

DIPLOMAMUNKA

Új irányfüggő háttérillesztési eljárás a *Fermi* gamma-műhold adatainak feldolgozására

Szécsi Dorottya

fizikus MSc II. évfolyam
Eötvös Loránd Tudományegyetem,
Természettudományi Kar

Témavezető: **Bagoly Zsolt**, PhD.
egyetemi docens
Eötvös Loránd Tudományegyetem,
Természettudományi Kar

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	6
1.1. A gammakitörésekről	6
1.2. A diplomamunkáról	6
2. A gamma-kitörések általános bemutatása	8
2.1. Felfedezésük és kutatásuk	8
2.2. Eredetük	8
2.2.1. A tűzgolyó modell	10
2.2.2. Alternatív magyarázatok	10
2.3. Nyitott kérdések	11
2.4. A gamma-kitörések statisztikus vizsgálata	12
2.4.1. A T_{90} statisztikai változó meghatározása	12
2.4.2. T_{90} -hisztogram	13
3. A Fermi műhold	15
3.1. A detektorok	15
3.2. Az adatok	18
3.2.1. A LAT-adatok	20
3.2.2. A GBM-adatok	20
4. A műhold mozgása és a kitörésekre ráakódó háttér kapcsolata	22
4.1. Az alapprobléma	22
4.2. A modellalkotás	23
4.3. A GBM-detektorok és a kitörés szöge	24
4.4. A Nap helyzete	27
4.5. A Föld korongjának helyzete	27
4.6. A háttérillesztés	30
4.7. A módszer összefoglalása	31
5. A módszer ellenőrzése	33
5.1. Az energiacsatornák és a binék kezelése	33
5.2. Az integrális fénygörbe	33
5.3. Eredmények	34
5.3.1. A harmadfokú hiperfelület-illesztés eredményei	34
5.3.2. A másod- és harmadfokú egyparaméteres illesztés	37
6. Illesztés csatornánként	39

7. Összefoglalás	42
8. Köszönetnyilvánítás	42

Ábrák jegyzéke

1. A BATSE által detektált gamma-kitörések eloszlása az égbolton egyenletes, izotrop.	9
2. A tűzgolyó modell. Részletek a szövegben.	10
3. A 080916009 jelű kitörés fénygörbéi. Bal: eredeti differenciális alakban. Jobb: integrális alakban, a függőleges vonalak közötti tartomány a T_{90} értéke, mely a minimum és maximum (vízszintes vonallal jelzett) szintek különbségének középső 90%-a.	13
4. A kitörések időtartamának eloszlása, logaritmikus skálán. Az eloszlás egyértelműen két púpú, ez vezetett oda, hogy a gamma-kitöréseket két csoportba sorolták (hosszú és rövid kitörések).	13
5. A Fermi műhold fantáziaképe.	15
6. Egy NaI és egy BGO detektor fényképe. Mindkét műszer a Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) hardverfelszereléséhez tartozik. A diplomamunkában a NaI detektorok adatait elemzem.	16
7. A GBM detektorainak helyzete, a szakirodalomban publikált szemléltető ábra a detektorokról [37]. Lásd még a 8. ábrán.	17
8. A NaI detektorok irányításának szemléltetése, melyet a	18
9. Egy fits fájl szerkezete: Minden FITS fájl legalább egy fejlécből (<i>header</i>) és egy adategységből (<i>data unit</i>) áll. Általában a fejléc azt írja le, hogy az adategységet hogy kell értelmezni. Az ábrán az Fv nevű FITS-olvasóval megnyitott fájl szerkezeti felépítése és headerje látható.	20
10. A 091030613-as kitörés fénygörbéje. GBM-adatok, 3. NaI-detektor. A kitörés a 0. másodpercnél látszik, de a háttér túl gyorsan változik ahhoz, hogy a fénygörbét megfelelően elemezni lehessen. (Az illesztett harmadfokú polinom egyértelműen nem használható.) Az ilyen kezelhetetlen fénygörbék jellemzőek a Fermi adatbázisában.	22
11. A NaI-detektorok effektív felületének szögfüggése a szakirodalom alapján. [22]	24

12. A 12 NaI detektor effektív felületének irányatása az égen, a 091030613-as kitörés körüli 2000 másodperces időtartamban. A kék pont a kitörés helyét mutatja, a sárga pont a Nap helyzetét (lásd 4.4. fejezet). A színes vonalak azt mutatják, hogy melyik detektor milyen irányba nézett egy adott időpillanatban. A vonal azért nem egy pont csak, mert a kitörést megelőző és követő 1000-1000 másodpercet is ábrázoltuk. A kitörés maga tehát egy-egy vonal közepe táján következett be, ezután a vonalak addig viszonylag egyenesen haladásában egy hirtelen törés következett be. Ez a törés vezet a 10. ábrán látható fénygörbe háttérének extrém változásához. 26
13. Balra: a 091030613-as kitörés fénygörbéje. Jobbra: a 3-as detektornak a kitöréssel bezárt szöge. Az x-tengelyek osztása a két ábrán ugyanaz. Össze lehet hasonlítani a fénygörbe háttérének változását a kitöréssel bezárt szög változásával: egyértelműen látszik, hogy kapcsolat van a kettő között. 26
14. Balra: a 091030613-as kitörés fénygörbéje. Jobbra: a 3-as detektornak a Nappal bezárt szöge. Az x-tengelyek osztása a két ábrán ugyanaz. Össze lehet hasonlítani a fénygörbe háttérének változását a Nappal bezárt szög változásával: egyértelműen látszik, hogy e kettő között is kapcsolat van. 27
15. A Fermi és a Föld. Az ábra értelmezését lásd a szövegben. 28
16. Integrálás egy gömbfelületen. Arra vagyunk kíváncsiak, hogy mekkora annak a vetületnek a területe, mely a Föld korongjából látszik a horizont (zöld vonal) fölött egy félgömbön. Az integrál kiszámoláshoz lásd (8) és (9) képletek. 29
17. Balra: a 091030613-as kitörés fénygörbéje. Jobbra: a látómezőnek hányad részét takarja ki a Föld korongja a 3-as detektor esetén. Az x-tengelyek osztása a két ábrán ugyanaz. Össze lehet hasonlítani a fénygörbe háttérének változását a Föld kitakarásának értékével: egyértelműen látszik, hogy kapcsolat van e kettő között is. 29
18. Az előző fejezetből ismert ábrák a 091030613-as kitörésre. A vízszintes tengelyen mindig az idő látható, 0 másodpercnél volt a kitörés. Bal fent: fénygörbe, jobb fent: kitörés-detektor szöge, bal lent: Föld/látómező arány, jobb lent: Nap-detektor szöge. 30
19. Szemléltető ábra egy 2 paraméteres harmadfokú felületről, mely egy gamma-kitörés fénygörbéjére illeszkedik. A szürke felület adja a legjobb illeszkedést a fénygörbére, mely a fekete vonallal van rárajzolva. Látszik, hogy a felület jó követi a fénygörbe háttérének változásait a két illesztett paraméter függvényében. A két illesztett paraméter itt a Föld-látómező arány és a kitöréstől mért távolság koszinusza. Jelen munka során 3 paraméterre illesztünk, a harmadik a Naptól mért távolság koszinusza, így egy háromparaméteres hiperfelületet kapunk, melyet azután levonunk a fénygörbéből, hogy a háttérrel eltüntessük. 32

20.	A 091030613-as kitörés fénygörbéje a háttér levonása után. Érdekes összehasonlítani a	32
21.	A 091030613-as kitörés fénygörbéjének integrális alakja. A kijelölt minimum és maximum szintek vízszintes vonallal jelölve látszanak. A pontok a T_{xx} értékeket jelölik, a két szélső közötti tartomány a keresett T_{90} értéke.	34
22.	A harmadfokú hiperfelület-illesztéssel kapott T_{90} -hisztogram. Saját eredmény. Az ábra elkészítésekor azt a mintát használtuk föl, melyet a 4. fejezetben kidolgozott módszerrel háttérmentesítettünk. Az ábrán látszik a rövid és hosszú kitörések két púpja, mellyel alátámaszthatjuk a szakirodalmi eredményeket. (Ezen az ábrán a $\log T_{90}$ értékek szerepelnek a vízszintes tengelyen.)	35
23.	A kitörések időtartamának eloszlása a Fermi hivatalos kutatócsoportjának előzetes eredményei alapján. Látható a hasonlóság a saját feldolgozású minta (22. ábra) és a hivatalos minta között. (Ezen az ábrán a T_{90} értékek szerepelnek a vízszintes tengelyen, logaritmikus skálán.)	36
24.	Fent: Másodfokú háttérillesztés 126 Fermi-kitörésre. Lent: Harmadfokú háttérillesztés 285 Fermi-kitörésre. A másodfokú esetén a minta nem tartalmaz kitöréseket 2.5-es $\log T_{90}$ érték fölött. Ennek oka, hogy a parabolával való háttérillesztési eljárás kivágta a hosszú emissziót a kitörés lecsengésében. A harmadfokú polinom illesztésnél már látszik ez a farok is, azoban hiányoznak a mintából az igazán rövid kitörések, melyek nyomát az új módszerrel feldolgozott mintában már megtaláljuk. (Mindkét ábrán a T_{90} értékek szerepelnek a vízszintes tengelyen.)	37
25.	A 091030613-as kitörés háttérillesztése csatornánként. Balra: fénygörbe a háttérillesztés előtt és az illesztett háttér. Középen: fénygörbe a háttérillesztés és -levonás után. Jobbra: felintegrált fénygörbe és a számolt T_{90} értéke a grafikon alatt.	40

