9.2.3.1 ábrához hasonló ábra a számolt valószínűségekkel. De az ottani 31 kitörés helyett 44 kitörést figyelembe véve az $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódás-tartományban. A kék vonal a 0,0455-s szintet a zöld vonal a 0,0027 szintet jelöli.

10. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TÉZISEK

A gammakitörések mechanizmusának megfejtése felfedezésük [Klebesadel, R. W., Strong, I. B. and Olson, R. A., 1973] után több mint negyven évvel is várat magára [Gehrels, N., Ramirez-Ruiz, E. and Fox, D. B., 2009]. Ma már tudjuk róluk, hogy az egyik legtávolabbi források, a korai Világegyetem hírnökei [Tanvir, N. R., et al., 2009], [Salvaterra, R., et al., 2009].

A gammakitörés jelenségének a megértése nemcsak e rejtély megfejtését szolgálja, hanem segítené a legelső csillagok születésével és a galaxisok keletkezésével kapcsolatos kérdések megválaszolását, és ezáltal a korai Világegyetem fejlődésének megértését is [Gehrels, N., Ramirez-Ruiz, E. and Fox, D. B., 2009], [Bromm, V. and Loeb, A., 2012].

A gammakitörések forrásainak a pontos ismeretét nagyban segítheti osztályozásuk, hiszen így lehetne tudni, hogy hányféle mechanizmust kell keresni a háttérben [Zhang, B., et al., 2009]. Az elterjedt nézet szerint kétfajta forrása lehet a gammakitöréseknek [Zhang, B., et al., 2007], [Zhang, B., et al., 2009]. A hosszabb (10-100 másodperc) kitörések a nagy tömegű gyorsan forgó csillagok végállapotával lehetnek kapcsolatban (5.2.1. ábra), míg a rövid (0,1-től 2-4 másodpercig) kitörések a szoros ketősök összeolvadása, vagy inkább összezsugorodása, révén keletkezhetnek (5.2.2. ábra).

Különleges, az ismert két típustól különböző gammakitörés fajtát többen is megpróbáltak azonosítani [Lamb, D. Q., Graziani, C. and Smith, I. A., 1993], [Pendleton, G. N., et al., 1997], [Cline, D. B., et al., 2005]. Ellentétben a Mukherjee-ék és általam a *The Astrophysical Journal* ugyanazon kötetében publikált két cikkel [Mukherjee, S., et al., 1998], [Horváth, I., 1998], ezeknek nem volt jelentős tudományos visszhangjuk. A közepesen hosszú lehetséges gammakitörés-csoportnak azonban kiterjedt irodalma van [Hakkila, J., et al., 2000], [Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R., 2001], [Horváth, I., 2002], [Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002], [Horváth, I., 2003], [Hakkila, J., et al., 2003], [Horváth, I., et al., 2004], [Horváth, I., et al., 2006], [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007], [Horváth, I., et al., 2008], [Horváth, I., Balázs, L. G. and Veres, P., 2009], [Ripa, J., et al., 2009], [Horváth, I., Veres, P. and Balázs, L. G., 2010], [Horváth, I., et al., 2010], [de Ugarte Postigo, A., et al. 2010], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012], [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014], [Tsutsui, R. and Shigeyama, T., 2014], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015], [Tarnopolski, M., 2016], [Arkhangelskaja, I. V., 2016].

Az e téren folytatott kutatási eredményeim egy részét foglalom össze a következő oldalakon a tézispontokban. Mindezek közül az egyik fontos állításom, hogy a különböző műholdak által megfigyelt gammakitörések statisztikus feldolgozása nagyon hasonló eredményre vezet. Néhány megfigyelt változó az egyes gammakitörés-csoportokon belül statisztikus értelemben jól jellemezhető lognormális eloszlással. Több csoportot feltételezve mindig azt az eredményt kaptam, hogy szükséges egy harmadik csoport bevezetése, viszont nem szükséges negyedik csoport létezését feltételezni.

A már jól ismert rövid, kemény és hosszú, lágyabb kitöréstípuson kívül minden elemzés egy közepes időtartamú (2-14 másodperc) nagyon lágy spektrumú kitöréscsoportot jelzett. Az irodalomban jelenleg is vita van a csoport létéről, illetve mibenlétéről [Zhang, B., et al., 2009], [Lü, H. J., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Zhang, B., 2010], [de Ugarte Postigo, A., et al. 2010], [Koen, C. and Bere, A., 2012], [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014], [Tsutsui, R. and Shigeyama, T., 2014], [Tarnopolski, M., 2015], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015].

Amennyiben e harmadik gammakitörés-csoport fizikai léte igazolást nyer, úgy a kitörések elméleti kutatói nagy kihívás elé néznek a progenitor megmagyarázása terén.

Ennél komolyabb problémát vet fel a kitörések eloszlása az égbolton. A standard kozmológia szerint [Weinberg, S., 1972], [Peebles, P. J. E., 1993], [Peacock, J. A., 2010] a Világegyetem nagy skálán homogén és izotróp. Mivel a gammakitörések átlagos távolsága több ezer megaparsek, ezért a térbeli eloszlásukat homogénnek és izotrópnak kell, hogy megfigyeljük, illetve az égbolton levő eloszlásukat véletlenszerűnek várjuk. Dolgozatomban kilencedik fejezetében ezzel, és az ezzel kapcsolatban felmerülő problémákkal foglalkoztam. A következő oldalakon a téziszfüzetem fejezetei olvashatók.

A kutatások előzménye

Az 1960-as években korszakos felfedezések történtek a csillagászatban: ekkor fedezték fel például a kvazárokat, a röntgensillagokat, a kozmikus háttérsugárzást, a pulzárokat, valamint a gammakitöréseket. A felsoroltak közül ez utóbbiak a legrejtélyesebbek, melyek eredetét a mai napig nem sikerült minden kétséget kizáróan megmagyarázni [Zhang, B., et al., 2007], [Woosley, S., 2012]. Dolgozatomban e jelenségekhez kapcsolódó eredményeimet foglalom össze.

A gammakitöréseket a Vela katonai műholdak fedezték fel [Klebesadel, R. W., Strong, I. B. and Olson, R. A., 1973]. A felfedezést először az IMP-6 [Cline, T. L., Desai, U. D., Klebesadel, R. W. and Strong, I. B., 1973], majd az OSO-7 műhold műszere erősítette meg [Wheaton, W. A., et al., 1973]. Az ezt követő években több tervezett műholdra és műbolygóra is szereltek gammadetektorokat. Mivel a gammavillanások eredete tisztázatlan volt, elsődleges fontossággal bírt a lehetséges források pontos helyének meghatározása. Ez akkoriban csak három egymástól távoli detektor megfigyelése esetén volt lehetséges [Atteia, J-L., et al., 1987]. Az úgynevezett első bolygóközi hálózat 1978 és 1980 között működött. Megfigyelték a gammakitöréseket, majd háromszögelési módszerrel meghatározták a források irányát. A forrásokat azonban még a legnagyobb távcsövekkel sem sikerült optikailag azonosítani.

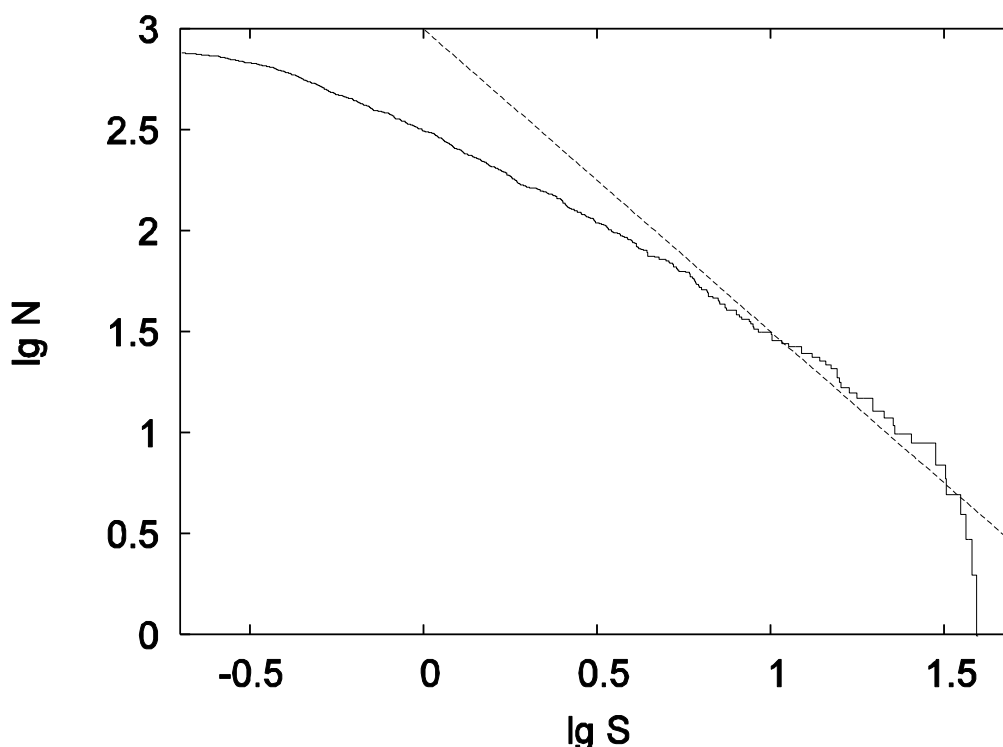
A NASA négy nagy megfigyelő műholdja közül a Compton Gamma Űrobszervatórium (Compton Gamma Ray Observatory, CGRO) a gammatartományt figyelte meg [Fishman, G. J., et al., 1994] 1991 áprilisa és 2000 júniusa között. Az űrobszervatórium kilenc éves működése alatt ötször annyi gammakitörést figyelt meg, mint az összes többi űreszköz a megelőző két évtizedben, és kiváló homogén statisztikai mintát szolgáltatott a gammakitörések vizsgálatához [Briggs, M. S., et al., 1996]. A jelenség

fizikájának a megértéséhez fontos lett volna a kitörések távolságának a meghatározása. Vajon egyféle mechanizmus működteti az összes gammakitörést, vagy többfajta? A források hozzávetőleges távolságának ismerete nélkül azt sem lehetett tudni, mekkora a teljes kibocsájtott energia.

A CGRO egyik fontos eredménye volt, hogy a kitörések eloszlása az égbolton véletlenszerű. Ez az eredmény – a látszó fényesség szerinti eloszlással összevetve – arra utalt, hogy a kitörések nem a galaxisunkban, hanem sokkal messzebb, extragalaktikus távolságokban vannak [Fishman, G. J. and Meegan, C. A., 2012]. Ennek direkt igazolását a holland-olasz együttműködésben felbocsájtott Beppo-SAX műholdnak köszönhetjük [Costa, E., et al., 1997]. A gammasugárzás után megfigyelt röntgensugárzás alapján – a felvillanás után néhány órával – pontos koordinátával szolgáltak, mely felhasználásával a nagy földi távcsövekkel sikerült a forrásokat optikailag azonosítani [Djorgovski, S. G., et al., 1997], [Greiner, J., 2012]. A források nagyon távoliak, vöröseltolódásuk tipikusan $z = 1$ -nél nagyobb, ezért általában nagyon halványak. Maga a kitörés utófénye az optikai tartományban általában csak napokig követhető.

Az 1. ábra közel ezer gammakitörés látszó fényesség szerinti eloszlását illusztrálja [Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A., 1996]. A grafikonon látható görbe azt jelzi, hogy hány kitörést figyeltünk meg adott idő alatt, amely az adott fényességnél (S) fényesebb volt.

Statikus euklideszi térben, homogén eloszlás esetén, mint az ismeretes, egy körülbelül $-1,5$ meredekségű egyenest (szaggatott vonal az ábrán) kell kapnunk a log-log ábrán. Ez csak a fényes gammakitörésekre igaz [Fishman, G. J., et al., 1994]. A megfigyelt görbe ettől eltér, a kumulatív görbe bal oldala laposabb, azaz kevesebb halvány kitörést észleltek, mint vártak. A halvány kitörések hiányára próbálhatunk magyarázatot találni, például valamilyen elnyeléssel.



1. ábra. A Compton Gamma Űrobszervatórium által a '90-es évek elején megfigyelt több száz gammakitörés fényességeloszlása. A vízszintes tengelyen a fényesség foton/cm²/s egységben vett értékének a logaritmus van ábrázolva.

A „mínusz másfeles törvény” viszont csak statikus euklideszi tér esetén igaz. Világunk azonban nem ilyen, hiszen tágul [Einstein, A., 1916], [Hubble, E., 1929]. A kozmológiai megoldások ([Friedmann, A., 1922], [Walker, A. G., 1936], [Weinberg, S., 1972], [Peebles, P. J. E., 1993]) valóban megmagyarázhatják a mért $\log N - \log S$ eloszlást [Cohen, E. and Piran, T., 1995], [Fenimore, E. E. and Bloom, J. S., 1995], [Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A., 1996], azonban ehhez a kitörések forrásait kozmológiai távolságba kell helyeznünk. Ezt az elképzelést már a hetvenes években felvetették [Usov, V. V. and Chibisov, G. V., 1975], [Prilutskii, O. F. and Usov, V. V., 1975], de csak Paczynski későbbi cikke [Paczynski, B., 1986] után vették komolyan.

A különböző kozmológiai modellekben, a már említett cikkünkben [Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A., 1996], illesztéseket végeztünk a gammakitörések fényességeloszlására. Több kozmológiai modellben természetes módon magyarázatot nyert a halvány gammakitörések hiánya. Ezt az eredményt még a Beppo-SAX műhold felfedezése előtt közzétettük.

Ez esetben viszont a gammakitörések százezerszer messzebb vannak, mintha a galaktikus neutroncsillagok lennének a források. Ez több milliárdszor nagyobb abszolút fényességet jelent. Ilyen energiakibocsájtást neutroncsillag nem tud produkálni (kivéve két neutroncsillag ütközése). Az ezredforduló környékén körülbelül évente 4-8 gammakitörés forrását, illetve ennél még kevesebb anyagagalaxist sikerült azonosítani, ezért fontos volt ezek számának lényeges növelése.

E célból bocsájtotta fel 2004 novemberében a NASA a Swift műholdat [Gehrels, N., et al., 2004]. A neve a fürgeségre utal, és a műhold valóban nagyon gyorsan rá tud fordulni a megfigyelt objektumra. Működése során sok rekordert fedezett fel, ennek eredményeképpen többször is a Világegyetemünk legtávolabbi akkor ismert objektuma egy gammakitörés volt.

A megfigyelések kimutatták a gammakitörések Ic típusú szupernóvákval való kapcsolatát [Galama, T. J., et al., 1999], [Hjorth, J. and Bloom J. S., 2012]. Ezután nagy fejlődésnek indultak az úgynevezett kollapszár vagy hipernóva modellek, melyek nagy tömegű (30-40 naptömeg) csillagok egyik lehetséges végállapotát írják le (például [MacFadyen, A. I., Woosley, S. E. and Heger, A., 2001], [Woosley, S. E. and Heger, A., 2015]). A gyorsan forgó csillag a fúziós energiatermelés leállásával összeroppan, a gyors forgás miatt azonban csak a csillag belső része tud fekete lyukká összeroppanni, a külső részek tovább forognak, és lassabban spiráloznak be a központi részbe. A modellszámítások szerint e folyamat időskálája 20-50 másodperc, ami megegyezik a tipikus hosszú kitörések idejével.

Elveket felállítani a gammakitörések osztályozására azonban hosszú évtizedek alatt sem sikerült [Zhang, B., et al., 2007]. Az egyetlen jellemző, amiben szabályosság mutatkozik, az a kitörések időbeli hosszának az eloszlása. Az eloszlás bimodális [Kouveliotou, C., et al., 1993] és a két komponens lognormális eloszlású [McBreen, B., Hurley, K. J., Long, R. and Metcalfe, L., 1994], [1]. Az utóbbi 10-15 évben az érdeklődés középpontjába került a kérdés, hogy fizikailag is különbözőek-e a rövid és hosszú kitörések, illetve, hogy létezik-e harmadik típusú gammakitörés [1], [Mukherjee, S., et al., 1998], [Hakkila, J., et al., 2000], [Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R., 2001], [2], [Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002], [3], [Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Mészáros, P., 2003], [4], [Hakkila, J., et al., 2003], [5], [6], [7], [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007], [8], [9], [10], [11], [Ripa, J., et al., 2009], [12], [13], [14], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012], [Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T., 2014], [Tsutsui, R. and Shigeyama, T., 2014], [Tarnopolski, M., 2015], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015].

A rövidebb (2 másodpercnél kevesebb ideig tartó) kitörésekre egy másik modell, a kompakt kettősök összeolvadása igyekszik magyarázatot adni (például [Mészáros, P., 2006], [Wanderman, D. and Piran, T., 2015]). A kettős neutroncsillagok (vagy egy fekete lyuk–neutroncsillag-kettős), ha közeli pályán keringenek egymás körül, akkor a gravitációs sugárzás miatt egyre közelebb kerülnek egymáshoz. Végül összeütköznek és ezredmásodpercek alatt az energiájuk nagy részét kisugározzák.

Jelenleg az az elfogadott nézet, hogy a hosszú gammakitörések nagy tömegű csillagok végső fellángolásai, a rövid kitörések pedig szoros kettősök összeolvadásának az eredményei [Woosley, S., 2012]. Fontos tehát a gammatartományban megfigyelt kitöréssparaméterek elemzése, hogy megállapíthassuk, hányféle típusa létezik e jelenségnek. Kérdés, hogy a jelenleg leginkább elterjedt két fizikai modell jól írja-e le a hosszú és a rövid gammakitöréseket, és azok mért jellemzőit. További kérdés, hogy a mért adatokból következtethetünk-e további osztályokra vagy alosztályokra.

Kandidátusi értekezésem [Horváth, I., 1997] benyújtása után pár évvel alakult meg a magyar gammakitörés-csoport (magyar és nem magyar állampolgárságú magyarok részvételével), mely azóta is aktívan működik. A csoport tagjainak témavezetésével hat TDK, hét diploma- és két PhD értekezés készült, melyek közül jómagam három TDK, négy diplomamunka, és egy PhD értekezés témavezetője voltam.

A csoport egyik tagja, Balázs Lajos, 2004-ben adta be az MTA doktora cím elnyerésére a dolgozatát [Balázs, L. G., 2004], melyet sikeresen megvédett. Éppen ezért fontos annak kiemelése, hogy a 2004 előtti közös publikációink nem kapcsolódnak a tézispontjaimhoz (a 2004 előtről felhasznált cikkeim mind egyszerűzősek). Az azóta írt 84 gammakitöréssel kapcsolatos publikációból pedig értelemszerűen egy sem mutat átfedést Balázs Lajos 2004-ben beadott dolgozatának téziseivel.

Célkitűzések

Két évtizede a kozmológia terén végzett kutatómunkám a gammakitörések irányába fordult [Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A., 1996]. Azóta több gammakitörésekkel kapcsolatos egyéb problémával is foglalkoztam [Balázs, L. G., Mészáros, A. and Horváth, I., 1998], [Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Vavrek, R., 1999], [Mészáros, A., et al., 2000], [Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Mészáros, P., 2003], [Bagoly, Z., et al., 2003], [Horváth, I., Norris, J. P., Scargle, J. D. and Balázs, L. G., 2005], [Bagoly, Z., et al., 2006] [Mészáros, A., Bagoly, Z., Balázs, L. G. and Horváth, I., 2006], [Veres, P., et al., 2006], [Vavrek, R., Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Bagoly, Z., 2008], [Bagoly, Z., et al., 2009], [Balázs, L. G., Horváth, I. and Veres, P., 2009], [Greiner, J., et al., 2009], [Balázs, L. G. and Horváth, I., 2010], [Balázs, L. G., et al., 2010], [Perez-Ramirez, D., et al., 2010], [Veres, P., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Balázs, L. G., 2010], [Horváth, I., 2011], [Balázs, L. G., et al., 2012], [Kóbori, J., Bagoly, Z., Balázs, L. G. and Horváth, I., 2013], [Szécsi, D., Bagoly, Z., Kóbori, J., Horváth, I. and Balázs, L. G., 2013], [Balázs, L. G., et al., 2015], [Horváth, I. and Tóth, B. G., 2016]. Mindig is fontosnak tartottam a gammakitörések osztályozásának a problémáját, mivel az elméleti modellek szempontjából fontos lenne

tudni, hogy hányfajta mechanizmus okozhatja ezt a jelenséget [1], [Hakkila, J., et al., 2000] [Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R., 2001], [2], [Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P., 2002], [3], [Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Mészáros, P., 2003], [4], [5], [6], [7], [Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M., 2007], [8], [9], [10], [11], [Ripa, J., et al., 2009], [12], [13], [14], [Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H., 2012], [Tsutsui, R. and Shigeyama, T., 2014], [Tarnopolski, M., 2015], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015], [Tarnopolski, M., 2016].

A kitörések osztályozását az azonnali, tehát a gammatartományban történt kisugárzásuk adatait felhasználva végeztem. A kilencvenes években ez főleg a Compton Gamma Űrobszervatórium adatainak a feldolgozását jelentette. Dolgozatomban megvizsgálok ezeket az adatokat abból a szempontból, hogy a kitörések osztályozása által milyen következtetéseket lehet levonni belőlük [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Az évek során több, gammakitöréseket megfigyelő műhold kezdett el működni. Ezek újabb független, egyenként homogén adatsort szolgáltatottak a kérdéskör tudományos vizsgálatához. Bár a Beppo-SAX műhold már évek óta nem üzemel, a megfigyelési mintát csak 2008-ban publikálták [Frontera, F., et al., 2009]. A Swift műhold első katalógusát szintén 2008-ban tették közzé [Sakamoto, T., et al., 2008]. Dolgozatomban megvizsgáltam ezen adatsorokat is, hogy a különböző statisztikus módszerek milyen választ adnak a kitörések osztályozásával kapcsolatos kérdésekre [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14].

További érdekes probléma, hogy a különböző műszerek által mért adatokból következtetett kitöréscsoportok hogyan viszonyulnak egymáshoz, ezért megvizsgáltam, hogy a kitörések különböző csoportjainak paraméterei hogyan viszonyulnak egymáshoz más megfigyelő műszer esetén [11], [12], illetve hogy a különböző műszerek ugyanazt a csoportstruktúrát látják-e [11], [12]. Azonosság esetén feltehetőleg a vitatott harmadik típusú kitörések léte fizikailag is reális [13], [14]. A hosszú gammakitöréseket a legalább harminc naptömegű csillagok végső fellángolásainak gondoljuk, a rövid gammakitörések forrásainak pedig a kompakt kettősök összeolvadását [Woosley, S., 2012]. A hosszú (3-5 másodpercnél hosszabb) kitörések kollapszár modelljéből néhány tucat másodperc hosszúságú gammafellángolás adódik, mely jól egyezik a megfigyelésekkel. Két neutroncsillag összeolvadása viszont csak pár ezredmásodpercig tart, ami meg se közelíti a megfigyelt 0,3-2 másodpercet.

A kutatók egy része arra a kényelmes álláspontra helyezkedik, hogy két típust figyelünk meg és kétféle modell van, tehát nagyjából értjük a mechanizmusokat. Ez közel sincs így, hiszen például termikus spektrális komponenst mára már sok kitörés esetében kimutattak ([Ryde, F. et al., 2011], [Ahlgren, B., Larsson, J., Nymark, T., Ryde, F. and Pe'er, A., 2015]), míg ennek létezését évtizedekig nem ismerte el a kutatóközösség. Emellett további modellek is vannak, például az úgynevezett ágyúgolyó modell [Dado, S., Dar, A. and De Rújula, A., 2009], [Dado, S. and Dar, A., 2013]. A kutatásaim egyik célja éppen ezért különböző osztályok kimutatása a megfigyelt adatokban. Egy harmadik csoport létét az irodalom egy része mára már elismeri [Koen, C. and Bere, A., 2012], [Tsutsui, R. and Shigeyama, T., 2014], [Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R., 2015], [Arkhangelskaja, I. V., 2016], ez pedig arra utal, hogy vagy van a másik két mechanizmustól különbözőképpen működő belső motor, vagy valamelyik eddig kidolgozott mechanizmus tud többféleképpen is működni.

A gammakitörések égbolton való eloszlását is több évtizede vizsgálják [Briggs, M. S., et al., 1996], [Tegmark, M., Hartmann, D. H., Briggs, M. S. and Meegan, C. A., 1996]. A '80-as és '90-es években fontos volt tudni a források távolságának a vizsgálata során, hogy egyenletesen oszlanak-e el az égbolton. Ez esetben ugyanis valószínűsíthető

volt, hogy a kitörések extragalaktikusak. A '90-es évek első felében bebizonyosodott az izotróp eloszlás [Meegan, C. A., et al., 1992], [Briggs, M. S., et al., 1996]. Ezt néhány évvel követte a kitörések utófényének a felfedezése [Costa, E., et al., 1997]. Mivel a kozmológiai modellek egyenletes égbolteloszlást követelnek, és ezt meg is figyeltük, a téma nem vonzotta különösen a kutatókat, bár természetesen születtek további publikációk a témában (például [Litvin, V. F., Matveev, S. A., Mamedov, S. V. and Orlov, V. V., 2001], [Magliocchetti, M., Ghirlanda, G. and Celotti, A., 2003]). Viszont ha van egy gammakitörés-alcsoport, amely átlagosan közelebb helyezkedik el hozzánk, ennek hatása esetleg kimutatható az égi eloszlásban, ezért a gammakitörések égi eloszlását érdemes az új adatok esetén is rendszeresen megvizsgálni.

Bár több ezer gammakitörést figyeltünk már meg, csak ezek töredékénél sikerült a vöröseltolódást, és így a távolságot megmérni. A 2010-es évek elején az ismert távolságú gammakitörések száma meghaladta a kétszázat. Érdemes tehát a valódi térbeli eloszlásukat is megvizsgálni. Bár az átlagos távolságuk meghaladja a legnagyobb méretű ismert struktúrák nagyságát, tudományos szempontból az elméleti megfontolások helyességének az ellenőrzése mindig ajánlott [15], [16], [17], [18].

Új tudományos eredmények

1. Megvizsgáltam a BATSE katalógusokban publikált, a CGRO által megfigyelt gammakitörések adatait. A 3B katalógus 797 gammakitörés időtartamainak eloszlására megmutattam, hogy a háromkomponensű eloszlás szignifikáns javulás a kétkomponensűhöz képest. A szignifikancia 99,98% volt [1]. Miután a CGRO küldetése véget ért, publikálták a végleges BATSE katalógust. A katalógusban szereplő 1929 gammakitörés időtartameloszlását megvizsgáltam maximum likelihood módszer használatával. Megmutattam, hogy a háromkomponensű eloszlás szignifikáns javulás a kétkomponensűhöz képest. A szignifikancia 99,5% [2], [3]. Ezt a szignifikanciát Monte-Carlo szimulációval is igazoltam [2]. Megmutattam továbbá, hogy a három komponens (három csoport) tipikus időtartamai 0,5 másodperc (rövid kitörések, a logaritmikus szórás 0,53), 4,3 másodperc (közepes időtartamú kitörések, a logaritmikus szórás 0,20) és 35 másodperc (hosszú kitörések, a logaritmikus szórás 0,42) [2].

(A kitörések adatainak a vizsgálata fontos a működési mechanizmusuk megértéséhez. Az adatokban megnyilvánuló csoportosulás jellemzően a fizikai mechanizmusok különbségére utal. A jelenlegi felfogás szerint a hosszú kitörések összeomló csillagok magjából lövellnek ki, míg a rövid kitörések szoros kettősök végállapotaiban keletkeznek. Egy harmadik csoportot vagy egy harmadik mechanizmus működtet, vagy az előző kettő valamelyikének egy módosított változata.)

2. Az irodalomban többen is sokdimenziós statisztikai analízist alkalmazva vizsgálták a gammakitörés-adatokat [Mukherjee, S., et al., 1998], [Hakkila, J., et al., 2000]. Mint azt 1998-ban megmutattuk [Bagoly, Z., et al., 1998] a gammakatalógusban megfigyelt adatok (időtartam, fluencia és csúcsfényesség, összesen 9 adat) 2 főkomponenssel jellemezhetők. Így a probléma valószínűsíthetően kétdimenziós. (Később Ba-

goly, Z., et al., 2009 öt főkomponenst talált, mivel újabb, a „fénygörbéből” számolt változókat is használt, de csak a fényes kitörésekre. Jelen elemzést a teljes mintára végeztem el, ezért Bagoly, Z., et al., 1998 megállapításai a mérvadóak.) Azt is megmutattuk, hogy az első főkomponens lényegében a T_{90} nevű időtartam változó [Bagoly, Z., et al., 1998]. A gammakitörések gammaspektruma a spektrum egy jelentős tartományában hatványfüggvénnyel jellemezhető, így a spektrumot jól jellemző egyik adat a BATSE táblázatokban megadott fluenciaadatok hányadosa. Ezek közül az irodalomban a H32 a legelterjedtebb (spektrális keménység).

2.1 Ezekre az eredményekre támaszkodva a problémát kétdimenziósként kezelve megmutattam, hogy az időtartam – keménység adatsíkon a harmadik csoport léte nagyobb szignifikanciával azonosítható a BATSE mintán [5], [6], mintha csak az időtartam adatokat használnánk [2].