Táblázatok jegyzéke

1.	Legfontosabb gamma-kitörést detektáló műholdak.	8
2.	A GBM NaI detektorainak iránya a műhold +Z tengelyéhez (LAT effektív felületének iránya) képest.	17
3.	A 25. ábrán látható fénygörbék csatornáinak energiatartományai.	40

1. Bevezetés

1.1. A gammakitörésekről

Azóta, hogy a hidegháború alatt egy véletlen során fölfedezték a gamma-kitöréseket, a kutatókat egyre jobban foglalkoztatja ezeknek a rejtélyes, extragalaktikus, nagyenergiás kitörések eredete és magyarázata. A műholdak és műbolygók közül sokat gamma-kitörést detektáló műszerekkel is felszereltek, vagy kifejezetten ilyen vizsgálatokért küldtek föl. Ilyen a Fermi Gamma-ray Space Telescope nevű műhold is, melynek két műszere, a LAT és a GBM 8 keV – 40 MeV energiatartományban vizsgálja az eget. [2] [37]

A gamma-kitörések kutatása csak pár évtizedes múltra tekint vissza, azonban a modern technikának köszönhetően meglepően sokat tudunk a jelenségről. A műholdak naponta több kitörést is detektálnak, az adatok feldolgozására számítógépek és speciális programcsomagok állnak rendelkezésre. [38] Az interneten keresztül bárki azonnal értesülhet egy új kitörés bekövetkezéséről és hozzáférhet az adatokhoz is. [39] [37] Ennek megfelelően a kitörések fizikáját leíró elméletek száma is egyre nő, és sok közülük már kielégítően megmagyaráz egyes megfigyeléseket. A teljes elmélet kidolgozása azonban még várat magára. [36] De azon kívül, hogy a mérnököket és az elméleti fizikusokat munkára sarkallja ez a jelenség, a tudományos közvélemény érdeklődésére is számot tart: eddigi ismereteink szerint a gamma-kitörések a legnagyobb energiát legrövidebb idő alatt kibocsátani képes objektumok az Univerzumban. [2] Bármilyen nagy részecskegyorsítókat építünk is, a gamma-kitörésekéhez fogható energiát (10^{51} erg, nagyságrendileg ennyit sugároz ki a Nap is teljes élete során) soha nem fogunk tudni máshogy vizsgálni, csak a Világűrben. Ezen kívül a kozmológiai ismereteinket is bővíti a kutatás: a legtávolabbi kitörések vöröseltolódása a kvazárokéval vetekszik, tehát az Univerzum nagyon korai állapotába nyerünk így bepillantást. [26]

1.2. A diplomamunkáról

Diplomamunkámban a Fermi műhold mozgását elemzem, és ennek segítségével a gamma-kitörések fénygörbéinek háttérváltozásait modellezem (4. fejezet). A Fermi pályáján való haladása közben saját mozgást is végez, mivel úgy programozták, hogy ha kitörést érzékel, akkor a lehető legjobb pozíciót igyekszik fölvenni a kitöréshez képest. A gyors forgás azt eredményezi, hogy a gamma-fénygörbék háttere jelentős mértékben változik egy kitörés folyamán: gyakori eset, hogy a háttér néhány másodpercen belül még a kitörést magát is túlnövi! Ilyen körülmények között igen bajosan lehet a gamma-kitörések elemzéséhez hozzálátni. Megfelelő háttérleválasztás nélkül a statisztikus paraméterek értékei, melyek a kitörést jellemzik (időtartam, spektrális keménység, csúcsergia stb.), megkérdőjelezhetőek.

Ezen a helyzeten próbáltunk segíteni, amikor a Fermi mozgását kezdtük vizsgálni. A mozgás néhány jellemző paraméterét fölhasználva illesztettük a háttérre, így egy háttérmentes fénygörbét kaptunk, mely alkalmas arra, hogy belőle statisztikus paramétereket számoljunk. A kidolgozott módszerrel háttérszűrt gamma-kitörések időtartamainak eloszlását vizsgáltuk, ezzel ellenőrizve a módszer helyességét. Összehasonlítottuk a kapott statisztikát a szakirodalommal és két korábbi, más módszerrel elkészített mintával (5. fejezet). Továbbá összevetettük a saját eredményeinket a Fermi katalógusában található értékekkel, melyekkel hibahatáron belül egyeznek (6. fejezet). A munka eredményességét és hasznosságát három konferenciaposzter és egy referált publikáció is igazolja [29] [30] [31] [32].

2. A gamma-kitörések általános bemutatása

2.1. Felfedezésük és kutatásuk

A kozmikus gamma-kitöréseket (gamma ray burst, GRB) az 1960-as évek végén fedezték fel az amerikai Vela műholdakkal. Ezeket a holdakat a szovjetek esetleges űrbéli (főleg a Hold túlsó felén végzett) titkos nukleáris fegyverteszteléseik által kibocsátott gammasugár-impulzusok megfigyelésére építették. Helyettük azonban a mélyűrből érkező villanásokat találtak, melyek a további vizsgálatok szerint sem a Napból, sem a Földről nem érkezhettek. Az eredményeket (a Vela műholdak 73 kitörést detektáltak) 1973-ban tették közzé, elindítva a gamma-kitörések modern tudományos kutatását. [2] Az 1. táblázatban felsorolt műholdak detektáltak gamma-kitöréseket az elmúlt harminc évben (a teljesség igénye nélkül).

Vela 1-6	1967
IPN (Venera 11-12, Prognosz 7, Pioneer, Helios 2)	1976-1980
HEAO (High Energy Astrophysical Observatory, röntgen)	1977-1979
CGRO BATSE	1991-2000
BeppoSAX	1996-2002
HETE 2	2000-től
IPN 3 (INTEGRAL, RHESSI, AGILE, Mars Odyssey, MESSENGER, Wind)	1990-től
Swift	2004-től
GLAST – Fermi	2008-től

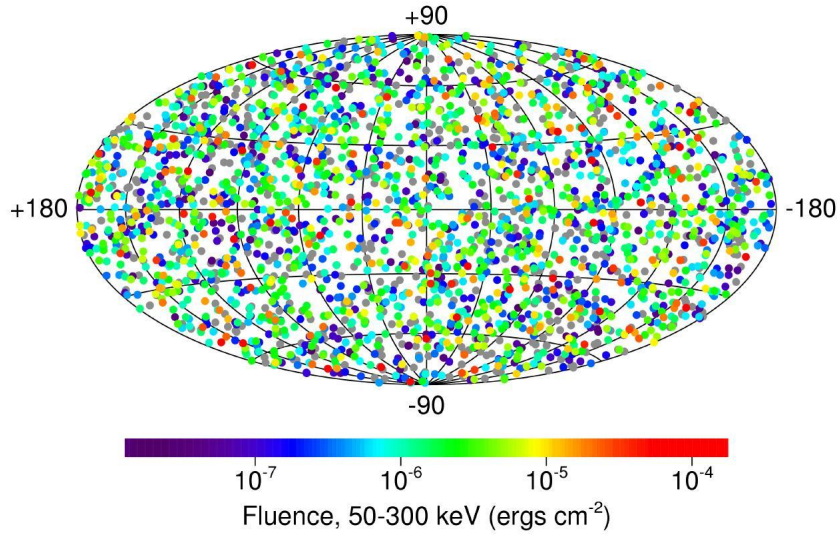
1. táblázat. Legfontosabb gamma-kitörést detektáló műholdak.

A legjelentősebb ezek közül a Compton Gamma-Ray Observatory fedélzetén működő BATSE (Burst and Transient Source Experiment) nevű eszköz, mely közel tíz éves működése során (1991. április 5-e és 2000. június 4-e között) több mint 2704 gammakitörést detektált, lefedve közel az egész égboltot. Mérései alapján dőlt el az a kérdés is, hogy vajon a gamma-kitörések extragalaktikus eredetűek-e.

Jelenleg legtöbb és legkiterjedtebb mérést a *Swift* és a *Fermi* (eredeti nevén *GLAST*) végez.

2.2. Eredetük

Az 1. ábrán látható a BATSE által detektált kitörések eloszlása az égbolton: egyenletes, izotrop az eloszlás. [4] Ez kizárja a galaktikus eredetet, ehelyett kozmológiai távolságokat valószínűsít.



1. ábra. A BATSE által detektált gamma-kitörések eloszlása az égbolton egyenletes, izotrop.

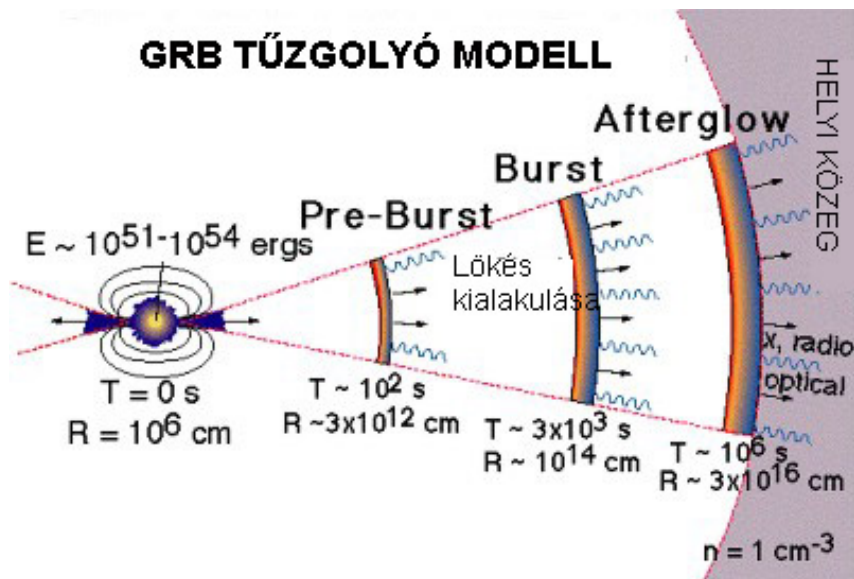
A kozmológiai eredet bizonyítékát a BeppoSax olasz–holland műhold mérése alapján nyertük, amikor a GRB970228 jelű kitörésnél optikai tartományban utófényt mért: a vöröseltolódásból ($z = 0,7 \pm 0,1$) nyilvánvaló volt, hogy extragalaktikus jelenségről van szó. [17] Azóta sok kitörésnél figyeltek meg utófényt és mértek vöröseltolódást, egyeseknek a szülőgalaxisát is azonosítani tudták.

Két különálló kategóriába esnek, attól függően, hogy 2 másodpercnél rövidebb vagy hosszabb-e a kitörés, valamint hogy mennyivel több energiát sugároznak ki kisebb hullámhosszon, mint nagyobbban (ennek mérésére a „keménység”-nek nevezett statisztikai jellemző szolgál). A rövid időtartamú, kemény spektrumú kitörések a rövid–kemény kitörések (short-hard bursts), a hosszú időtartamú, lágy spektrumú kitörések a hosszú–lágy kitörések (long-soft bursts). [2] Az elmúlt években felmerült egy harmadik, közepes időtartamú csoport léte is (intermediate bursts), melynek eredte még nem tisztázott. [13] [14] [3] [23] [34] [16]

Az mindenesetre valószínű, hogy a hosszú gamma-kitörések 30 naptömegnél nagyobb csillagok (kollapszárnak is nevezik őket) összeroskadásakor, a rövid gamma-kitörések pedig kompakt objektumok (pl. neutroncsillag, fekete lyuk, fehér törpe) összeütközésekor jönnek létre. [2] Ezt onnan lehet tudni, hogy a kitörések egy részének azonosították a szülőgalaxisát: a hosszú kitörések általában csillagkeletkezésben aktív galaxisokhoz tartoznak, ahol sok a fiatal, nagy tömegű, rövid életű csillag. A rövid kitörések pedig elliptikus galaxisok öreg csillagpopulációinak tagjai, ahol a csillagkeletkezési ráta alacsony, és ezért – jelenlegi ismereteink szerint – csak a kompakt objektumok összeütközésével lehet magyarázni a gamma-kitörésekhez tartozó nagy energiát. [36]

2.2.1. A tűzgolyó modell

Mindkét fajta gamma-kitörés keletkezésére a legelfogadottabb elmélet az úgynevezett tűzgolyó (*fireball*) modell. E szerint a kollapszus során az impulzusmomentum-megmaradás miatt egy akkréciós korong keletkezik az egyenlítő mentén, és két, forgástengely-irányú, relativisztikus sebességű nyaláb (jet) indul a létrejövő fekete lyukból kifelé két irányba.



2. ábra. A tűzgolyó modell. Részletek a szövegben.

A modell szerint a gammasugárzás eredete a belső lökeshullám (*internal shock*): a kidobott relativisztikus nyaláb gyorsabb részei utoléri a lassúbbakat, és összeütköznek. Ekkor az itt lévő elektronok szinkrotron sugárzást bocsátanak ki, ami egyéb relativisztikus hatások miatt gamma-tartományba tolódik el. Az ekkor észlelt gammasugár-kibocsájtást azonnali emisszióknak (*prompt emission*) nevezik. [5]

Amikor a kilövellt nyaláb a külső közeggel, a csillagközi anyaggal vagy a saját maga által korábban lefújt anyaggal találkozik, akkor jön létre a külső lökeshullám (*external shock*). Ennek következménye az utófény (*afterglow*), melyet röntgen-, UV- és optikai tartományban detektálunk. Az utófény mérésével a kitörés távolságát és pontos pozícióját is meg lehet határozni (erre a gamma-spektrum csak nagyon nagy hibával alkalmas). [35]

2.2.2. Alternatív magyarázatok

Egyes kutatók szerint a szinkrotron sugárzás folyamata nem, vagy csak részben magyarázza a megfigyeléseket. Vannak ugyanis olyan jelenségek, amelyekre nem tud kielégítő magyarázatot adni, sőt olyanok is vannak, amelyek egyenesen ellentmondanak neki. Ilyen

pl. az a tény, hogy az α alacsony energiás spektrálindeks a megfigyelések szerint gyakran meghaladja az ún. „szinkrotron halálvonalat” (*synchrotron deathline*), ami a szinkrotron modell alapján α értékére határt szab: $\alpha \leq -\frac{2}{3}$. A megfigyelt α -k az esetek 30%-ában $\alpha \sim -1$ körül csoportosulnak. Egy másik megmagyarázatlan jelenség, hogy α „követi” a fluxust, vagyis hogy magasabb fluxus esetén α értéke is magasabb (ez az ún. *tracking behavior*). [21]

Ezek magyarázatára az elmúlt években fölvetették, hogy a szinkrotron sugárzás mellett egy másik sugárzásfajta is szerepet játszhat a folyamat során, az ún. *jitter* sugárzás. Ennek elmélete abból indul ki, hogy a gamma-kitörés során létrejövő mágneses tér nagyon kis skálán nem homogén, hanem véletlenszerűen összekuszálódott. Ebben az elektronok nem spirális, hanem sztochasztikus pályán haladnak, így nem szinkrotron sugárzás jön létre, hanem valamilyen „izgő-mozgó”, vagyis „jitter” sugárzás. (Ez egyébként speciális esetben ugyanolyan spektrummal rendelkezhet, mint a szinkrotron sugárzás.) [20]

A jitter sugárzás elméletével a fenti ellentmondások megmagyarázhatók. Mindazonáltal a gamma-kitörések legteljesebb leírásához a két sugárzásfajta együttes jelenléte szükséges. [20] [11]

Egy másik, néhány kitörést kielégítően magyarázó elmélet az ún. ágyúgolyó (*cannonball*) modell. [9] A modell lényegi újdonsága az eddigiekhez képest, hogy feltételezi, hogy a szinkrotron sugárzás mellett az inverz Compton-szórás is szerepet játszik a gamma-kitörés folyamatában. [35]

2.3. Nyitott kérdések

Amellett, hogy az eredetükre többé-kevésbé jó modell van, nagyon sok még a nyitott kérdés a gamma-kitörések kutatásában. Többek között a következőkre keresnek még választ a kutatók.