2.2 Jól ismert, hogy a rövid kitörések keményebb spektrummal rendelkeznek (nagy energián relatíve többet sugároznak), mint a hosszú kitörések. Megmutattam, hogy a közepes kitörések spektruma a leglágyabb, így bár az időtartamuk a két főtípus közötti, a spektrumuk nem. [4], [5], [6]

2.3 Bár a rövid kitörések tipikusan keményebb spektrumúak, sem a rövid kitöréseknél, sem a hosszú kitöréseknél nincs korreláció a két változó (időtartam és spektrális keménység) közt. A közepes csoportnál antikorrrelációt mutattam ki az időtartam és spektrális keménység között. [6], [7]

3. A 2008-ban publikált BAT katalógus [Sakamoto, T., et al., 2008] 222 kitörést tartalmazó adatait felhasználva megmutattam, hogy a kétkomponensű eloszlás 12 nagyságrenddel valószínűbb eloszlás, mint az egykomponensű [8], [9]. Ugyanezen adatsort felhasználva megmutattam, hogy a háromkomponensű eloszlás szignifikáns javulás a kétkomponensűhöz képest. A szignifikancia 99,54% [9]. A szignifikanciát Monte-Carlo szimulációval is igazoltam. 1000 szimulációval a szignifikancia 99,2% [9]. Kimutattam, hogy a Swift katalógusban a rövid kitörések részaránya körülbelül 8% [9], [12], ellentétben a BATSE-nál talált két-, két és félszer nagyobb populációval. Ennek természetes magyarázata az, hogy a Swift a nagy energiás fotonokra kevésbé érzékeny, mint a BATSE.

4. A Beppo-SAX műhold 2008-ban publikált [Frontera, F., et al., 2009], 1003 kitörésre vonatkozó adatsorát felhasználva ezen adatokban is kimutattam a közepes időtartamú gammakitörés alcsoportot. [10]

5. Megvizsgáltam az időtartam – keménység adatsíkon a Swift műhold által megfigyelt kitörések eloszlását. Megállapítottam, hogy különböző számú csoportok illesztése esetén három csoport illesztése lényegesen jobb, mint két csoporté. A szignifikancia $1 \cdot 10^{-8}$ [13]. Megállapítottam, hogy egy negyedik csoport feltételezésével végzett illesztés nem hoz szignifikáns javulást [13]. Megállapítottam, hogy az időtartam – keménység síkon a három csoport hasonló elhelyezkedést mutat a CGRO által megfigyelt kitörések adataihoz. A rövid kitörések a legkeményebbek, a hosszú kitörések kevésbé kemények, és a közepes időtartamú harmadik csoport kitörései rendelkeznek a leglágyabb spektrummal. [11], [13]

6.1 Az 5. tézispontban említett, a Swift műhold megfigyeléseire elvégzett csoportosítás alapján megvizsgáltam a három különböző gammakitörés-csoport távolságának (vöröseltolódásának) eloszlását. A már az irodalomból ismert tényen kívül, hogy a rövid kitörések lényegesen közelebb vannak, mint a hosszú kitörések, azt találtam, hogy

a közepes időtartamú harmadik csoport tagjai messzebb vannak, mint a rövid kitörések, de közelebb vannak, mint a hosszú kitörések. Ez is arra utal, hogy a közepes kitörések külön osztályt alkotnak. [13], [14]

6.2 A Swift műholdnak az 5. tézispontban említett, osztályozott adatait felhasználva megvizsgáltam az Amati-relációt a közepes kitöréscsoport esetén. A közepes kitöréscsoport tagjai illeszkednek a hosszú kitörések által követett Amati-relációra. [13]

6.3 Megmutattam, hogy a hosszú kitörések századik másodpercben mért optikai luminozitás értéke a közepesekével összehasonlítva nem mutat szignifikáns eltérést, a szignifikancia 89%. A két csoportnak a tízezredik másodpercben mért optikai luminozitása 96,7%-ra szignifikánsan eltér egymástól. [14]

(Több más paramétert megvizsgálva vegyes eredmény adódott. Voltak változók melyek esetén nem találtam szignifikáns eltérést. Viszont [Veres, P., 2011] kimutatta, hogy a három kitöréscsoport röntgenluminozitása szignifikánsan különbözik egymástól. További vizsgálatokból illetve a modellek részleteiből derülhet ki, hogy a központi motor, vagy esetleg a környezet különbözősége okozhatja az eredetileg esetleg hasonló gammakitörések különbözőségét a megfigyelt adatokban.)

7. A BATSE 1B katalógus [Fishman, G. J., et al., 1994] publikálása óta ismerjük a gammakitörések égi eloszlását. Ez az eloszlás az égbolton egyenletes [Briggs, M. S., et al., 1996], ill. csak a lefedési függvényt követi [Tegmark, M., Hartmann, D. H., Briggs, M. S. and Meegan, C. A., 1996]. Ebben a témában csoportunk is több cikket publikált, például [Balázs, L. G., Mészáros, A. and Horváth, I., 1998], [Mészáros, A., Bagoly, Z., Horváth, I., Balázs, L. G. and Vavrek, R., 2000], [Vavrek, R., Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Bagoly, Z., 2008]. Az elmúlt években e vizsgálatok keretében megmutattam, hogy a $z = 1,6$ és $z = 2,1$ közötti tartományban komoly anomália tapasztalható a kitörések égbolton levő eloszlásában. 2013-ban az addig ismert távolságú 283 gammakitörés égi eloszlását elemeztem. Ezekkel kapcsolatosak a következő eredményeim.

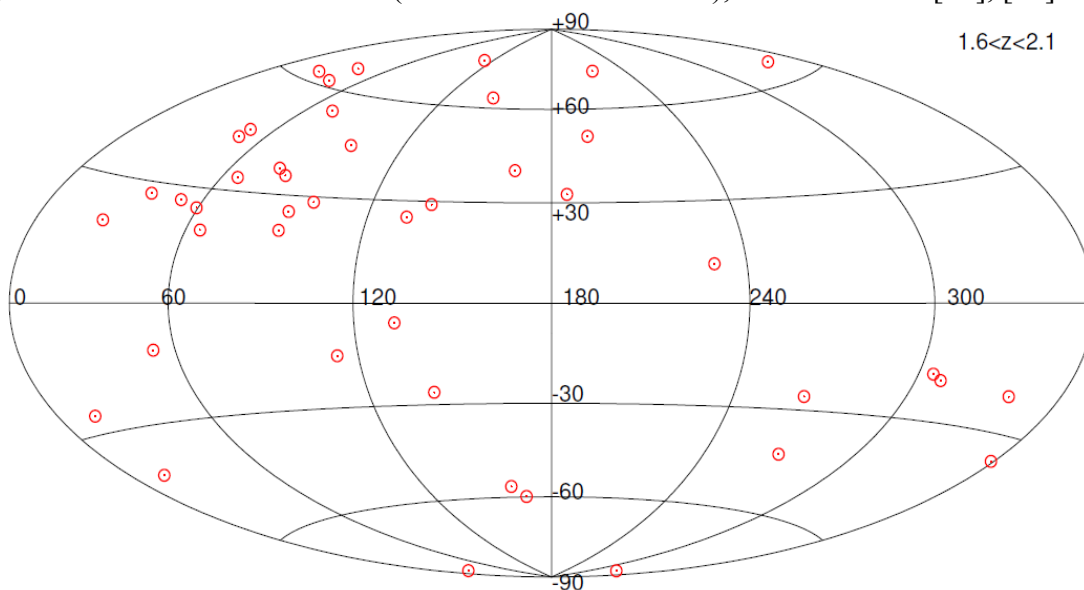
7.1 A Peacock által [Peacock, J. A., 1983] bevezetett kétdimenziós Kolmogorov–Szmirnov próbát használva az $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású 31 gammakitörés égi eloszlását összehasonlítottam más távolságban levő 31 gammakitörés égi eloszlásával. A többi nyolc távolságosztályba sorolt kitörések égi eloszlása egymástól nem tért el szignifikánsan, míg az $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású távolságosztályba tartozó 31 gammakitörés szignifikánsan eltért a nyolcból hat másik osztálybeli kitörések égi eloszlásától. [15], [16]

7.2 A k -adik legközelebbitárs-eloszlásokat is összehasonlítottam (Kolmogorov–Szmirnov próbát használva) a különböző távolságosztályoknál. A vizsgált kilenc távolságosztályból nyolc nem mutatott statisztikusan szignifikáns eltérést az égen való izotróp eloszlástól. Az $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású osztály esetén az 5. és a 22. legközelebbi társ között az összes esetben szignifikáns csoportosulást mutattam ki. A szignifikancia a 15-19. társ esetén volt a legnagyobb. [15], [16]

7.3 Pont-sugár módszerrel megvizsgálva a 31 darab $z \sim 2$ vöröseltolódású gammakitörést szignifikáns eltérést tapasztaltam az izotróp égi eloszlástól. A kapott szignifikancia többször meghaladta a 99,5%-ot. Az égbolt kb. egynegyedén helyezkedett el a 31 kitörésből 19-20 (a kitörések 61-65 százaléka). [15], [16]

7.4 A 2013 novemberéig ismert vöröseltolódású 361 gammakitörés közül 44 esett az $1,6 < z < 2,1$ vöröseltolódású tartományba (égi eloszlásukat mutatja a 2. ábra). Pont-sugár módszerrel megvizsgálva a 44 darab $z \sim 2$ vöröseltolódású gammakitörést, szignifikáns eltérést tapasztaltam az izotróp égi eloszlástól. A kapott szignifikancia a teljes égbolt 3,75%-ától a 18,75%-áig tartó tartományban mindig (12 méret esetén foly-

tonosan) meghaladta a 99,87%-ot. Az égbolt kevesebb mint 4%-án helyezkedett el a 44 kitörésből 13 (a kitörések 30 százaléka), illetve az égbolt kevesebb mint 19%-án helyezkedett el a 44 kitörésből 25 (a kitörések 57 százaléka), lásd a 2. ábrát. [17], [18]



2. ábra. Az első 361 ismert távolságú gammakitörésből 44 vöröseltolódása esett az $1,6 < z < 2,1$ tartományba. Az ábra ezen kitörések égbolton való elhelyezkedését mutatja galaktikus koordinátarendszerben.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] Horváth I: A Third Class of Gamma-Ray Bursts? *ASTROPHYSICAL JOURNAL*, Volume 508, pp. 757-759. (1998)
- [2] Horváth I: A Further Study of the BATSE Gamma-Ray Bursts Duration Distribution. *ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS*, Volume 392, pp. 791-793. (2002)
- [3] Horváth I: Likelihood estimation of gamma ray bursts duration distribution. In: Eric D Feigelson, G Jogesh Babu (szerk.) *Statistical challenges in astronomy. Third Statistical Challenges in Modern Astronomy (SCMA III) Conference*. Pennsylvania, Egyesült Államok. New York: Springer, pp. 439-441. (2003)
- [4] Horváth I, Mészáros A, Balázs LG, Bagoly Z: The duration-hardness joint distribution suggests three subgroups of GRBs. In: Feroci M (szerk.) *Proceedings of the Third Rome Workshop on Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: Rome, Olaszország*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, pp. 82-85. *ASP Conference Series*, Volume 312, (2004)
- [5] Horváth I, Mészáros A, Balázs LG, Bagoly Z: Where is the Third Subgroup of Gamma-Ray Bursts? *BALTIC ASTRONOMY*, Volume 13, pp. 217-220. (2004)
- [6] Horváth I, Balázs LG, Bagoly Z, Ryde F, Mészáros A: A new definition of the intermediate group of gamma-ray bursts. *ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS*, Volume 447, pp. 23-30. (2006)

-
- [7] Horváth I, Ryde F, Balázs LG, Bagoly Z, Mészáros A: Properties of the intermediate type of gamma-ray bursts. AIP Conference Proceedings Volume 836, pp. 125-128, Gamma-Ray Bursts in the Swift Era, Sixteenth Maryland Astrophysics Conference, held in Washington, DC. Edited by S.S. Holt, N. Gehrels and J.A. Nousek. (2006)
- [8] Horváth I, Balázs LG, Bagoly Z, Kelemen J, Veres P, Tusnády G: Analysis of the Swift Gamma-Ray Bursts duration. In: Huang, Dai, Zang (szerk.) Nanjing Gamma-Ray Burst Conference. Nanjing, Kína, Melville: AIP, pp. 67-70. (2008)
- [9] Horváth I, Balázs LG, Bagoly Z, Veres P: Classification of Swift's Gamma-Ray Bursts. ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, Volume 489, pp. L1-L4. (2008)
- [10] Horváth I: Classification of BeppoSAX's gamma-ray bursts. ASTROPHYSICS AND SPACE SCIENCE, Volume 323, pp. 83-86. (2009)
- [11] Horváth I, Balázs LG, Veres P: Gamma-ray Burst Groups Observed by Different Satellites. In: Charles Meegan, Chryssa Kouveliotou, Neil Gehrels (szerk.) Gamma-Ray Burst: Sixth Huntsville Symposium. Huntsville, Egyesült Államok. New York: AIP, pp. 412-414. AIP Conference Proceedings Volume 1133, (2009)
- [12] Horváth I, Veres P, Balázs LG: The Third Group of Gamma-ray Bursts in the Swift and BATSE Data. BALTIC ASTRONOMY, Volume 18, pp. 302-304. (2009)
- [13] Horváth I, Bagoly Z, Balázs LG, de Ugarte Postigo A, Veres P, Mészáros A: Detailed Classification of Swift's Gamma-ray Burst. ASTROPHYSICAL JOURNAL, Volume 713, Issue 1, pp. 552-557. (2010)
- [14] de Ugarte Postigo A, Horváth I, Veres P, Bagoly Z, Kann DA, Thöne CC, Balázs LG, D'Avanzo P, Aloy MA, Foley S, Campana S, Mao J, Jakobsson P, Covino S, Fynbo JPU, Gorosabel J, Castro-Tirado AJ, Amati L, Nardini M: Searching for differences in Swift's intermediate GRBs. ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, Volume 525, id.A109, 17 pp. (2011)
- [15] Horváth I, Hakkila J, Bagoly Z: The largest structure of the Universe, defined by Gamma-Ray Bursts. 7th Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, GRB 2013: paper 33 in eConf Proceedings C1304143 (2013)
- [16] Horváth I, Hakkila J, Bagoly Z: Possible structure in the GRB sky distribution at redshift two. ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, Volume 561, id.L12, 4 pp. (2014)
- [17] Horváth I, Bagoly Z, Hakkila J, Tóth LV: Anomalies in the GRB spatial distribution. Swift: 10 Years of Discovery. Conference paper. La Sapienza University, Rome, Italy. paperID: PoS(SWIFT 10)078. (2015)
- [18] Horváth I, Bagoly Z, Hakkila J, Tóth LV: New data support the existence of the Hercules-Corona Borealis Great Wall. ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, Volume 584, id.A48, 8 pp. (2015)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az, hogy tudományos pályára léptem, elsősorban családomnak, még pontosabban szüleimnek köszönhető. Köszönettel tartozom tanárainknak is ezzel kapcsolatban, különösen általános iskolai matematikatanár osztályfőnökömnek, Balla Bélának és gimnáziumi matematikatanáromnak, Mucsa Jánosnak. Tudományos pályámon való elindulásomat elsősorban Lukács Bélának (doktori témavezetőmnek) és Paál Györgynek köszönhetem. Később kerültem kapcsolatba Mészáros Péterrel és a gammakitörések kutatásával. Ezután Bagoly Zsolt, Balázs Lajos és Mészáros Attila csatlakozásával megalakult egy magyar gammakitöréseket kutató csoport, melyet többek között az OTKA is rendszeresen támogat (OTKA számok: F029461, T034549, T048870, K077795, NN111016). E csoport bővült ki az évek során Tusnády Gáborral, Veres Péterrel, Szécsi Dorottyaival, Kóbori Józseffel és nemrégiben Tóth L. Viktorral valamint Rácz Istvánnal. Az elmúlt 19 évben főleg e csoport tagjaival együtt kutattam és publikáltam. Köszönöm nekik az együttműködést, a segítséget, amit nyújtottak és azt a sok dolgot, amit tőlük tanultam.