Csak két fő típus van? Létezik-e valójában, és ha igen, milyen tulajdonságai vannak a harmadik csoportnak? Vajon van-e különbség a neutroncsillag–neutroncsillag és a fekete lyuk–neutroncsillag párok (és a többi hasonló pár) ütközésében? Hogyan lökődik ki a relativisztikus nyaláb? Kibocsájt-e az objektum más nagyenergiás részecskéket is (leptonok, hadronok, neutrínók), vagy forrása-e a kozmikus sugárzásnak? Van-e köztük a szupernóva-robbanásokhoz, és ha igen, micsoda? (A Swift műhold mérése 4 kitörés esetén megerősítette, hogy valójában hatalmas erejű szupernóva-robbanás volt, de a többről nem tudjuk ezt elmondani. [36]) Mekkora a jet sugara, és mitől függ a mérete? Mi az utófényben észlelt jellegzetes letörések magyarázata? Milyen az objektumot körülvevő anyag szerkezete, és ez hogy befolyásolja a kitörés menetét? [20]

Ebből is látszik, hogy a téma kutatása fontos, érdekes és szerteágazó. A gamma-kitörések megértésével és megméréssel talán közelebb jutunk az Univerzum történetének

feltérképezéséhez is, mivel ezek az eddig ismert legfényesebb objektumok. [26] Sugárzásuk elnyelődését vizsgálva különböző kozmológiai korok történelmét is megismerhetjük. [36]

2.4. A gamma-kitörések statisztikus vizsgálata

A gamma-kitöréseket több okból érdemes statisztikusan is vizsgálni. Egyrészt mivel igen sok, térben és időben elkülönülő kitörésről van adatunk, másrészt mivel a mérés jellegéből és a nagy távolságból adódóan az adatok elég nagy hibával terheltek. (Ez nem jelenti azt, hogy a jel a nagy távolság miatt szükségszerűen kicsi. Például 2008. március 19-én a Földről szabad szemmel is látható gamma-kitörés történt: 5,76 magnitúdó fényességű volt az optikai utófénye a maximumban, a vöröseltolódására pedig $z = 0,937$ értéket mértek. [7] Ezen kívül más érdekes példák is vannak, lásd [25], [1].)

A vizsgálatok legtöbbször arra alapul, bizonyos jól definiált fizikai mennyiség között kapcsolatokat keresnek. Ilyen fizikai érték pl. az ún. T_{90} vagy T_{50} érték, mely azt jelenti, hogy mennyi idő alatt érkezett be a kitörés teljes energiájának a 90%-a, illetve az 50%-a. Diplomamunkámban elsősorban ezt a változót vizsgálom, ezért definícióját és gyakorlati meghatározását itt ismertetem.

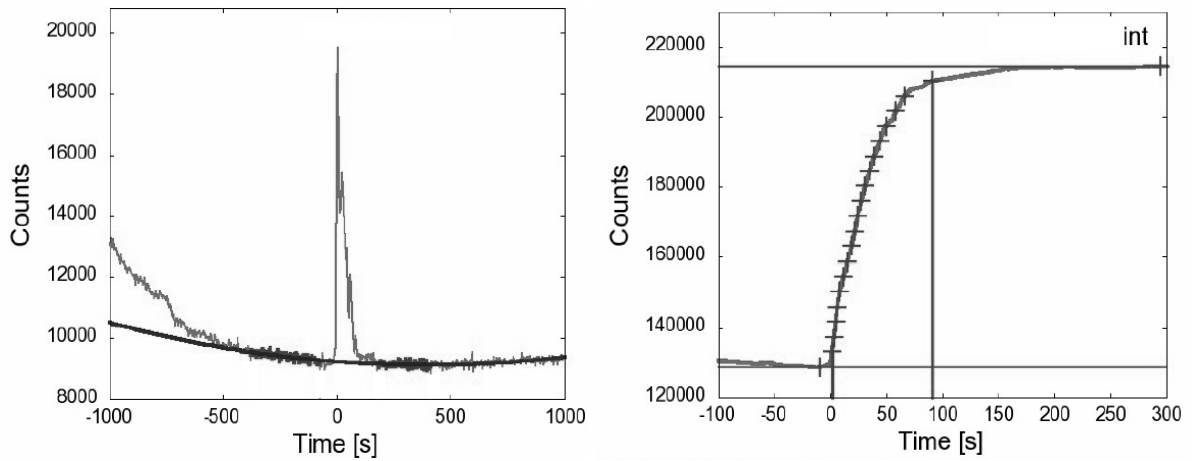
2.4.1. A T_{90} statisztikai változó meghatározása

A T_{90} az egyik leggyakrabban használt statisztikai paraméter, a kitörés időbeli lefolyását jellemzi. Megmutatja, hogy mennyi idő alatt érkezett be az összenergia 90%-a. (Az összes energia beérkezésének időtartamát nemigen lehet pontosan meghatározni, mivel a kitörés eleje és vége belesimul a háttérbe.) [33]

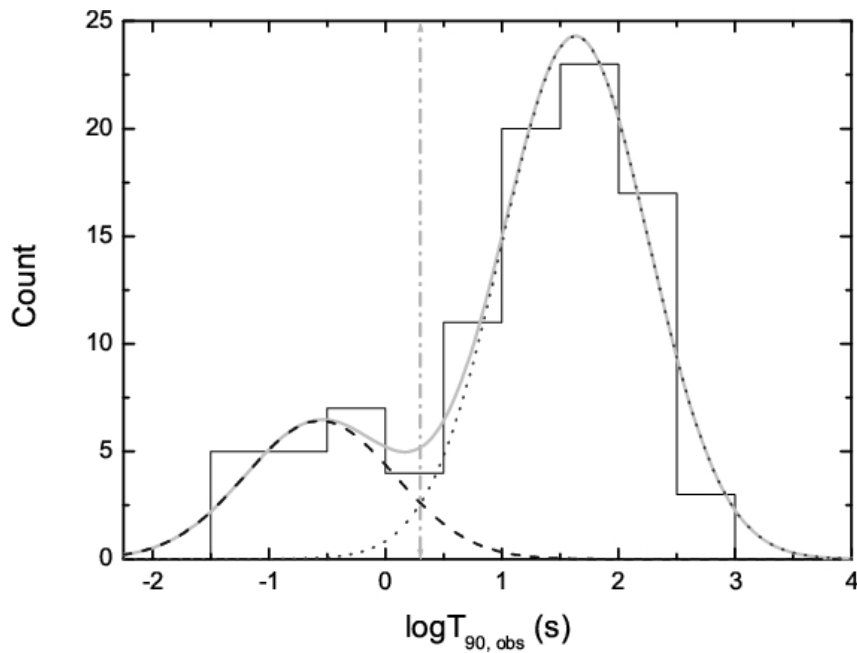
A T_{90} úgy határozható meg a gyakorlatban, hogy a fénygörbét¹ föl kell integrálni (a valószínűségi számításból ismert sűrűség- és eloszlásfüggvény közötti kapcsolat analógiájára), az integrált fénygörbe minimum és maximum szintjeit ki kell jelölni, és venni kell a két szint különbségének középső 90%-át (tehát 5%-tól 95%-ig): az ehhez tartozó időtartam lesz a keresett T_{90} .

A T_{90} mellett hasonló módon definiálható a T_{50} , és más tetszőleges T_{xx} paraméter is, de az előbb említett kettőt használják leginkább elterjedten a gyakorlatban.

Fontos megjegyezni, hogy az integrális fénygörbe elkészítése előtt a háttérzajt valahogy le kell vonni. Erre egy egyszerű, de hatékony módszer, ha valamilyen elvi görbét illesztünk rá, és azt levonjuk a fénygörbéből. Nincs semmilyen megkötés rá, hogy milyen alakú legyen a levonandó görbe, de általában hatványfüggvény alakúnak szokták választani. [33], [12]



3. ábra. A 080916009 jelű kitörés fénygörbéi. Bal: eredeti differenciális alakban. Jobb: integrális alakban, a függőleges vonalak közötti tartomány a T_{90} értéke, mely a minimum és maximum (vízszintes vonallal jelzett) szintek különbségének középső 90%-a.



4. ábra. A kitörések időtartamának eloszlása, logaritmikus skálán. Az eloszlás egyértelműen két púpú, ez vezetett oda, hogy a gamma-kitöréseket két csoportba sorolták (hosszú és rövid kitörések).