A külföldi kollégák közül a következőknek tartozom köszönettel: David Band, Michael Briggs, Ed Fenimore, Jon Hakkila, Jay Norris, John Nousek, David Palmer, Robert Preece, Antonio de Ugarte Postigo és Bing Zhang.

Köszönettel tartozom munkahelyemnek az NKE Hadtudományi és Honvédtisztképző Karának, amely szintén támogatta e dolgozat megírását. Külön köszönet illeti a Matematika Fizika és a Természettudományi Tanszék dolgozóit. A dolgozat megírása közben szakmai segítséget a fent említett gammakitörés-csoport tagjaitól kaptam, amit külön köszönök. A dolgozat javításában rajtuk kívül segítségemre volt még: Árvai-Homolya Szilvia, Hanka László, Horváth Tamás, Horváth Zsuzsa, Kovács András, Nagy Imre, Pintér Sándor, Rácz István (MTA, WFK), Rácz István (ELTE, TTK), Szécsi Dorottya, Székely Gergely és Tóth Bence. Néhány gammafénygörbe elkészítéséért Varga Balázs diplomamunkásomat illeti köszönet.

Fontos megemlíteni azt a lelki támogatást, amit családomtól kaptam, amit ezúton is köszönök. Dolgozatomat két igen kedves elhunyt kollégám, valamint az időközben szintén eltávozott édesapám emlékének ajánlom.

A dolgozat elkészültét az OTKA K077795 és NN111016 program valamint az MTA Bolyai Ösztöndíja is támogatta.

HIVATKOZÁSJEGYZÉK

- Abdo, A. A., et al.: A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects. *Nature*, Volume 462, pp. 331-334. (2009)
- Ahlgren, B., Larsson, J., Nymark, T., Ryde, F. and Pe'er, A.: Confronting GRB prompt emission with a model for subphotospheric dissipation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 454, Issue 1, pp. L31-L3. (2015)
- Akaike, H.: A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Volume 19, pp. 716-723. (1974)
- 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)
- Amati, L., Della Valle, M., Frontera, F., Malesani, D., Guidorzi, C., Montanari, E. and Pian, E.: On the consistency of peculiar GRBs 060218 and 060614 with the $E_{p,i} - E_{iso}$ correlatio. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 463, Issue 3, pp. 913-919. (2007)
- Amati, L., Guidorzi, C., Frontera, F., Della Valle, M., Finelli, F., Landi, R. and Montanari, E.: Measuring the cosmological parameters with the $E_{p,i}$ - E_{iso} correlation of gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 391, Issue 2, pp. 577-584. (2008)
- Anderson, K. A., Kane, S. R., Primbsch, J. H., Weitzmann, R. H., Evans, W. D., Klebesadel, R. W. and Aiello, W. P.: X-ray spectrometer experiment aboard the ISEE-C /Heliocentric/ spacecraft. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, Volume GE-16, pp. 157-159. (1978)
- Arkhangelskaja, I. V.: Duration distributions for gamma-ray bursts registered in various experiments since VENERA11/KONUS up to Fermi/GBM. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 675, Issue 3, article id. 032022 (2016)
- Atteia, J-L., et al.: A Second Catalog of Gamma-Ray Bursts: 1978-1980 Localizations from the Interplanetary Network. *The Astrophysical Journal,s* Volume 64, pp. 305-382. (1987)
- Atwood, W. B., et al.: The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *The Astrophysical Journal*, Volume 697, Issue 2, pp. 1071-1102. (2009)
- Backus G. E. and Gilbert J. F.: Uniqueness in the Inversion of Inaccurate Gross Earth Data. *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*, Volume 266, pp. 123-192. (1970)
- Bagoly, Z., Balázs, L. G., Horváth, I., Rácz, I., Tóth, L. V. and Hakkila, J.: The GRBs' Sky Exposure Function. In: Caraveo, P., D'Avanzo, P., Gehrels, N. and

- Tagliaferri, G. (szerk.) Swift: 10 Years of Discovery. PoS(SWIFT 10)060. (2015)
- Bagoly, Z., Borgonovo, L., Mészáros, A., Balázs, L. G. and Horváth, I.: Factor analysis of the long gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 493, Issue 1, pp. 51-54. (2009)
- Bagoly, Z., Csabai, I., Mészáros, A., Mészáros, P., Horváth, I., Balázs, L. G. and Vavrek, R.: Gamma photometric redshifts for long gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 398, pp. 919-925. (2003)
- Bagoly, Z., Mészáros, A., Balázs, L. G., Horváth, I., Klose, S., Larsson, S., Mészáros, P., Ryde, F. and Tusnády, G.: The Swift satellite and redshifts of long gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 453, Issue 3, pp. 797-800. (2006)
- Bagoly, Z., Mészáros, A., Horváth, I., Balázs, L. G. and Mészáros, P.: Principal Component Analysis of the 3B Gamma Ray Burst Data. *Astrophysical Journal*, Volume 498, pp. 342-348. (1998)
- Balastegui, A., Ruiz-Lapuente, P. and Canal, R.: Reclassification of gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 328, Issue 1, pp. 283-290. (2001)
- Balázs, L. G.: Statistical Phenomena in Astronomy. MTA doktora értekezés. (angol nyelven) (2004)
- Balázs, L. G., Bagoly, Z., Hakkila, J. E., Horváth, I., Kóbori, J., Rácz, I. I. and Tóth, L. V.: A giant ring-like structure at $0.78 < z < 0.86$ displayed by GRBs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 452, pp. 2236-2246. (2015)
- Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Mészáros, P.: On the difference between the short and long gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 401, pp. 129-140. (2003)
- Balázs, L. G., Horváth, I., Bagoly, Zs., Veres, P. and Szécsi, D.: Observational differences between Swift GRB classes. *AIP Conference Proceedings*, Volume 1358, pp. 231-234 (2011)
- Balázs, L. G., Mészáros, A. and Horváth, I.: Anisotropy of the sky distribution of gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 339, pp. 1-6. (1998)
- Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Vavrek, R.: An intrinsic anisotropy in the angular distribution of gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, Volume 138, pp. 417-418. (1999)
- Band, D., Matteson, J., Ford, L., Schaefer, B., Palmer, D., Teegarden, B., Cline, T., Briggs, M. S., Paciesas, W., Pendleton, G., Fishman, G. J., Kouveliotou, C., Meegan, C., Wilson, R. and Lestrade, P.: BATSE observations of gamma-ray

- burst spectra. I - Spectral diversity. *Astrophysical Journal*, Volume 413, pp. 281-292. (1993)
- Barat, C., Chambon, G., Hurley, K., Niel, M., Vedrenne, G., Estulin, I. V., Kuznetsov, A. V. and Zenchenko, V. M.: The Signe 2 Franco-Soviet interplanetary gamma ray burst experiment network. *Space Science Instrumentation*, Volume 5, pp. 229-235. Centre National d'Etudes Spatiales. (1981)
- Berger, E., et al.: The afterglow and elliptical host galaxy of the short γ -ray burst GRB 050724. *Nature*, Volume 438, Issue 7070, pp. 988-990. (2005)
- Berger, E.: The Host Galaxies of Short-Duration Gamma-Ray Bursts: Luminosities, Metallicities, and Star-Formation Rates. *The Astrophysical Journal*, Volume 690, Issue 1, pp. 231-237. (2009)
- Bickert, K. F. and Greiner, J.: Gamma-ray bursts from collisions of primordial small-mass black holes with comets. *AIP Conference Proceedings*, Volume 280, pp. 1059 - 1063. (1993)
- Blandford, R. D. and Znajek, R. L.: Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 179, pp. 433-456. (1977)
- Borgonovo, L.: Bimodal distribution of the autocorrelation function in gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 418, pp. 487-493. (2004)
- Borgonovo, L., Frontera, F., Guidorzi C., Montanari, E., Vetere, L. and Soffitta, P.: On the temporal variability classes found in long gamma-ray bursts with known redshift. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 465, pp. 765-775. (2007)
- Bouchet, L.: A comparative study of deconvolution methods for gamma-ray spectra. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, Volume 113, pp. 167-183. (1995)
- Brainerd, J.: Gamma-Ray bursts in the galactic halo. *Nature*, Volume 355, pp. 522-524. (1992)
- Briggs, M. S., Paciesas, W. S., Pendleton, G. N., Meegan, C. A., Fishman, G. J., Horack, J. M., Brock, M. N., Kouveliotou, C., Hartmann, D. H. and Hakkila, J.: BATSE Observations of the Large-Scale Isotropy of Gamma-Ray Bursts. *Astrophysical Journal*, Volume 459, pp. 40-63. (1996)
- Bromm, V. and Loeb, A.: Gamma-ray burst cosmology. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 291-309. (2012)
- Bronstein, I. N. and Szemengyajev, K. A.: Справочник по математике. Наука. Москва. (1980)

- Burnham, K. P. and Anderson, D. R.: Multimodel Inference Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods and Research*, Volume 33, pp. 261-304. (2004)
- Burrows, D. N., Falcone, A., Chincarini, G., Morris, D., Romano, P., Hill, J. E., Godet, O., Moretti, A., Krimm, H., Osborne, J. P., Racusin, J., Mangano, V., Page, K., Perri, M., Stroh, M. and the Swift XRT Team: X-ray flares in early GRB afterglows. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Volume 365, issue 1854, pp. 1213-1226. (2007)
- Burrows, D. N., Hill, J. E., Nousek, J. A., Wells, A. A., Short, A. D., Willingale, R., Citterio, O., Chincarini, G. and Tagliaferri, G.: Swift X-Ray Telescope. In: *X-Ray and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy XI*, Flanagan, K. A. and Siegmund, O. H. (szerk.) *Proc. SPIE* Volume 4140, pp. 64-75. (2000)
- Campana, S., et al.: The association of GRB 060218 with a supernóva and the evolution of the shock wave. *Nature*, Volume 442, pp. 1008-1010. (2006)
- Chattopadhyay, T., Misra, R., Chattopadhyay, A. K. and Naskar, M.: Statistical Evidence for Three Classes of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 667, Issue 2, pp. 1017-1023. (2007)
- Cline, D. B., Czerny, B., Matthey, C., Janiuk, A. and Otwinowski, S.: Study of Very Short Gamma-Ray Bursts: New Results from BATSE and Konus. *The Astrophysical Journal*, Volume 633, Issue 2, pp. L73-L76. (2005)
- Cline, T. L., Desai, U. D., Klebesadel, R. W. and Strong, I. B.: Energy Spectra of Cosmic Gamma-Ray Bursts. *Astrophysical Journal*, Volume 185, p. L1-L5. (1973)
- Cline, T. L., Hurley, K. C., Boer, M., Sommer, M., Niel, M., Fishman, G. J., Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Paciesas, W. S., Wilson, R. B., Laros, J. G. and Klebesadel, R. W.: Gamma ray burst source locations with the Ulysses/Compton/PVO Network, Gamma-ray bursts. *AIP Conference Proceedings*, Volume 265, pp. 72-76. (1991)
- Cohen, E. and Piran, T.: The Distribution of Cosmological Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 444, pp. L25-L28. (1995)
- Colgate, S. A. and Li, H.: Gamma-ray bursts from the interaction of degenerate disks with fast neutron stars (Part I). In: Kouveliotou, C., Briggs, M. S. and Fishman, G. J. (szerk.) *Gamma-ray bursts: 3rd Huntsville symposium*. *AIP Conference Proceedings*, Volume 384, pp. 734-738. (1996a)
- Colgate, S. A. and Li, H.: Gamma-ray bursts from the interaction of degenerate disks with fast neutron stars (Part II). In: Kouveliotou, C., Briggs, M. S. and Fishman, G. J. (szerk.) *Gamma-ray bursts: 3rd Huntsville symposium*. *AIP Conference Proceedings*, Volume 384, pp. 739-743. (1996b)

- 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)
- Dado, S. and Dar, A.: Conical fireballs, cannonballs, and jet breaks in the afterglows of gamma ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 558, id.A115, 7 pp. (2013)
- Dado, S., Dar, A. and De Rújula, A.: The Diverse Broadband Light Curves of Swift Gamma-Ray Bursts Reproduced with the Cannonball Model. *The Astrophysical Journal*, Volume 696, Issue 1, pp. 994-1020. (2009)
- Djorgovski, S. G., Metzger, M. R., Kulkarni, S. R., Odewahn, S. C., Gal, R. R., Pahre, M. A., Frail, D. A., Feroci, M., Costa, E. and Palazzi, E.: The optical counterpart to the γ -ray burst GRB 970508. *Nature*, Volume 387, Issue 6636, pp. 876-878. (1997)
- Einstein, A.: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, Volume 49, pp. 769-822. (1916)
- Eisenhart, L. P.: *Riemannian Geometry*. Princeton University Press. Princeton. (1949)
- Emslie, A. G. and Horack, J. M.: Compatibility of the BATSE Gamma-Ray Bursts data with General Friedmann Cosmological Models. *The Astrophysical Journal*, Volume 435, pp. 16-21. (1994)
- Evans W. D., Fenimore E. E., Klebesadel R. W., Laros J. G. and Terrel N. J.: Gamma-burst observations from the Pioneer Venus Orbiter. *Astrophysics and Space Science*, Volume 75, pp. 35-46. (1981)
- Fasano, G. and Franceschini, A.: A multidimensional version of the Kolmogorov-Smirnov test. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 225, pp. 155-170. (1987)
- Fenimore, E. E. and Bloom, J. S.: Determination of Distance from Time Dilation of Cosmological Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 453, pp. 25-36. (1995)
- Fishman, G. J. and Meegan, C. A.: The BATSE era. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 19-38. (2012)
- Fishman, G. J., Meegan, C. A., Wilson, R. B., Brock, M. N., Horack, J. M., Kouveliotou, C., Howard, S., Paciesas, W. S., Briggs, M. S., Pendleton, G. N., Koshut, T. M., Mallozzi, R. S., Stollberg, M. and Lestrade, J. P.: The first BATSE Gamma-Ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement*, Volume 92, pp. 229-283. (1994)
- Forest, D. J., et al.: The gamma ray spectrometer for the Solar Maximum Mission. *Solar Physics*, Volume 65, pp. 15-23. (1980)