2.4.2. T_{90} -hisztogram

A kitörések időtartamának vizsgálatához általában a T_{90} értékét, illetve ennek tízes alapú logaritmusát használják ($\lg T_{90}$), mivel a T_{90} változó értéke több nagyságrendet

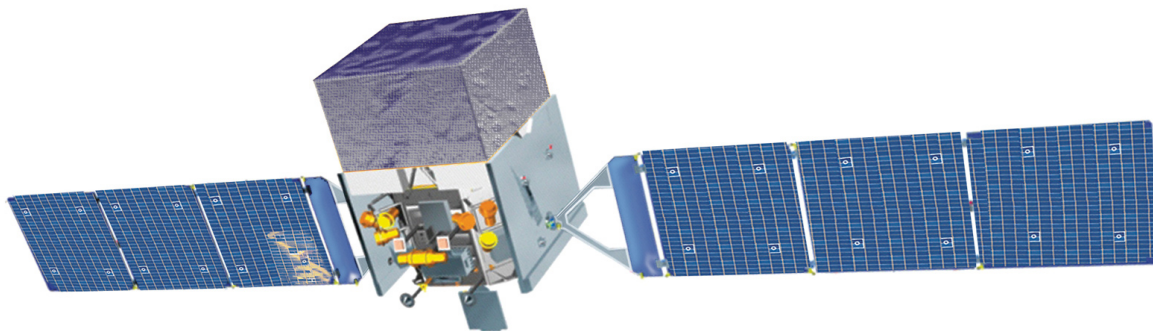
¹ Fénygörbe: a beütések száma az eltelt idő függvényében ábrázolva.

átfog. Az 1990-es évek első felében megvizsgálták ennek eloszlását [18]. Azt találták, hogy az eloszlás egyértelműen két púpú, lásd 4. ábra. A két púp következménye, hogy a gamma-kitöréseket a két ismert csoportba sorolták (hosszú és rövid kitörések). A két púpot jól illeszti egy-egy Gauss-görbe. Az illesztés alapján a határt $\lg T_{90hatar} \approx 0,3$, vagyis $T_{90hatar} \approx 2$ s-nál lehet meghúzni, ezért a $T_{90} > 2$ s időtartamúak a hosszú, a $T_{90} < 2$ s időtartamúak a rövid kitörések.

Itt újra megemlítem, hogy az eloszlás alaposabb vizsgálatával kimutatták egy harmadik púp jelenlétét is a két előző között, az ilyen kitörések azok, melyeket közepes (*intermediate*) kitörésekként szokás emlegetni. Azonban nem tisztázott még, hogy milyen fizikai folyamatok hozzák létre őket. [13] [14] [3] [23] [34] [15]

3. A Fermi műhold

A Fermi Űrtávcsövet 2008. július 11-én indították 565 km magas, 25,6°-os inklinációjú földkörüli pályára. Két tudományos műszert vitt magával: a LAT-ot és a GBM-et.



5. ábra. A Fermi műhold fantáziaképe.

A Large Area Telescope (LAT) 20 MeV – 300 GeV közötti gammasugarakat detektál eddig soha nem látott érzékenységgel. Az égbolt igen nagy területét, kb. egyötödét tudja egyszerre lefedni, a műhold pályája pedig olyan, hogy 3 óránként az egész égboltot képes belátni. [37]

A Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) érzékenysége a 8 keV – 40 MeV-os energia-tartományt fedi le, vagyis a viszonylag alacsony energiákon is végez méréseket. Ha észlel egy kitörést, a fedélzeti számítógépe (DPU) által meghatározott koordinátákat elküldi a LAT-nak, amely az objektumot sokkal hosszabb ideig (még 5 óráig) detektálja. [22]

Diplomamunkámban a GBM által detektált adatokat elemeztem, a műhold pozíciójára vonatkozó adatok azonban a LAT-adatfájlokban találhatók. Ezért részletesen foglalkozok a GBM-detektorok működésével, az adatfájlok szerkezetével, és röviden kitérek a LAT-adatfájlokra, de eltekintek a LAT-detektor részletes ismertetésétől, mert erre itt nincs szükség, de a szakirodalomban ez is megtalálható [37].

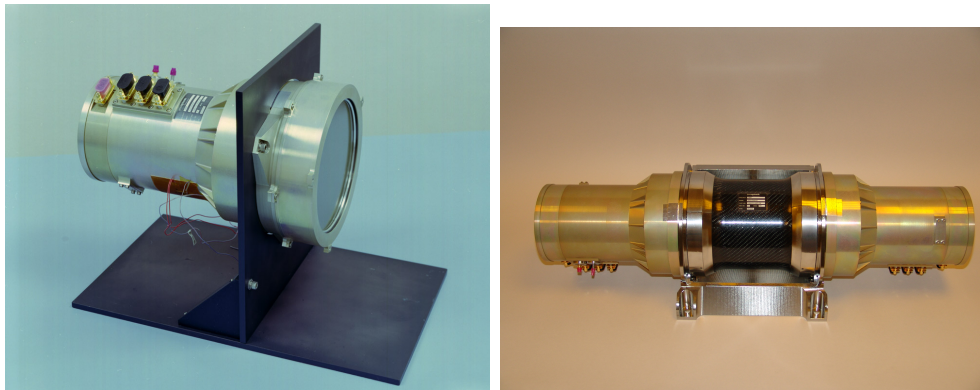
3.1. A detektorok

A **Gamma-Ray Burst Monitor** (GBM) hardverfelszerelése a következő lényeges elemeket tartalmazza:

- 12 talliummal aktivált nátrium-jodid (NaI(Tl)) szcintillációs detektor. Alacsony energiaspektrumon képesek mérni: 8 keV – 1 MeV. A kristály maga 12,7 cm átmérőjű és 1,27 cm vastag, ezt egy légmentesen lezárt alumíniumházba helyezték a

hozzá tartozó fotoelektron-sokszorozóval (PMT) együtt, mivel a NaI nedvszívó tulajdonságú. Elé egy 0,6 cm vastag speciális üveglak került. A kristály felületét 0,7 mm vastag szilikonréteggel borították be, ez biztosítja a 8 keV energiájú alsó mérési küszöböt. [22]

- 2 bizmut–germanát (BGO) szcintillációs detektor. Energiatartománya 200 keV – 40 MeV között van, tehát átfed a NaI-detektorokkal és a LAT-tal is. A kristály 12,7 cm vastag. A ház anyaga szénszállakkal megerősített műanyag (*carbon fibre reinforced plastic, CFRP*), kétoldalt titániumgyűrűkkel körbevéve. A kristályhoz két fotoelektron-sokszorozó is csatlakozik, így javítva a fénygyűjtő képességet. [22]



6. ábra. Egy NaI és egy BGO detektor fényképe. Mindkét műszer a Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) hardverfelszereléséhez tartozik. A diplomamunkában a NaI detektorok adatait elemzem.

A 12 db NaI-detektor elhelyezkedése egymáshoz és a műhold tengelyéhez képest elég összetett. A 2. táblázat megadja a detektorok irányát a műhold ún. +Z tengelyéhez képest (mely tulajdonképpen a LAT maximális effektív felületének irányát jelenti). Az azimut-szöveget az óramutató járásával megegyező irányban mérik a műhold +X tengelyétől kezdve (ez a napos oldala felé mutat). A két BGO-detektort ellentétesen helyezték el egymással, így valamennyi kitörés detektálható egyikükkel.

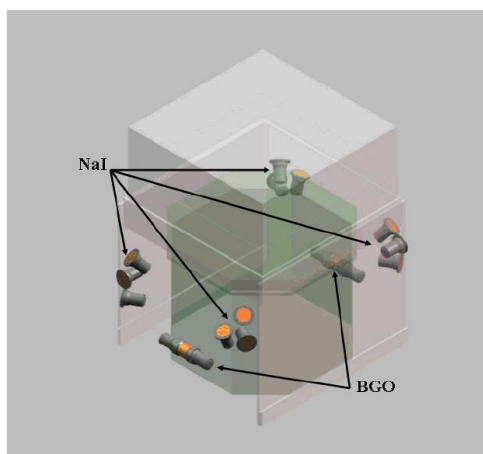
A 2. táblázat megvizsgálásával kiderül, hogy a detektorok irányítása jól meghatározott logikát követ, melynek célja, hogy az éggömb felét (azt a felét, ami éppen nem a Föld korongja felé mutat) a lehető legjobban lefedjék detektorokkal, és így a legnagyobb hatásfokot ériék el. Ennek módját a legkönnyebb úgy megérteni, hogy elképzeljük, hogy a 12 detektor irányuk alapján egy félgömb felületén helyezkedik el (7. ábra).