- Friedmann, A.: über die Krümmung des Raumes. Zeitschrift für Physik, Volume 10, pp. 377-386. (1922)
- Frontera, F., Guidorzi, C., Montanari, E., Rossi, F., Costa, E., Feroci, M., Calura, F., Rapisarda, M., Amati, L., Carturan, D., Cinti, M. R., Fiume, D. D., Nicastro, L. and Orlandini, M.: The Gamma-Ray Burst Catalog Obtained with the Gamma-Ray Burst Monitor Aboard BeppoSAX. The Astrophysical Journal Supplement, Volume 180, Issue 1, pp. 192-223. (2009)
- Galama, T. J., et al.: An unusual supernova in the error box of the gamma-ray burst of 25 April 1998. Nature, Volume 395, pp. 670-672. (1998)
- Galama, T. J., Vreeswijk, P. M., van Paradijs, J., Kouveliotou, C., Augusteijn, T., Patat, F., Heise, J., in 't Zand, J., Groot, P. J., Wijers, R. A. M. J., Pian, E., Palazzi, E., Frontera, F. and Masetti, N.: On the possible association of SN 1998bw and GRB 980425. Astronomy and Astrophysics Supplement, Volume 138, pp. 465-466. (1999)
- Gehrels, N., et al.: The Swift Gamma-Ray Burst Mission. The Astrophysical Journal, Volume 611, Issue 2, pp. 1005-1020. (2004)
- Gehrels, N., Barthelmy, S. D., Burrows, D. N., Cannizzo, J. K., Chincarini, G., Fenimore, E., Kouveliotou, C., O'Brien, P., Palmer, D. M., Racusin, J., Roming, P. W. A., Sakamoto, T., Tueller, J., Wijers, R. A. M. J. and Zhang, B.: Correlations of Prompt and Afterglow Emission in Swift Long and Short Gamma-Ray Bursts. The Astrophysical Journal, Volume 689, Issue 2, pp. 1161-1172. (2008)
- Gehrels, N. and Mészáros, P.: Gamma Ray Bursts. Science, Volume 337. pp. 932-936. (2012)
- Gehrels, N., Ramirez-Ruiz, E. and Fox, D. B.: Gamma-Ray Bursts in the Swift Era. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Volume 47, Issue 1, pp. 567-617. (2009)
- Geller, M. J. and Huchra, J. P.: Mapping the universe. Scientific American, Volume 262, No.2, p. 19. (1989)
- Golenetskii, S. V., Mazets, E. P., Aptekar, R. L. and Ilinskii, V. N.: Correlation between luminosity and temperature in gamma-ray burst sources. Nature, Volume 306, pp. 451-453. (1983)
- Gott, J. R., III, Juric, M., Schlegel, D., Hoyle, F., Vogeley, M., Tegmark, M., Bahcall, N. and Brinkmann, J.: A Map of the Universe. The Astrophysical Journal, Volume 624, Issue 2, pp. 463-484. (2005)
- Greiner, J.: Localized GRBs. <http://www.mpe.mpg.de/~jcg/grbgen.html> frissítve 2016-ban.

- Greiner, J.: Discoveries enabled by multi-wavelength afterglow observations of gamma-ray bursts. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 169-190. (2012)
- Guillot, S., Perna, R., Rea, N., Vigano, D. and Pons, J. A.: Modelling of the surface emission of the low magnetic field magnetar SGR 0418+5729. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 452, Issue 4, pp. 3357-3368 (2015)
- Hakkila, J., Giblin, T. W., Roiger, R. J., Haglin, D. J., Paciesas, W. S. and Meegan, C. A.: How Sample Completeness Affects Gamma-Ray Burst Classification. *The Astrophysical Journal*, Volume 582, Issue 1, pp. 320-329. (2003)
- Hakkila, J., Giblin, T. W., Roiger, R. J., Haglin, D. J., Paciesas, W. S. and Meegan, C. A.: Subgroups of Gamma-Ray Bursts. *Baltic Astronomy*, Volume 13, pp. 211-216. (2004)
- Hakkila, J., Haglin, D. J., Pendleton, G. N., Mallozzi, R. S., Meegan, C. A. and Roiger, R. J.: Gamma-Ray Burst Class Properties *The Astrophysical Journal*, Volume 538, Issue 1, pp. 165-180. (2000)
- Harding, A. K.: Gamma-ray burst theory: Back to the drawing board. *Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 90, no. 2, pp. 863-868. (1994)
- Hartmann, D. and Epstein, R.: The Angular Distribution of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 346, 960-966. (1989)
- Higdon, J. C. and Lingenfelter, R. E.: Gamma-ray bursts. *Annual review of astronomy and astrophysics*. Volume 28 (A91-28201 10-90). Palo Alto, CA, Annual Reviews, Inc., pp. 401-436. (1990)
- Hjorth, J. and Bloom J. S.: The GRB-supernova connection. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 169-190. (2012)
- Hjorth, J., et al.: A very energetic supernova associated with the gamma-ray burst of 29 March 2003. *Nature*, Volume 423, pp. 847-850. (2003)
- Horváth, I.: A Világegyetem szerkezetének felderítése: Gamma-kitörések, Galaxisok, Kvazárok. MTA kandidátusi dolgozat. p. 126. (1997)
- Horváth, I.: A Third Class of Gamma-Ray Bursts? *The Astrophysical Journal*, Volume 508, pp. 757-759. (1998)
- Horváth, I.: A Further Study of the BATSE Gamma-Ray Bursts Duration Distribution. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 392, pp. 791-793. (2002)

- Horváth, I.: Likelihood estimation of gamma ray bursts duration distribution. In: Eric D Feigelson, G Jogesh Babu. (szerk.) Statistical challenges in astronomy. Third Statistical Challenges in Modern Astronomy. (SCMA III) Conference. Pennsylvania, Egyesült Államok. New York: Springer, pp. 439-441. (2003)
- Horváth, I.: Classification of BeppoSAX's gamma-ray bursts. *Astrophysics and Space Science*, Volume 323:(1) pp. 83-86. (2009)
- Horváth, I.: Gammakitörések. In: Benkő, J. and Mizser, A. (szerk.) Meteor Csillagászati Évkönyv 2012. Budapest. Magyar Csillagászati Egyesület, pp. 291-306. (2011)
- Horváth, I., Bagoly, Z., Balázs, L. G., de Ugarte Postigo, A., Veres, P. and Mészáros, A.: Detailed Classification of Swift's Gamma-ray Burst. *The Astrophysical Journal*, Volume 713, Issue 1, pp. 552-557. (2010)
- Horváth, I., Bagoly, Z., Hakkila, J. and Tóth, L. V.: Anomalies in the GRBs' spatial distribution. In: Caraveo, P., D'Avanzo, P., Gehrels, N. and Tagliaferri, G. (szerk.) Swift: 10 Years of Discovery. PoS(SWIFT 10)078. (2015a)
- Horváth, I., Bagoly, Z., Hakkila, J. and Tóth, L. V.: New data support the existence of the Hercules-Corona Borealis Great Wall. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 584, id.A48, 8 pp. (2015b)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Kelemen, J., Veres, P. and Tusnády, G.: Analysis of the Swift Gamma-Ray Bursts duration. In: Huang, Dai, Zang. (szerk.) Nanjing Gamma-Ray Burst Conference. Nanjing, Kína, 2008.06.23-2008.06.27. Melville: AIP, pp. 67-70. (2008)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Ryde, F. and Mészáros, A.: A new definition of the intermediate group of gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, 447:(1) pp. 23-30. (2006)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Bagoly, Z. and Veres, P.: Classification of Swift's Gamma-Ray Bursts. *Astronomy and Astrophysics*, 489: pp. L1-L4. (2008)
- Horváth, I., Balázs, L. G., Veres, P.: Gamma-ray Burst Groups Observed by Different Satellites. In: Charles Meegan, Chryssa Kouveliotou, Neil Gehrels. (szerk.) Gamma-Ray Burst: Sixth Huntsville Symposium. Huntsville, Egyesült Államok. New York: AIP, pp. 412-414. AIP Conference Proceedings, Volume 1133. (2009)

- Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z.: The largest structure of the Universe, defined by Gamma-Ray Bursts. 7th Huntsville Gamma-Ray Burst Symposium, GRB 2013: paper 33 in eConf Proceedings C1304143 (2013)
- Horváth, I., Hakkila, J. and Bagoly, Z.: Possible structure in the GRB sky distribution at redshift two. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 561, id.L12, 4 pp. (2014)
- Horváth, I., Mészáros, A., Balázs, L. G. and Bagoly, Z.: Where is the Third Subgroup of Gamma-Ray Bursts? *Baltic Astronomy*, Volume 13, pp. 217-220. (2004a)
- Horváth, I., Mészáros, A., Balázs, L. G. and Bagoly, Z.: The duration-hardness joint distribution suggests three subgroups of GRBs. In: Feroci M. (szerk.) *Proceedings of the Third Rome Workshop on Gamma-Ray Bursts in the Afterglow Era: Rome, Olaszország*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, pp. 82-85. ASP Conference Series. Volume 312. (2004b)
- Horváth, I., Mészáros, P. and Mészáros, A.: Cosmological Brightness Distribution Fits of Gamma-Ray Burst Sources. *The Astrophysical Journal*, Volume 470, pp. 56-62. (1996)
- Horváth, I., Norris, J. P., Scargle, J. D. and Balázs, L. G.: Preliminary results of the analysis of the BATSE TTE data *Il Nuovo Cimento C*, Volume 28, Issue 3, pp. 291-294. (2005)
- Horváth, I., Ryde, F., Balázs, L. G., Bagoly, Z. and Mészáros, A.: Properties of the intermediate type of gamma-ray bursts. *AIP Conference Proceedings*, Volume 836, pp. 125-128, *Gamma-Ray Bursts in the Swift Era*, Sixteenth Maryland Astrophysics Conference, held in Washington, DC. Edited by S.S. Holt, N. Gehrels and J.A. Nousek. (2006)
- Horváth, I. and Tóth, B. G.: The duration distribution of Swift Gamma-Ray Bursts. *Astrophysics and Space Science*, Volume 361, Issue 5, article id.155, 4 pp. (2016)
- Horváth, I., Veres, P. and Balázs, L. G.: The Third Group of Gamma-ray Bursts in the Swift and BATSE Data. *Baltic Astronomy*, Volume 18, pp. 302-304. (2010)
- Hurley, K., et al.: The Interplanetary Network Supplement to the Fermi GBM Catalog of Cosmic Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal Supplement*, Volume 207, Issue 2, article id. 39, 8 pp. (2013)
- Jakobsson, P., et al.: A mean redshift of 2.8 for Swift gamma-ray bursts. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 447, Issue 3, pp.897-903. (2006)

- Janiuk, A. and Moscibrodzka, M.: Accretion and Outflow from a Magnetized, Neutrino Cooled Torus around the Gamma Ray Burst Central Engine. *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, Volume 8, pp. 352-355. (2012)
- Jánosy, L.: *Theory and Practice of the Evaluation of Measurements*, Oxford press. Oxford. (1965)
- Jolliffe, I. T.: Discarding variables in a principal component analysis: I Artificial data. *Appl. Statist.* Volume 21, pp. 160-173. (1972)
- Jolliffe, I. T.: *Principal Component Analysis*, Springer-Verlag, New York. (1986)
- Justel, A., Pena, D. and Zamar, R.: A multivariate Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit. *Statistics and Probability Letters*, Volume 35, pp. 251-259. (1997)
- Kahn, S. M. and Blissett, R. J.: The direct deconvolution of X-ray spectra. *Astrophysical Journal*, Part 1, Volume 238, pp. 417-431. (1980)
- Kann, D. A., et al.: The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft (Type II) GRB Optical Afterglows. *The Astrophysical Journal*, Volume 720, Issue 2, pp. 1513-1558. (2010)
- Kann, D. A., et al.: The Afterglows of Swift-era Gamma-Ray Bursts. II. Type I GRB versus Type II GRB Optical Afterglows. *The Astrophysical Journal*, Volume 734, Issue 2, article id. 96, 47 pp. (2011)
- Kaneko, Y., Preece, R. D., Briggs, M. S., Paciesas, W. S., Meegan, C. A. and Band, D. L.: The Complete Spectral Catalog of Bright BATSE Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 166, pp. 298-340. (2006)
- Katz, J.: *The Biggest Bangs*. Oxford University Press. Oxford. (2002)
- Kendall, M. and Stuart, A.: *The Advanced Theory of Statistics*, Griffin, London. (1976)
- Kennea, J. A., Burrows, D. N., Kouveliotou, C., Palmer, D. M., Göğüş, E., Kaneko, Y., Evans, P. A., Degenaar, N., Reynolds, M. T., Miller, J. M., Wijnands, R., Mori, K. and Gehrels, N.: Swift Discovery of a New Soft Gamma Repeater, SGR J1745-29, near Sagittarius A. *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 770, Issue 2, article id. L24, 6 pp. (2013)
- Klebesadel, R. W., Strong, I. B. and Olson, R. A.: Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. *The Astrophysical Journal*, Volume 182, pp. L85-L88. (1973)
- Klebesadel, R. W., Evans, W. D., Glore, J. P., Spalding, R. E. and Wymer, F. J.: The Pioneer Venus Orbiter Gamma Burst Detector. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume GE-18, pp. 76-80. (1980)

- Klebesadel, R. W.: The discovery of the gamma-ray burst phenomenon. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 1-8. (2012)
- Koen, C. and Bere, A.: On multiple classes of gamma-ray bursts, as deduced from autocorrelation functions or bivariate duration/hardness ratio distributions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 420, Issue 1, pp. 405-415. (2012)
- Koshut, T. M., Paciesas, W. S., Kouveliotou, C., van Paradijs, J., Pendleton, G. N., Fishman, G. J. and Meegan, C. A.: Systematic effects on Duration Measurements of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, 463, 570-592. (1996)
- Kouveliotou, C., Strohmayer, T., Hurley, K., van Paradijs, J., Finger, M. H., Dieters, S., Woods, P., Thompson, C. and Duncan, R. C.: Discovery of a Magnetar Associated with the Soft Gamma Repeater SGR 1900+14. *The Astrophysical Journal*, Volume 510, Issue 2, pp. L115-L118. (1999)
- Kouveliotou, C., Meegan, C. A., Fishman, G. J., Bhat, N. P., Briggs, M. S., Koshut, T. M., Paciesas, W. S. and Pendleton, G. N.: Identification of two classes of Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, 413, L101-L104. (1993)
- Kouveliotou, C., Koshut, T., Briggs, M. S., Pendleton, G. N., Meegan, C. A., Fishman, G. J. and Lestrade, J. P.: Correlations between Duration, Hardness and Intensity in GRBs. *Third Huntswill Symposium on Gamma-Ray Bursts*. New York: in *AIP Conference Proceedings*, Volume 384, ed. by Kouveliotou, C., Briggs, M. S. and Fishman, G. J. pp. 84-89. (1995)
- Kumar, P. and Zhang, B.: *The Physics of Gamma-Ray Bursts and Relativistic Jets*. *Physics Reports*. Volume 561, pp. 1-109. (2015)
- Lamb, D. Q., Graziani, C. and Smith, I. A.: Evidence for two distinct morphological Classes of Gamma-Ray Bursts from their short time scale variability. *The Astrophysical Journal*, Volume 413, L11-L14. (1993)
- Lander, S. K., Andersson, N., Antonopoulou, D. and Watts, A. L.: Magnetically driven crustquakes in neutron stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 449, Issue 2, pp. 2047-2058. (2015)
- Lee, W. H. and Ramirez-Ruiz, E.: The progenitors of short gamma-ray bursts. *New Journal of Physics*, Volume 9, Issue 1, p. 17. (2007)
- Lin, R. P., et al.: The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI). *Solar Physics*, Volume 210, Issue 1, pp. 3-32. (2002)
- Litvin, V. F., Matveev, S. A., Mamedov, S. V. and Orlov, V. V.: Anisotropy in the Sky Distribution of Short Gamma-Ray Bursts. *Astronomy Letters*, Volume 27, pp. 416-420. (2001)

- Liu, T., Hou, S. J., Xue, L. and Gu, W. M.: Jet Luminosity of Gamma-ray Bursts: the Blandford--Znajek Mechanism versus the Neutrino Annihilation Process. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 218, Issue 1, article id. 12, 7 pp. (2015)
- Lopes, R. H. C., Hobson P. R. and Reid I. D.: Computationally efficient algorithms for the two-dimensional Kolmogorov Smirnov test. *Journal of Physics*, Volume 119, Issue 4, article id. 042019, 9 pp. (2008)
- Loredo T. J. and Epstein R. I.: Analyzing gamma-ray burst spectral data. *The Astrophysical Journal*, Volume 336, pp. 896-919. (1989)
- Lü, H. J., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Zhang, B.: A New Classification Method for Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 725, Issue 2, pp. 1965-1970. (2010)
- Lü, H. J., Zhang, B., Liang, E. W., Zhang, B. B. and Sakamoto, T.: The 'amplitude' parameter of gamma-ray bursts and its implications for GRB classification. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 442, Issue 3, pp. 1922-1929. (2014)
- Luchkov, B. I.: A cometary model for cosmic gamma-bursts. *Astronomy Letters*, Volume 20, Issue 2, pp. 253-255. (1994)
- MacFadyen, A. I. and Woosley, S. E.: Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in "Failed Supernovae". *The Astrophysical Journal*, Volume 524, Issue 1, pp. 262-289. (1999)
- MacFadyen, A. I., Woosley, S. E. and Heger, A.: Supernovae, Jets, and Collapsars. *The Astrophysical Journal*, Volume 550, Issue 1, pp. 410-425. (2001)
- Magliocchetti, M., Ghirlanda, G. and Celotti, A.: Evidence for anisotropy in the distribution of short-lived gamma-ray bursts. *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, Volume 343, Issue 1, pp. 255-258. (2003)
- Malesani, D., Tagliaferri, G., Chincarini, G., Covino, S., Fugazza, D., D'Avanzo, P., Della Valle, M. and Mazzali, P. A.: SN 2003lw and GRB 031203: A Bright Supernova for a Faint Gamma-Ray Burst. *Astrophysical Journal*, Volume 609, pp. L5-L8. (2004)
- Mazets, E. P., Golentskii, S. V., Ilinskii, V. N., Aptekar, R. L. and Guryan, Iu. A.: Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado. *Nature*, Volume 282, pp. 587-589. (1979)
- Mazets, E. P. and Golenetskii, S. V.: Cosmic gamma-ray bursts. *Astrophysical Space Physics Rev.* Volume 1, 205. (1981)
- Mazets, E. P., Golenetskii, S. V., Aptekar, R. L., Gurian, Iu. A. and Ilinskii, V. N.: Cyclotron and annihilation lines in gamma-ray burst. *Nature*, Volume 290, pp. 378-382. (1981)

- Mazets, E. P., Golenetskii, S. V., Ilinskii, V. N., Panov, V. N., Aptekar, R. L., Gurian, Iu. A., Proskura, M. P., Sokolov, I. A., Sokolova, Z. Ia. and Kharitonova, T. V.: Catalog of cosmic gamma-ray bursts from the KONUS experiment data. I. Astrophysics and Space Science, Volume 80, no. 1, pp. 3-83. (1981)
- Mazets, E. P., Golenetskii, S. V., Gurian, Iu. A. and Ilinskii, V. N.: The 5 March 1979 event and the distinct class of short gamma bursts Are they of the same origin. Astrophysics and Space Science, Volume 84, no. 1, pp. 173-189. (1982)
- McBreen, B., Hurley, K. J., Long, R. and Metcalfe, L.: Lognormal Distributions in Gamma-Ray Bursts and Cosmic Lightning. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 271, no. 3, pp. 662-666. (1994)
- McLachlan, G. J. and Basford, K. E.: Mixture models. New York. Marcel Dekker. (1988)
- Meegan, C. A., Fishman, G. J., Wilson, R. B., Horack, J. M., Brock, M. N., Paciesas, W. S., Pendleton, G. N. and Kouveliotou, C.: Spatial distribution of gamma-ray bursts observed by BATSE. Nature, Volume 355, pp. 143-145. (1992)
- Meegan, C. A., Pendleton, G. N., Briggs, M. S., Kouveliotou, C., Koshut, T. M., Lestrade, J. P., Paciesas, W. S., McCollough, M. L., Brainerd, J. J., Horack, J. M., Hakkila, J., Henze, W., Preece, R. D., Mallozzi, R. S. and Fishman, G. J.: The Third BATSE Gamma-ray Burst Catalog. The Astrophysical Journal Supplement, Volume 106, pp. 65-110. (1996)
- Meegan, C. A., Pendleton, G. N. and Briggs, M. S.: Current BATSE Gamma-Ray Burst Catalog, eredeti hely: <http://www.batse.msfc.nasa.gov/data>. Jelen hely: <http://gammaray.msfc.nasa.gov/batse/grb/catalog/current/>
- Meegan, C. A., et al.: The Fermi Gamma-ray Burst Monitor. The Astrophysical Journal, Volume 702, Issue 1, pp. 791-804. (2009)
- Melandri, A., et al.: The optical SN 2012bz associated with the long GRB 120422A. Astronomy and Astrophysics, Volume 547, p. A82. (2012)
- Metzger, A. E., Parker, R. H., Gilman, D., Peterson, L. E. and Trombka, J. I. : Observation of a cosmic gamma-ray burst on Apollo 16. I - Temporal variability and energy spectrum. Astrophysical Journal, Volume 194, pt. 2, pp. L19-L25. (1974)
- Mészáros, A., Bagoly, Z., Balázs, L. G. and Horváth, I.: Redshift distribution of gamma-ray bursts and star formation rate. Astronomy and Astrophysics, Volume 455, Issue 3, pp. 785-790. (2006)
- Mészáros, A., Bagoly, Z., Horváth, I., Balázs, L. G. and Vavrek, R.: A Remarkable Angular Distribution of the Intermediate Subclass of Gamma-Ray Bursts. The Astrophysical Journal, Volume 539, Issue 1, pp. 98-101. (2000)

- Mészáros, P.: Gamma-ray bursts. Reports on Progress in Physics, Volume 69, Issue 8, pp. 2259-2321. (2006)
- Mészáros, P.: Gamma Ray Bursts. Astropart. Phys. Volume 43. pp. 134-141. (2013)
- Mészáros, P. and Gehrels, N.: Gamma Ray Bursts and their links with Supernovae and Cosmology. Res. Ast. Astrophys. Volume 12. pp. 1139-1161. (2012)
- Mészáros, P. and Rees, M. J.: Tidal Heating and Mass Loss in Neutron Star Binaries: Implications for Gamma-Ray Burst Models. The Astrophysical Journal, 397, 570-575. (1992)
- Mészáros, P. and Rees, M. J.: Optical and Long-Wavelength Afterglow from Gamma-Ray Bursts. Astrophysical Journal, Volume 476, p. 232. (1997)
- Mészáros, P. and Wijers, R. A. M. J.: Basic gamma-ray burst afterglows. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) Gamma-Ray Bursts. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 151-167. (2012)
- Michelberger, P., Szeidl, L. és Várlaki, P.: Alkalmazott folyamatstatisztika és idősor-analízis. Typotex. Budapest. (2003)
- Modjaz, M., Stanek, K. Z., Garnavich, P. M., Berlind, P., Blondin, S., Brown, W., Calkins, M., Challis, P., Diamond-Stanic, A. M., Hao, H., Hicken, M., Kirshner, R. P., Prieto, J. L.: Early-Time Photometry and Spectroscopy of the Fast Evolving SN 2006aj Associated with GRB 060218. Astrophysical Journal, Volume 645, pp. L21-L24. (2006)
- Móri, F. T. and Székely, J. G.: Többváltozós Statisztikai Analízis. Műszaki Tankönyvkiadó. Budapest. (1986)
- Mukherjee, S., Feigelson, E. D., Jogesh Babu, G., Murtagh, F., Fraley, C. and Raftery, A.: Three Types of Gamma-Ray Bursts. The Astrophysical Journal, Volume 508, Issue 1, pp. 314-327. (1998)
- Murakami, T., Fujii, M., Hayashida, K., Itoh, M. and Nishimura, J.: Evidence for cyclotron absorption from spectral features in gamma-ray bursts seen with Ginga. Nature, Volume 335, pp. 234, 235. (1988)
- Nakar, E.: Short-hard gamma-ray bursts. Physics Reports, Volume 442, Issue 1-6, pp. 166-236. (2007)
- Norris, J. P., Cline, T. L., Desai, U. D. and Teegarden, B. J.: Frequency of fast, narrow gamma-ray bursts. Nature, Volume 308, pp. 434-435. (1984)
- Norris, J. P., et al.: magánközlés. (1997)
- Nysewander, M., Fruchter, A. S. and Pe'er, A.: A Comparison of the Afterglows of Short- and Long-duration Gamma-ray Bursts. The Astrophysical Journal, Volume 701, Issue 1, pp. 824-836. (2009)

- Paál, G., Horváth, I. and Lukács, B.: Inflation and Compactification from Galaxy Redshifts? *Astrophysics and Space Science*, Volume 191, pp. 107-124. (1992)
- Paciesas, W. S., et al.: The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal*, Volume 122, pp. 465-495. (1999)
- Paczynski, B.: Gamma-ray bursters at cosmological distances. *Astrophysical Journal*, Part 2, Volume 308, pp. L43-L46. (1986)
- Peacock, J. A.: Two-dimensional goodness-of-fit testing in astronomy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 202, pp. 615-627. (1983)
- Peacock, J. A.: *Cosmological Physics*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. (2010)
- Peebles, P. J. E.: *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press. Princeton. New Jersey. (1993)
- Pélangéon, A., et al.: Intrinsic properties of a complete sample of HETE-2 gamma-ray bursts. A measure of the GRB rate in the Local Universe. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 491, Issue 1, pp. 157-171. (2008)
- Pendleton, G. N., Paciesas, W. S., Mallozzi, R. S., Koshut, T. M., Fishman, G. J., Meegan, C. A., Wilson, R. B., Horack, J. M. and Lestrade, J. P.: The detector response matrices of the burst and transient source experiment (BATSE) on the Compton Gamma Ray Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Volume 364, pp. 567-577. (1995)
- Pendleton, G. N., Paciesas, W. S., Briggs, M. S., Preece, R. D., Mallozzi, R. S., Meegan, C. A., Horack, J. M., Fishman, G. J., Band, D. L., Matteson, J. L., Skelton, R. T., Hakkila, J., Ford, L. A., Kouveliotou, C. and Koshut, T. M.: The Identification of Two Different Spectral Types of Pulses in Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 489, Issue 1, pp. 175-198. (1997)
- Phillips, D. L.: A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind. *J. Assoc. Comput. Mach.*, Volume 9, pp. 84-97. (1962)
- Pian, E., et al.: An optical supernova associated with the X-ray flash XRF 060218. *Nature*, Volume 442, pp. 1011-1013. (2006)
- Piran, T.: The physics of gamma-ray bursts. *Reviews of Modern Physics*, Volume 76, Issue 4, pp. 1143-1210. (2004)
- Piran, T., Sari, R. and Mochkovitch, R.: Prompt emission from gamma-ray bursts. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 121-149. (2012)

- Piro, L. and Hurley, K.: The cosmological era. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 39-72. (2012)
- Podsiadlowski, P., Rees, M. J. and Ruderman, M.: Gamma-ray bursts and the structure of the Galactic halo. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 273, Issue 3, pp. 755-771. (1995)
- Preece, R. D., Briggs, M. S., Mallozzi, R. S., Pendleton, G. N., Paciesas, W. S. and Band, D. L.: The BATSE Gamma-Ray Burst Spectral Catalog. I. High Time Resolution Spectroscopy of Bright Bursts Using High Energy Resolution Data. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 126, pp. 19-36. (2000)
- Prékopa, A.: *Valószínűségelmélet*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. (1972)
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T.: *Numerical Recipes*. Cambridge University Press, Cambridge. (1992)
- Prilutskii, O. F. and Usov, V. V.: On the Nature of gamma-Ray Bursts. *Astrophysics and Space Science*, Volume 34, p. 387. (1975)
- Qin, Y., Liang, E-W., Liang, Y-F., Yi, S-X., Lin, L., Zhang, B-B., Zhang, J., Lü, H-J., Lu, R-J., Lü, L-Z. and Zhang, B.: A Comprehensive Analysis of Fermi Gamma-Ray Burst Data. III. Energy-dependent T 90 Distributions of GBM GRBs and Instrumental Selection Effect on Duration Classification. *The Astrophysical Journal*, Volume 763, Issue 1, article id. 15, 9 pp. (2013)
- Quashnock, J. M. and Lamb, D. Q.: Evidence for the Galactic origin of gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 265, pp. L45-L50. (1993)
- Rajaniemi, H. J. and Mahönen, P.: Classifying Gamma-Ray Bursts using Self-organizing Maps *The Astrophysical Journal*, Volume 566, Issue 1, pp. 202-209. (2002)
- Rees, M. J. and Mészáros, P.: Unsteady Outflow Models for Cosmological Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 430, L93-L96. (1994)
- Ripa, J., Mészáros, A., Veres, P. and Park, I. H.: On the Spectral Lags and Peak Counts of the Gamma-Ray Bursts Detected by the RHESSI Satellite. *The Astrophysical Journal*, Volume 756, Issue 1, article id. 44, 13 pp. (2012)
- Ripa, J., Mészáros, A., Wigger, C., Huja, D., Hudec, R. and Hajdas, W.: Search for gamma-ray burst classes with the RHESSI satellite. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 498, Issue 2, pp.399-406. (2009)
- Rybicki, G. B. and Lightman, A. P.: *Radiative Processes in Astrophysics*. pp. 400. ISBN 0-471-82759-2. Wiley-VCH, (1986)