A 0-ás és 6-os detektorok a függőleges tengellyel mindössze 20° -ot zárnak be, ezek tehát majdnem függőleges irányban detektálnak. Az 5-ös, 4-es, 8-as, 11-es (b), 10-es (a) és 2-es detektorok kb. 90° -ot zárnak be a függőlegessel, és ebben a síkban egy szabályos hatszög

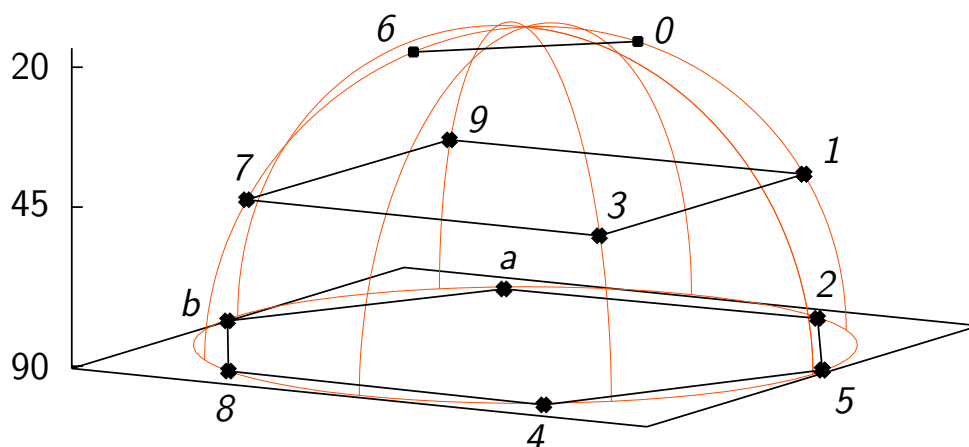
hat csúcán helyezkednek el, így a vízszintes síkban körben mindent tudnak detektálni. A még nem említett négy detektor, a 3-as, 7-es, 9-es és 1-es a függőlegessel 45° -ot zár be, egymással pedig egy négyzet négy csúcát alkotják, tehát a függőlegesen állók és a vízszintesen fekvők közötti irányokban is folyik adatvételek ezekkel.

Detector ID #	AZIMUT (fok)	ZENIT (fok)
0	45.9	20.6
1	45.1	45.3
2	58.4	90.2
3	314.9	45.2
4	303.2	90.3
5	3.4	89.8
6	224.9	20.4
7	224.6	46.2
8	236.6	90.0
9	135.2	45.6
10 (a)	123.7	90.4
11 (b)	183.7	90.3

2. táblázat. A GBM NaI detektorainak iránya a műhold +Z tengelyéhez (LAT effektív felületének iránya) képest.



7. ábra. A GBM detektorainak helyzete, a szakirodalomban publikált szemléltető ábra a detektorokról [37]. Lásd még a 8. ábrán.



8. ábra. A NaI detektorok irányításának szemléltetése, melyet a 2. táblázat alapján készítettem. A 0-ás és 6-os detektorok a függőleges tengellyel mindössze 20° -ot zárnak be, ezek tehát majdnem függőleges irányban detektálnak. Az alsó hat detektor kb. 90° -ot zár be a függőlegessel, és ebben a síkban egy szabályos hatszög hat csúcsán helyezkedik el, így a vízszintes síkban körben mindent tudnak detektálni. Négy további detektor a függőlegessel 45° -ot zár be, egymással pedig egy négyzet négy csúcsát alkotják, tehát a függőlegesen állók és a vízszintesen fekvők közötti irányokban is folyik adatvételek ezekkel. A maradék két detektor a függőleges tengellyel mindössze 20° -ot zár be, ezek tehát majdnem függőleges irányban detektálnak.

3.2. Az adatok

A Fermi műhold először 2008. július 14-én adott triggerjelet. Azóta (2010 májusáig) több, mint 700 db trigger történt, de ebből csak mintegy 500 volt valóban gamma-kitörés. A többi trigger a következők egyike lehetett [HIVATKOZÁS]:

- lágy-gamma ismétlő forrás (Soft-Gamma Repeater – SGR),
- Nap-fler,
- földi felsőlégköri gammavillanás (Terrestrial Gamma Flash),
- részecskeáramlat,
- a háttér statisztikus fluktuációi,
- a Cygnus X–1 fluktuációi,
- egyéb, bizonytalanul osztályozható események.

A Fermi által mért kitörések azonosítására egy 9 jegyű számsorozat szolgál, pl. 080916009, ahol az első 6 számjegy a trigger napját jelöli (év, hónap, nap), az utolsó 3 számjegy pedig az időpontot azonosítja az adott napon (a napot 1000 részre osztva). Például a 080916009 jelű kitörés 2008. szeptember 16-án 00:12:45 UT-kor történt.

Az általam feldolgozott adatok a legacy.gsfc.nasa.gov, valamint a <http://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi> nyilvános webhelyekről érhetők el[22]. Az első címen a GBM detektor adatait kitörésenként egy-egy külön

könyvtárba csoportosítják. Egy könyvtár tartalmaz 14 TTE, 14 CTIME és 14 CSPEC fájlt (12 NaI és 2 BGO detektor), valamint két katalógusfájlt. Alapvetően három nagy kategóriába osztják az összes GBM-adatot: napi adatok (daily data), kitörési adatok (burst data) és frissített adatok (updates). A napi adatok napokra lebontva tartalmazzák a teljes háttérrel (CTIME és CSPEC fájlok), valamint információt a detektorok kalibrációjáról és a műhold helyzetéről. A kitörési adatok természetesen tartalmazzák a TTE fájlokat (detektoronként), valamint a CTIME és CSPEC fájloknak azon részletét, mely a trigger előtt és után 1000 s-mal keletkezett (szintén detektoronként). Ezen kívül megtalálhatók itt egyéb katalógusadatok a kitöréshez (pozíció, intenzitás, keménység, előzetes osztályozás stb.). A frissített adatok általában a földi kutatócsoportok által javított, módosított, pontosított adatokat tartalmazzák. A második címen a LAT-adatok egy interaktív felületen kérhetők le, megadott szűrők beállításával.

Az interneten közzétett összes fájl FITS² formátumú, ez az adattárolási forma azért hasznos, mert az adatokon kívül nagyon sok egyéb információt is tartalmaz az adott kitörésről (pozíció, detektor stb.). Az ilyen típusú fájlokkal való munkához több lehetőség is rendelkezésre áll, ezek közül én a CFITSIO³ nevű programkönyvtár telepítésével a C programozási nyelv felhasználása mellett döntöttem.

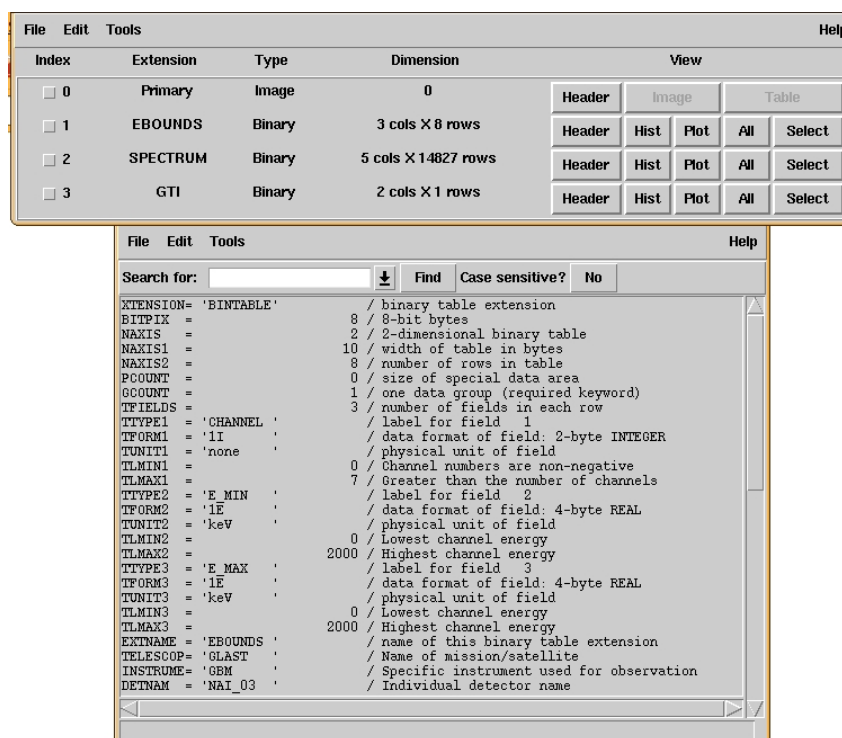
A munka jelentős részét tette ki az adatfájlok szerkezetének föltérképezése. Ebben az Fv⁴ nevű FITS-olvasó volt segítségemre (9.ábra).

² A FITS – Flexible Image Transporting System – egy olyan fájlformátum, melyet elterjedten használnak a csillagászatban. Alkalmas képek és többdimenziós táblázatok tárolására. Minden FITS fájl legalább egy fejlécből (*header*) és egy adategységből (*data unit*) áll. Általában a fejléc azt írja le, hogy az adategységet hogy kell értelmezni.

³ Lásd: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/fitsio/>

A <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/fitsio/cexamples.html> oldalról elérhetőek azok a nyílt forráskódú programok, melyekkel egyszerűen lehet kezelni a fits fájlokat.

⁴Fv: <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/ftools/fv/>



9. ábra. Egy fits fájl szerkezete: Minden FITS fájl legalább egy fejlécből (*header*) és egy adategységből (*data unit*) áll. Általában a fejléc azt írja le, hogy az adategységet hogy kell értelmezni. Az ábrán az Fv nevű FITS-olvasóval megnyitott fájl szerkezeti felépítése és headerje látható.

3.2.1. A LAT-adatok

A LAT-adatok két kategóriába sorolódnak: EVENT fájlok és SPACECRAFT fájlok. Az EVENT fájlokban a LAT detektora által összegyűjtött foton-adatok találhatók. A SPACECRAFT fájlokban a műhold pozíciójára vonatkozó adatokat közlik. Ez az az adatfájl, melyre a műhold mozgásának vizsgálatakor szükség van. Ebben az adatok 30 másodperces binokban szerepelnek. Többek között a műhold helyzete a Földhöz képest, a Földfelszín fölötti magassága, a LAT effektív felületének irányítása is itt található, de például itt tárolják azt is, hogy a műhold mikor lépett be a Dél-Atlanti Anomália területére, mely az adatgyűjtést nagy mértékben befolyásolhatja a megnövekedett sugárzási szint miatt. Azt, hogy a LAT effektív felületének irányához képest a GBM-detektorok hogy helyezkednek el, a 2. táblázatban ismertettem.

3.2.2. A GBM-adatok

A GBM-detektorok jeleit egy 9,6 MHz-en működő analóg-digitál konverter 4096 energiacsatornába (12 bit) osztja. Két esemény közti holtidő minimálisan $2,6 \mu s$, de ennek pontos értéke függ a jel magasságától is. Az adatok 8 ill. 128 energiacsatornába kover-

tárolódnak le a *Pulse Height Analysis (PHA)* nevű eljárás során. Az eljárás nemcsak a pulzusok magasságát veszi figyelembe, hanem alakjukat is: a pulzusok alakját illeszti, így mintavételez. [22]

A 8 energiacsatornát tartalmazó fájlok az ún. CTIME fájlok. Mint a nevük is mutatja, ezekben inkább az időadat a lényeges, nem a spektrális: a binék szélessége általában 256 ms, de lehet ennél kisebb is. Például amikor trigger történik, az adatgyűjtés sebessége megnő, és a binék szélessége 64 ms-ra vált.

A 128 energiacsatornát tartalmazó fájlok az ún. CSPEC fájlok. Itt a spektrális adatok a lényegesebbek, éppen ezért az időbeli felbontás rosszabb: 4096 ms a binék szélessége általában.

A fent említett két fájl típus egyfolytában készül, függetlenül attól, hogy kitörés zajlik-e vagy sem. Ezek dinamikus és folyamatos elemzésével határozza meg a fedélzeti processzor azt a küszöböt, ami fölött nagy valószínűséggel már gammakitörés sugárzását észlelik a detektorok. Ekkor jelet ad a kioldásra (trigger) és az adatok sokkal precízebb gyűjtésére a detektoroknak.

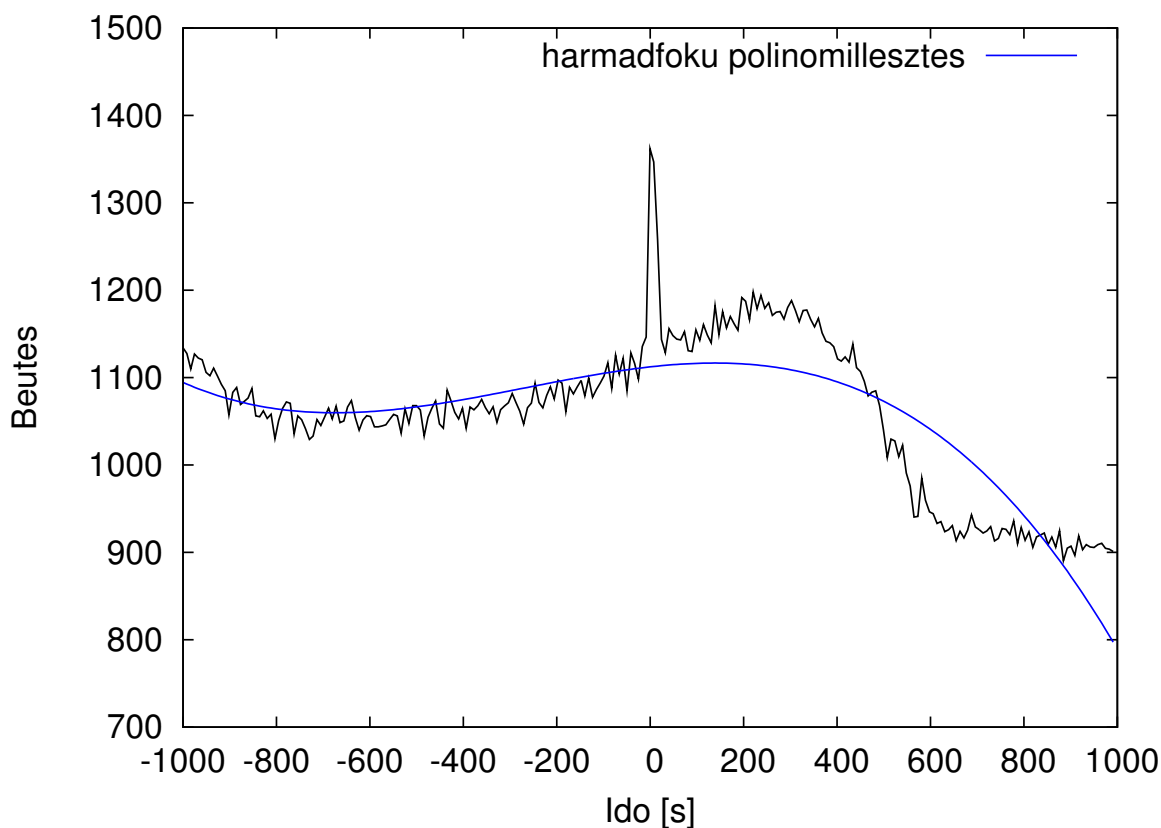
A triggerjel után gyűjtött adatokat TTE-nek (time-tagged event) nevezik. Ez az adatfajta is 128 energiacsatornát tartalmaz. Az adatgyűjtés módszere eltér az eddig ismertektől. Itt minden egyes foton beérkezési idejét és energiáját is rögzítik, ami sokkal pontosabb mintavételezést eredményez. A detektorok a TTE adatokat egy külön tárolóba gyűjtik, melyet 30 s-onként újraírnak, ha nincs triggerjel. Ha van, akkor az adatokat (a trigger megelőző 30 s-mal együtt) közvetlenül átküldik a központi processzornak. A TTE adatok gyűjtése összesen 300 s-ig tart. [22]

Mivel a kitörés időbeli lefolyását szeretném meghatározni, kézenfekvő lenne a TTE fájlokat használni. Azonban a TTE fájlok csak 30 s-ot tartalmaznak a kitörés előtt, ami kevés ahhoz, hogy a háttér meghatározhassuk. A háttér pontos meghatározásához és levonásához legalább 100 – 200 s szükséges. Ezért a CTIME fájlokat fogom fölhasználni, mivel ez a fájl típus 1000 s-ot tartalmaz a kitörés előtt és után is, ez tehát bőven elég. (Természetesen csak a kitörés körüli 100 – 200 s-nak lesz jelentősége, a többivel nem fogunk foglalkozni, mivel azok időben túl messze vannak ahhoz, hogy az ottani háttér a kitörésre ráakódhasson.) Azért is a CTIME fájlt használom, mert annak jobb az időbeli felbontása, mint a CSPEC-nek.