- Ryde, F., Pe'er, A., Nymark, T., Axelsson, M., Moretti, E., Lundman, C., Battelino, M., Bissaldi, E., Chiang, J., Jackson, M. S., Larsson, S., Longo, F., McGlynn, S. and Omodei, N.: Observational evidence of dissipative photospheres in gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 415, Issue 4, pp. 3693-3705. (2011)
- Sakamoto, T., et al.: The First Swift BAT Gamma-Ray Burst Catalog. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 175, Issue 1, pp. 179-190. (2008)
- Salvaterra, R., et al.: GRB 090423 at a redshift of $z \sim 8.1$. *Nature*, Volume 461, Issue 7268, pp. 1258-1260. (2009)
- Sari, R., Piran, T. and Narayan, R.: Spectra and Light Curves of Gamma-Ray Burst Afterglows. *The Astrophysical Journal*, Volume 497, Issue 1, pp. L17-L20. (1998)
- Sari, R., Piran, T. and Halpern, J. P.: Jets in Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal*, Volume 519, Issue 1, pp. L17-L20. (1999)
- Schwarz, G.: Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, Volume 6, pp. 461-464. (1978)
- Scott, D. and Tout, C. A.: Nearest neighbour analysis of random distributions on a sphere. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 241, pp. 109-117. (1989)
- Shcherbakov, R. V., Peer, A., Reynolds, C. S., Haas, R., Bode, T. and Laguna, P.: Prompt emission from tidal disruptions of white dwarfs by intermediate mass black holes. *Tidal Disruption Events and AGN Outbursts*, Edited by R. Saxton; S. Komossa; EPJ Web of Conferences, Volume 39, id.02007. (2012)
- Singh, C. B., de Gouveia Dal Pino, E. M. and Kadowaki, L. H. S.: On the Role of Fast Magnetic Reconnection in Accreting Black Hole Sources. *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 799, Issue 2, article id. L20, 5 pp. (2015)
- Slechta, M. and Mészáros, A.: A Note on the Nearest Neighbour Analysis. *Astrophysics and Space Science*, Volume 249, Issue 1, pp. 1-5. (1997)
- Sparre, M., et al.: Spectroscopic Evidence for SN 2010ma Associated with GRB 101219B. *The Astrophysical Journal*, Volume 735, p. L24. (2011)
- Stanek, K. Z., et al.: Spectroscopic Discovery of the Supernova 2003dh Associated with GRB 030329. *Astrophysical Journal*, Volume 591, pp. L17-L20. (2003)
- Starling, R. L. C., et al.: Discovery of the nearby long, soft GRB 100316D with an associated supernova. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 411, pp. 2792-2803. (2011)

- Szécsi, D., Bagoly, Z., Kóbori, J., Horváth, I. and Balázs, L. G.: Direction dependent background fitting for the Fermi GBM data. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 557, Paper A8. 15 p. (2013)
- Szécsi, D., Balázs, L. G., Bagoly, Z., Horváth, I., Mészáros, A. and Veres, P.: Statistical differences between Swift GRB classes based on gamma- and X-ray observations. In: Eric D Feigelson, G Jogesh Babu (szerk.) *Statistical challenges in astronomy. Fifth Statistical Challenges in Modern Astronomy (SCMA V) Conference*. Pennsylvania, Egyesült Államok. New York: Springer, pp. 547-549. (2012)
- Tagliaferri, G., et al.: GRB 050904 at redshift 6.3: observations of the oldest cosmic explosion after the Big Bang. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 443, Issue 1, pp.L1-L5. (2005)
- Tanvir, N. R., et al.: A γ -ray burst at a redshift of $z \sim 8.2$. *Nature*, Volume 461, Issue 7268, pp. 1254-1257. (2009)
- Tarnopolski, M.: Analysis of Fermi gamma-ray burst duration distribution. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 581, id.A29, 6 pp. (2015a)
- Tarnopolski, M.: Distinguishing short and long Fermi gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 454, Issue 1, pp. 1132-1139. (2015b)
- Tarnopolski, M.: On the limit between short and long GRBs. *Astrophysics and Space Science*, Volume 359, article id.20, 5 pp. (2015c)
- Tarnopolski, M.: Analysis of the observed and intrinsic durations of Swift/BAT gamma-ray bursts. *New Astronomy*, Volume 46, pp. 54-59. (2016)
- Tegmark, M., Hartmann, D. H., Briggs, M. S. and Meegan, C. A.: The Angular Power Spectrum of BATSE 3B Gamma-Ray Bursts. *Astrophysical Journal*, Volume 468, p. 214. (1996)
- Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Murakami, T., Kodama, Y. and Takahashi, K.: Cosmological constraints from calibrated Yonetoku and Amati relation suggest fundamental plane of gamma-ray bursts. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, Issue 08, id. 015. (2009)
- Tsutsui, R., Nakamura, T., Yonetoku, D., Takahashi, K. and Morihara, Y.: Identifying Subclasses of Long Gamma-Ray Bursts with Cumulative Light-Curve Morphology of Prompt Emissions. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 65, Article No. 3, 11 pp. (2013)
- Tsutsui, R. and Shigeyama, T.: On the subclasses in Swift long gamma-ray bursts: A clue to different central engines. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 66, Issue 2, id.42. (2014)

- Twomey, S.: On the numerical solution of Fredholm integral equations of the first kind by inversion of the linear system produced by quadrature. *J. Assoc. Comput. Mach.*, Volume 10, pp. 97-101. (1963)
- de Ugarte Postigo, A., Horváth, I., Veres, P., Bagoly, Z., Kann, D. A., Thöne, C. C., Balázs, L. G., D'Avanzo, P., Aloy, M. A., Foley, S., Campana, S., Mao, J., Jakobsson, P., Covino, S., Fynbo, J. P. U., Gorosabel, J., Castro-Tirado, A. J., Amati, L. and Nardini, M.: Searching for differences in Swift's intermediate GRBs. *Astronomy and Astrophysics*, Volume 525, id. A109, 17 pp. (2011)
- Ukwatta, T. N. and Wozniak, P. R.: Investigation of redshift- and duration-dependent clustering of gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 455, Issue 1, pp.703-711. (2016)
- Usov, V. V. and Chibisov, G. V.: Statistics of gamma-ray bursts. *Astronomicheskii Zhurnal*, Volume 52, no. 1, pp. 192-194. (1975)
- Varga, B: Gammakitörések vizsgálata. Diplomamunka. ELTE TTK. (2005)
- Vaughan, S., et al.: Swift Observations of the X-Ray-Bright GRB 050315. *The Astrophysical Journal*, Volume 638, Issue 2, pp. 920-929. (2006)
- Vavrek, R., Balázs, L. G., Mészáros, A., Horváth, I. and Bagoly, Z.: Testing the randomness in the sky-distribution of gamma-ray bursts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 391, Issue 4, pp. 1741-1748. (2008)
- Vedrenne, G. and Atteia, J.-L.: *Gamma-Ray Bursts: The Brightest Explosions in the Universe*. Springer Praxis Books. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. (2009)
- Veres, P.: Gamma felvillanások spektrális elemzése. Diplomamunka. ELTE TTK, 96 oldal. (2006)
- Veres, P.: Gammakitörések fizikai jellemzőinek statisztikus vizsgálata. Doktori disszertáció. ELTE TTK, 136 oldal. (2011)
- Veres, P., Horváth, I., Bagoly, Z., Balázs, L. G., Mészáros, A., Tusnády, G. and Ryde, F.: Model-independent methods of describing GRB spectra using BATSE MER data. *Il Nuovo Cimento B*, Volume 121, Issue 12, pp. 1609-1612. (2006)
- Virgili, F. J., Zhang, B., O'Brien, P. and Troja, E.: Are All Short-hard Gamma-ray Bursts Produced from Mergers of Compact Stellar Objects? *The Astrophysical Journal*, Volume 727, Issue 2, article id. 109, 14 pp. (2011)
- Walker, A. G.: On Milne's Theory of World-Structure. *Proceedings of London Mathematical Society*, Volume 42, pp. 90-127. (1936)
- Wanderman, D. and Piran, T.: The rate, luminosity function and time delay of non-Collapsar short GRBs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 448, Issue 4, pp. 3026-3037. (2015)

- Weinberg, S.: Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity. John Wiley and Sons, Inc. New York. (1972)
- Wheaton, W. A., Ulmer, M. P., Baity, W. A., Datlowe, D. W., Elcan, M. J., Peterson, L. E., Klebesadel, R. W., Strong, I. B., Cline, T. L. and Desai, U. D.: The Direction and Spectral Variability of a Cosmic Gamma-Ray Burst. *Astrophysical Journal*, Volume 185, pp. L57-L61. (1973)
- White, R. S.: Some requirements of a colliding comet source of gamma ray bursts. *Astrophysics and Space Science*, Volume 208, Issue 2, pp. 301-311. (1993)
- Wickramasinghe, W. A. D. T., Nemiroff, R. J., Norris, J. P., Kouveliotou, C., Fishman, G. J., Meegan, C. A., Wilson, R. B. and Paciesas, W. S.: The Consistency of Standard Cosmology and The BATSE number Versus Brightness Relation. *The Astrophysical Journal*, Volume 411, L55-L58. (1993)
- Woods, P. M., Kouveliotou, C., van Paradijs, J., Hurley, K., Kippen, R. M., Finger, M. H., Briggs, M. S., Dieters, S. and Fishman, G. J.: Discovery of a New Soft Gamma Repeater, SGR 1627-41. *The Astrophysical Journal*, Volume 519, Issue 2, pp. L139-L142. (1999)
- Woosley, S.: Models for gamma-ray burst progenitors and central engines. In: Kouveliotou, C., Wijers, R. A. M. J. and Woosley, S. (szerk.) *Gamma-Ray Bursts*. Cambridge University Press. Cambridge. pp. 191-213. (2012)
- Woosley, S. E.: Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes. *Astrophysical Journal*, Part 1, Volume 405, no. 1, pp. 273-277. (1993)
- Woosley, S. E. and Bloom, J. S.: The Supernóva Gamma-Ray Burst Connection. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Volume 44, Issue 1, pp. 507-556. (2006)
- Woosley, S. E. and Heger, A.: The Deaths of Very Massive Stars. *Very Massive Stars in the Local Universe*, *Astrophysics and Space Science Library*, Volume 412. Springer International Publishing Switzerland, p. 199. (2015)
- Xu, D., et al.: Discovery of the Broad-lined Type Ic SN 2013cq Associated with the Very Energetic GRB 130427A. *The Astrophysical Journal*, Volume 776, Issue 2, article id. 98, 6 pp. (2013)
- Yang, E.-B., Zhang, Z.-B., Choi, C.-S. and Chang, H.-Y.: Classifying Gamma-Ray Bursts with Gaussian Mixture Model. eprint arXiv:1603.03680. (2016)
- Zhang, B.: Gamma-Ray Bursts in the Swift Era. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, Volume 7, Issue 1, pp. 1-50. (2007)
- Zhang, B., Fan, Y. Z., Dyks, J., Kobayashi, S., Mészáros, P., Burrows, D. N., Nousek, J. A. and Gehrels, N.: Physical Processes Shaping Gamma-Ray Burst X-Ray Afterglow Light Curves: Theoretical Implications from the Swift X-Ray

- Telescope Observations. The Astrophysical Journal, Volume 642, Issue 1, pp. 354-370. (2006)
- Zhang, B., Zhang, B. B., Liang, E. W., Gehrels, N., Burrows, D. N. and Mészáros, P.: Making a Short Gamma-Ray Burst from a Long One: Implications for the Nature of GRB 060614. The Astrophysical Journal, Volume 655, p. L25. (2007)
- Zhang, B., Zhang, B. B., Virgili, F. J., Liang, E-W., Kann, D. A., Wu, X-F., Proga, D., Lu, H-J., Toma, K., Mészáros, P., Burrows, D. N., Roming, P. W. A. and Gehrels, N.: Discerning the Physical Origins of Cosmological Gamma-ray Bursts Based on Multiple Observational Criteria: The Cases of $z = 6.7$ GRB 080913, $z = 8.2$ GRB 090423, and Some Short/Hard GRBs. The Astrophysical Journal, Volume 703, pp. 1696-1724. (2009)
- Zitouni, H., Guessoum, N., Azzam, W. J. and Mochkovitch, R.: Statistical study of observed and intrinsic durations among BATSE and Swift/BAT GRBs. Astrophysics and Space Science, Volume 357, Issue 1, article id.7. 9 pp. (2015)

FÜGGELÉK

Mivel a <http://lyra.berkeley.edu/grbox/grbox.php> internetes cím időközben megszűnt üzemelni, ezért a dolgozatomban 9.3 fejezetében közölt elemzésekben használt adatokat az itteni táblázatban közlöm. Az első oszlop a kitörés azonosítóját tartalmazza, a második oszlop a kitörés időtartamát (T_{90}), a harmadik és negyedik az égi koordinátákat, míg az utolsó, ötödik oszlopban a mért vöröseltolódás található

GRB ID	T_{90} (s)	RA	Dec	z
090429B	5,5	210,6669	32,17064	9,4
090423	10,3	148,8887	18,14939	8,2
120923A	27,2	303,7949	6,22119	8
080913A	8	65,72775	-25,1295	6,7
060116	35	84,69283	-5,43698	6,6
050904	225	13,71221	14,08661	6,295
120521C	26,7	214,2867	42,14478	6
130606A	276,6	249,3966	29,7964	5,91
060927	22,6	329,5501	5,36358	5,467
050814	65	264,1891	46,33933	5,3
071025	109	355,0712	31,77858	5,2
050502B	7	142,5419	16,99625	5,2
060522	69	322,9367	2,88621	5,11
111008A	63,46	60,451	-32,7093	4,9898
060510B	276	239,1217	78,57	4,9
100302A	17,9	195,5154	74,59014	4,813
100513A	84	169,6113	3,62789	4,8
100219A	18,8	154,2022	-12,5666	4,6667
090205	8,8	220,911	-27,853	4,6497
120401A	100	58,08258	-17,6357	4,5
000131	50	93,37917	-51,9444	4,5
060223A	11	55,2065	-17,1301	4,41
080916C	66	119,8472	-56,6383	4,35
080129	48	105,284	-7,84628	4,349
050505	60	141,7639	30,2735	4,27
120712A	14,7	169,5885	-20,0338	4,1745
090516A	210	138,2609	-11,8543	4,109
060206	11	202,9309	35,051	4,059
100518A	30	304,7892	-24,5546	4
050730	155	212,0714	-3,77158	3,9693
120909A	112	275,7363	-59,4484	3,93
060210	255	57,73904	27,02622	3,9122
090519	64	142,2792	0,18031	3,85
081029	270	346,7723	-68,1555	3,8479
081228	3	39,46225	30,85292	3,8
120802A	50	44,84313	13,76867	3,796
050502A	20	202,443	42,67425	3,793

Függelék

060605	15	322,1555	-6,05869	3,773
130408A	28	134,4054	-32,3608	3,758
060906	43,6	40,7535	39,36164	3,6856
070721B	340	33,13729	-2,19461	3,6298
090323	150	190,7095	17,05322	3,57
060115	142	54,03467	17,34531	3,5328
980329	15	105,6584	38,84556	3,5
051028	12	27,06254	47,75256	3,5
061110B	128	323,9183	6,87614	3,4344
971214	50	179,1098	65,21167	3,43
060707	68	357,0792	-17,9047	3,424
121201A	85	13,46738	-42,9429	3,385
090313	78	198,4009	8,09717	3,375
030323	25,05	166,5392	-21,7703	3,372
080810	106	356,7938	0,31944	3,3604
110818A	103	317,3377	-63,9812	3,36
061222B	40	105,3525	-25,86	3,355
050908	20	20,46146	-12,9548	3,3467
050319	15	154,199	43,54858	3,2425
060526	13,8	232,8265	0,2847	3,2213
060926	8	263,9319	13,0385	3,2086
080516	5,8	120,6415	-26,1593	3,2
020124	45,91	143,2117	-11,5196	3,198
100316A	7	251,9788	71,82708	3,155
111123A	290	154,8464	-20,6447	3,1516
120922A	173	234,7485	-20,1817	3,1
091109A	48	309,2575	-44,1582	3,076
060607A	100	329,71	-22,4963	3,0749
081028A	260	121,8947	2,30808	3,038
080607	79	194,9467	15,91969	3,0368
121217A	778	153,71	-62,351	3
090404	84	239,2397	35,51597	3
090715B	266	251,3397	44,83897	3
070411	101	107,333	1,06461	2,954
120118B	23,26	124,871	-7,18475	2,943
051008	16	202,8731	42,09814	2,9
060306	61	41,09546	-2,14833	2,9
050401	38	247,8701	2,18745	2,8983
111107A	26,6	129,4778	-66,5201	2,893
120404A	38,7	235,0095	12,88503	2,876
110731A	38,8	280,5041	-28,5372	2,83
050603	6	39,98705	-25,1818	2,821
120327A	62,9	246,8644	-29,415	2,813
130427B	27	314,8984	-22,5464	2,78
081222	24	22,73996	-34,0949	2,77
091029	39,2	60,17742	-55,9556	2,752
090809	5,4	328,68	-0,08384	2,737
060714	115	227,8602	-6,56619	2,7108

Függelék

090726	67	248,6794	72,88467	2,71
121229A	100	190,1012	-50,5943	2,707
050406	3	34,46792	-50,1875	2,7
071031	180	6,40529	-58,0595	2,6918
080603B	60	176,5319	68,06111	2,6892
120811C	26,8	199,6825	62,30075	2,671
030429	9,19	183,2813	-20,9138	2,6564
080210	45	251,2667	13,82669	2,6419
090529	100	212,469	24,45894	2,625
070103	19	352,5575	26,87622	2,6208
050215B	10	174,449	40,79581	2,62
050820A	26	337,4088	19,56031	2,6147
090426	1,2	189,0753	32,986	2,609
130514A	204	296,2829	-7,97622	2,6
060923A	51,7	254,6173	12,36081	2,6
080721	16,2	224,4827	-11,7235	2,5914
081118A	67	82,59242	-43,3015	2,58
050915A	25	81,68668	-28,0165	2,5273
081121	14	89,27579	-60,6029	2,512
050819	36	358,7568	24,86083	2,5043
030115A	17,94	169,636	15,04997	2,5
070529	109	283,7425	20,65944	2,4996
130518A	48	355,6678	47,46493	2,49
120716A	230	313,0504	9,59825	2,48
080515	21	3,1625	32,57806	2,47
100424A	104	209,4476	1,53858	2,465
070802	16,4	36,89867	-55,5275	2,4541
090812	66,7	353,2023	-10,6047	2,452
071021	225	340,643	23,71847	2,452
080413A	46	287,299	-27,6778	2,433
051001	190	350,953	-31,5231	2,4296
080310	365	220,0575	-0,17558	2,4274
080905B	128	301,7412	-62,5631	2,3739
120815A	9,7	273,9576	-52,1311	2,358
070110	85	0,91363	-52,9741	2,3521
051109A	25	330,3138	40,82314	2,346
110128A	30,7	193,8963	28,06544	2,339
070129	460	37,00392	11,68444	2,3384
021004	52,4	6,72783	18,92822	2,323
060111A	13	276,205	37,60392	2,32
070506	4,3	347,2183	10,72231	2,309
121024A	69	70,47208	-12,2907	2,298
130505A	88	137,061	17,48478	2,27
081221	34	15,79258	-24,5477	2,26
060124	710	77,10833	69,74089	2,23
110205A	257	164,6297	67,52533	2,22
080804	34	328,6675	-53,1846	2,2045
121128A	7,52	300,6	54,29978	2,2

Függelék

050922C	5	317,3879	-8,75839	2,1995
070810A	11	189,9634	10,75119	2,17
071020	4,2	119,6658	32,86111	2,1462
011211	270	168,8249	-21,9489	2,14
060604	10	337,2292	-10,9155	2,1357
090926A		353,4002	-66,3241	2,1062
100728B	12,1	44,05617	0,28106	2,106
060512	8,6	195,7742	41,1909	2,1
081203A	294	233,0316	63,52081	2,1
130610A	46,4	224,4203	28,20711	2,092
061222A	72	358,2643	46,53294	2,088
080207	340	207,5122	7,50186	2,0858
000926	25	256,0405	51,78611	2,066
070611	12	1,99171	-29,7556	2,0394
000301C	10	245,0775	29,44333	2,0335
060108	14,4	147,0083	31,91906	2,03
130612A	4	259,7941	16,71997	2,006
121011A	75,6	260,2134	41,11039	2
080906A	147	228,0444	-80,5176	2
030226	22,09	173,2705	25,89869	1,986
081008	185,5	279,9583	-57,4311	1,967
070419B	236,5	315,7076	-31,2637	1,9588
050315	96	306,4754	-42,6006	1,95
080319C	34	258,9812	55,39183	1,9492
060814	146	221,3387	20,58631	1,9229
060708	9,8	7,80758	-33,759	1,92
020127	7,95	123,7559	36,77608	1,9
060908	19,3	31,8265	0,342	1,8836
110801A	385	89,43721	80,95589	1,858
090902B	21	264,939	27,32419	1,822
090709A	89	289,9277	60,72758	1,8
120326A	69,6	273,9047	69,25986	1,798
080325	128,4	277,8927	36,52342	1,78
121027A	62,6	63,59767	-58,8298	1,773
110422	25,9	112,0461	75,10694	1,77
100425A	37	299,1965	-26,4308	1,755
090113	9,1	32,0575	33,42842	1,7493
120119A	253,8	120,0289	-9,08158	1,728
100906A	114,4	28,68379	55,63044	1,727
050802	13	219,2737	27,78672	1,7102
091020	34,6	175,7299	50,97831	1,71
070521	37,9	242,6609	30,25622	1,7
080928	280	95,07015	-55,1997	1,6919
080603A	180	279,4086	62,74425	1,688
080605	20	262,1253	4,01556	1,6403
990510	100	204,5318	-80,4969	1,619
110503A	10	132,7761	52,20753	1,613
990123	63,3	231,3764	44,76642	1,61

Függelék

090418A	56	269,3132	33,40592	1,608
071003	150	301,8505	10,94772	1,6044
070714A	2	42,93046	30,24306	1,58
100728A	198,5	88,75838	-15,2557	1,567
040912	150	359,179	-0,92217	1,563
051111	47	348,1378	18,37461	1,55
070125	60	117,824	31,15114	1,5471
090102		128,2439	33,11419	1,547
080520	2,8	280,1934	-54,992	1,5457
060719	55	18,432	-48,3809	1,532
030328	92,59	182,7017	-9,34758	1,522
080330	61	169,2687	30,6232	1,5119
080805	78	314,2227	-62,4444	1,5042
060502A	33	240,927	66,60069	1,5026
070306	210	148,0971	10,48202	1,49594
060418	52	236,4275	-3,63889	1,49
120724A	72,8	245,1806	3,50772	1,48
010222		223,0523	43,01839	1,478
110213A	48	42,96429	49,27314	1,46
090407	310	68,97975	-12,6792	1,4485
050318	32	49,71312	-46,3955	1,4436
100814A	174,5	22,47338	-17,9954	1,44
050822	102	51,11342	-46,0333	1,434
080604	82	236,9654	20,55781	1,4171
100901A	439	27,26425	22,75856	1,408
120711A	44	94,6785	-70,9991	1,405
080602	74	19,17571	-9,23219	1,4
100615A	39	177,2054	-19,4812	1,398
111229A	25,4	76,28692	-84,7109	1,3805
050801	20	204,1458	-21,9281	1,38
090927	2,2	343,9725	-70,9804	1,37
100414A	26,4	192,1123	8,69303	1,368
110808A	48	57,26783	-44,1945	1,348
071117	6,6	335,0434	-63,4432	1,331
061121	81	147,2274	-13,1952	1,3145
990506	150	178,7089	-26,6764	1,307
130511A	5,43	196,6457	18,71	1,3033
130420A	123,5	196,1065	59,42408	1,297
050126	26	278,1132	42,37044	1,29
100724A	1,4	194,5433	-11,1025	1,288
061007	75	46,33167	-50,5007	1,2622
020813A	88,98	296,6745	-19,6013	1,2545
090926B	81	46,30808	-39,0062	1,24
050408	34	180,5721	10,85261	1,2356
080707	27,1	32,61833	33,10953	1,2322
130418A	300	149,0372	13,66744	1,218
100316B	3,8	163,4881	-45,4727	1,18
060319	12	176,387	60,01086	1,172

Függelék

070208	48	197,8859	61,9651	1,165
070518	5,5	254,1988	55,29508	1,16
061126	191	86,60198	64,21068	1,159
130701A	4,38	357,2295	36,10039	1,155
071122	68,7	276,6053	47,07514	1,14
060801	0,5	213,0055	16,98183	1,131
000418	30	186,3304	20,10322	1,11854
981226	260	352,4042	22,93161	1,11
080413B	8	326,1445	-19,9811	1,1014
980613	50	154,4909	71,45708	1,0964
091024	1200	339,2488	56,88983	1,092
110213B		41,75588	1,14619	1,083
091208B	14,9	29,39204	16,88967	1,0633
051006	26	110,8063	9,5068	1,059
000911	500	34,64317	7,74103	1,0585
110726A	5,2	286,7169	56,07128	1,036
080411	56	37,97996	-71,302	1,0301
121211A	182	195,5333	30,1485	1,023
991216	50	77,38041	11,28535	1,02
021211	2,8	122,2495	6,72719	1,006
110918A	22	32,53912	-27,1054	0,982
071010A	6	288,0609	-32,402	0,98
081109	190	330,7905	-54,711	0,9787
091018	4,4	32,18588	-57,5483	0,971
120907A	16,9	74,75	-9,315	0,97
070419A	116	182,7452	39,92533	0,97
980703	40	359,7778	8,5853	0,967
120722A	42,4	230,4966	13,2513	0,9586
970828	160	272,1063	59,30236	0,958
071010B	35,7	150,5386	45,73064	0,947
071028B		354,1617	-31,6205	0,94
080319B	50	217,9208	36,30244	0,9382
060912A	5	5,284	20,97161	0,937
051016B	4	132,1158	13,65575	0,9364
070714B	64	57,8425	28,29761	0,923
090510	0,3	333,5527	-26,5841	0,903
070429B	0,5	328,0159	-38,8283	0,9023
091003	21,1	251,5195	36,62521	0,8969
040924	1,2	31,594	16,11344	0,859
101225A	1088	0,19792	44,60067	0,847
080710	120	8,27354	19,50147	0,8454
000210	20	29,81496	-40,6592	0,8452
990705	45	77,47708	-72,1314	0,842
070318	63	48,48679	-42,9462	0,84
970508	35	103,456	79,27208	0,835
050824	25	12,23421	22,60922	0,8278
061217	0,3	160,4138	-21,1228	0,827
071112C	15	39,21221	28,37131	0,8227

Függelék

110715A	13	237,6837	-46,2352	0,82
070508	21	312,8003	-78,3853	0,82
051022	200	359,0171	19,60669	0,809
100816A	2,9	351,7398	26,57858	0,804
120729A	71,5	13,07429	49,93975	0,8
060602A	60	149,5694	0,30408	0,787
060202	203,7	35,84587	38,38422	0,785
030528	53,85	256,0013	-22,6194	0,782
080430	16,2	165,3113	51,68569	0,767
061110A	41	336,2915	-2,25886	0,7578
090328	80	90,66529	-41,8816	0,736
050813	0,6	241,9874	11,24919	0,72
101219A	0,6	74,58537	-2,53972	0,718
041006		13,70929	1,23469	0,716
111228A	101,2	150,0667	18,29772	0,716
051227	8	125,2421	31,92553	0,714
991208	60	248,473	46,45583	0,7055
060904B	192	58,2105	-0,72525	0,7029
090814A	80	239,6098	25,63122	0,696
970228	3,6	75,44421	11,7815	0,695
020405	40	209,513	-31,3728	0,695
080916A	60	336,2758	-57,023	0,6887
111209A	1400	14,34492	-46,8012	0,677
050416A	2,4	188,4775	21,0573	0,6528
100418A	7	256,3629	11,46175	0,6235
110106B	24,8	134,1553	47,00291	0,618
070612A	370	121,3734	37,27089	0,617
050525A	10	278,1357	26,33958	0,606
130215A	65,7	43,50292	13,39539	0,597
050223	23	271,3854	-62,4725	0,5915
060123	900	179,6993	45,51394	0,56
101219B	34	12,23063	-34,5665	0,5519
051221A	1,4	328,7026	16,89088	0,5465
090424	52	189,5213	16,83753	0,544
060729	116	95,38246	-62,3702	0,5428
100621A	63,6	315,3045	-51,1063	0,542
090618	113,2	293,9955	78,35686	0,54
081007A	10	339,96	-40,1469	0,5295
091127	7,1	36,58288	-18,9524	0,49
051117B	8	85,18075	-19,2742	0,481
111211A	15	153,0904	11,20833	0,478
070724A	0,4	27,80863	-18,5943	0,457
010921	21,77	343,9996	40,93139	0,45
061006	130	111,0319	-79,1986	0,4377
990712	30	337,971	-73,4079	0,43
020819	20	351,8311	6,26554	0,41
061210	85	144,522	15,62147	0,4095
120714B	159	355,4088	-46,1839	0,3984

Függelék

071227	1,8	58,13025	-55,9843	0,394
011121		173,6235	-76,0282	0,362
130603B	0,18	172,2006	17,07167	0,356
110328A		251,2081	57,58325	0,354
060428B	58	235,3568	62,02508	0,35
061021	46	145,1506	-21,9512	0,3463
090417B	260	209,6941	47,01806	0,345
130427A	162,8	173,1368	27,69894	0,34
050826	35	87,75658	-2,64328	0,296
060502B	90	278,9397	52,63136	0,287
120422A	5,35	136,9099	14,01875	0,283
050724	3	246,1849	-27,541	0,258
020903	32,15	342,1764	-20,7693	0,251
050509B	0,13	189,0586	28,98533	0,2249
070809	1,3	203,769	-22,1419	0,2187
081211B	102	168,264	53,82992	0,216
040701	60	312,0671	-40,1858	0,2146
030329A	22,76	161,2082	21,52151	0,1687
050709	220	345,3623	-38,9776	0,16
130702A	59	217,3116	15,774	0,145
000607	0,15	38,49475	17,14764	0,1405
060614	102	320,8837	-53,0267	0,1257
061201	0,8	332,1337	-74,5797	0,111
031203	30	120,6265	-39,85	0,105
060505	4	331,7643	-27,8144	0,089
051109B	15	345,4598	38,67964	0,08
100316D	240	107,6264	-56,2546	0,059
060218	2100	50,41535	16,86717	0,0331
111005A	26	223,2824	-19,7367	0,01326
980425	30	293,7638	-52,8458	0,0085
080109	500	137,3777	33,13897	0,006494
130907A	115,1	215,892	45,60742	1,238
130831A	32,5	358,6246	29,42967	0,4791
130925A	0	41,179	-26,1531	0,347
131011A	77	32,52658	-4,41119	1,874
131004A	1,54	296,1128	-2,95839	0,717