4. A műhold mozgása és a kitörésekre ráakódó háttér kapcsolata

4.1. Az alapprobléma

Ahogy a 2.4.1. fejezetben is említettem, mielőtt egy gamma-kitörés elemzéséhez hozzálátnánk, előbb a háttérrel valahogy el kell róla távolítani. Erre többnyire hatékony módszer lehet a polinomfüggvénnyel való illesztés. A szakirodalomban többnyire másod-, illetve harmadfokú polinom illesztése fordul elő [33], [12]. Ez egyszerű hátterek esetén kielégítő eredményt adhat, azonban a Fermi esetében gyakran előfordulnak olyan kitörések, melyeket egyértelműen nem jól illeszt egy másod- vagy harmadfokú polinom, például a következő esetben (091030613-as kitörés, 3-as detektor):



10. ábra. A 091030613-as kitörés fénygörbéje. GBM-adatok, 3. NaI-detektor. A kitörés a 0. másodpercnél látszik, de a háttér túl gyorsan változik ahhoz, hogy a fénygörbét megfelelően elemezni lehessen. (Az illesztett harmadfokú polinom egyértelműen nem használható.) Az ilyen kezelhetetlen fénygörbék jellemzőek a Fermi adatbázisában.

Ezen az ábrán a 0. időpillanatban látszik a kitörés, de a háttér nagyon hamar túlnövi.

A háttér pontos levonása azonban szükséges mindenfajta további vizsgálatához, legyen szó a kitörés időbeli lefolyásának vizsgálatáról vagy a spektrum illesztéséről.

Mivel ismert, hogy a Fermi pályáján haladása közben valamilyen saját tengely körüli forgást is végez egy beállított program szerint (triggerjel után a lehető legrövidebb idő alatt úgy fordul, hogy a kitörés a LAT látómezejébe essen, ez az ún. ARR = Autonomous Repoint Request [37]), ezért feltételezhető, hogy a háttér ilyen extrém alakulásai valahogy ezzel a mozgással hozhatók összefüggésbe.

A következőkben egy olyan modellt alkotunk, melynek leprogramozásával ez a hatás kiküszöbölhető. A módszert a továbbiakban is a GBM-adatokon tesztelem.

4.2. A modellalkotás

Először is érdemes megvizsgálni azt a kérdést, hogy mi okozza a háttérrel. Tudjuk, hogy van kozmikus gammaháttér, ezt természetesen nem hagyhatjuk figyelmen kívül. Ezen kívül jelentős szerepe lehet a Nap gammasugárzásának is. Ezen kívül a Föld felső légkörében lejátszódó folyamatok is produkálnak ún. teresztikus gammasugarakat ([22]), mely szintén hozzáadódhat a háttérhez. Egyéb, ismert gammaforrások is léteznek a Tejútrendszeren belül és kívül, ezek hatását egyelőre hozzávesszük az általános gamma-háttérhez, mert ezek időben nem változnak sokat, míg tart a kitörés.

Ha éppen nincs kitörés, a Fermi arra van programozva, hogy felmérje a teljes égboltot, ezért szisztematikusan pásztáz. Ha azonban valamelyik detektor kitörést triggerel, akkor a műhold a lehető leggyorsabban úgy fordul, hogy a LAT látómezejébe essen a kitörés iránya. Ezért láthatunk ennyire változó háttérrel egy-egy kitörés közvetlen közelében (lásd 10 ábra is).

Ha tehát ismernénk az adott detektor irányát az adott időpillanatban, közelebb kerülnénk a háttér változásának megértéséhez, mivel a háttér szintjének valamilyen módon függnie kell a kitörésnek a detektorhoz viszonyított helyzetétől (ez az égbolton a köztük bezárt szöget jelenti). A detektor látómezejének meghatározása nem egyszerű kérdés, mivel a kalibrációs adatok szerint a detektor normálisához képest $> 90^\circ$ -ban érkező sugarakat is képes detektálni, lásd 11. ábra [22].

Ettől az effektustól első közelítésben eltekintek, és a detektor látómezejének a $\pm 90^\circ$ -os tartományt tekintem. További vizsgálatok tárgya kell, hogy legyen, hogy mi történik, ha ezt az effektust is figyelembe vesszük.

Ezen kívül hasznos ismeret lenne az, ha a Nap (mint erős gammaforrás) pozícióját is ismernénk, azaz tudnánk a Nap helyzetének a detektor irányával bezárt szögét. A Napot most pontszerű forrásnak fogom tekinteni az egyszerűség kedvéért.

Valamint vizsgálhatnánk azt is, hogy a Föld milyen hatást vált ki, ha éppen bekerül az adott detektor látómezejébe. A Földet természetesen már nem tekinthetjük pontsze-

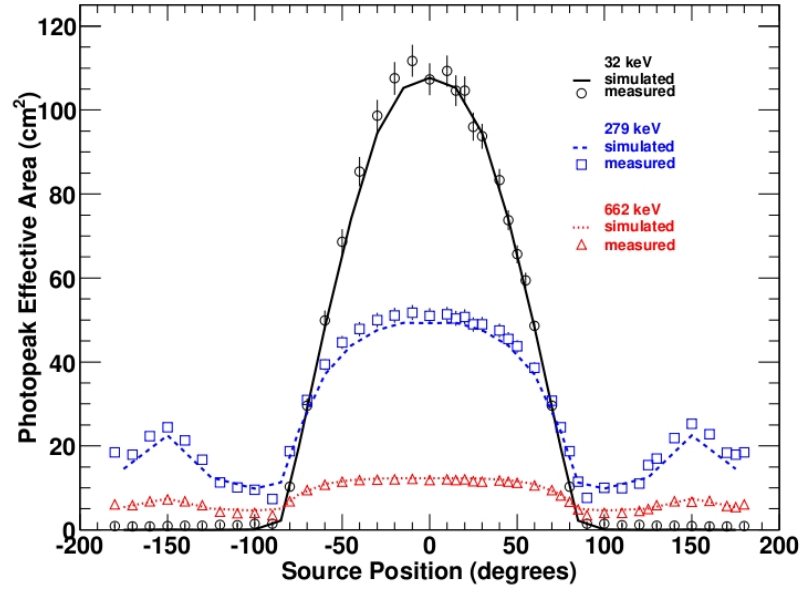


Figure 12. Angular dependence of the NaI detector effective area.

11. ábra. A NaI-detektorok effektív felületének szögfüggése a szakirodalom alapján. [22]

rűnek. (Ismerve a Fermi átlagos keringési magasságát (565 km) adódik, hogy a Föld a Fermi fedélzetéről $\approx 67^\circ$ -os félnyílásszög alatt látszik.) A Föld esetében mindenképpen figyelembe kell venni azt, hogy a kozmikus háttérből valamennyit kitakar, valamint egy saját (terresztrikus) értékkel hozzá is járul a háttérhez.

Ezekből az alapfeltevésekből kiindulva kidolgoztam egy eljárást (a következő fejezetben leírt módon), mellyel meghatározom minden időpillanatban a detektor és a kitörés által bezárt szög értékét, a detektor és a Nap pozíciója által bezárt szög értékét, valamint azt, hogy a Föld korongja a detektor látómezejének hányad részét foglalja el. A következő fejezetben a módszer kidolgozásának részleteit ismertetem.

4.3. A GBM-detektorok és a kitörés szöge

A műhold pillanatnyi pozícióját (helyét az égen) és irányítását (a LAT tengelyének irányát) a LAT „SPACECRAFT” fájlokban tárolják, és elérhető az internetről (lásd 3.2. fejezet). A fájlok 30 másodpercenként tartalmaznak pozícióadatokat, ha ennél kisebb időtartamot szeretnénk ismerni, akkor tehát valahogy interpolálnunk kell, itt lineáris interpolációt fogunk alkalmazni.

Az elérhető adatok között szerepel a LAT normálisának iránya II. ekvatoriális koordináta-rendszerben megadva ($RA = \alpha$, $DEC = \delta$), ezt másképp a műhold Z tengelyének is hívják (α_Z , δ_Z). Szerepel még az X és az Y tengely iránya is (α_X , δ_X , α_Y , δ_Y).

A LAT irányának ismerete természetesen nem jelenti azt, hogy a GBM detektora-

inak irányát is ismerjük, ezt még ki kell számolni annak ismeretében, hogy az adott detektor hogy áll a LAT irányához képest (lásd 3.1. fejezet, 2. táblázat $ZENIT = z$ és $AZIMUT = a$ szögek). Tehát egy adott detektor irányának (α_{det} , δ_{det}) meghatározásához egy koordináta-rendszer-transzformációt kell végezni, tehát a következő egyenlet megoldását (x, y, z , illetve α_{det} , δ_{det}) keressük:

$$\begin{pmatrix} x & y & z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_X & X_Y & X_Z \\ Y_X & Y_Y & Y_Z \\ Z_X & Z_Y & Z_Z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

ahol

$$X_X = \cos(\delta_X) \cos(\alpha_X), \quad X_Y = -\cos(\delta_Y) \sin(\alpha_Y), \quad X_Z = \sin(\delta_Z) \quad (2)$$

és így tovább, valamint

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\delta_{det}) \cos(\alpha_{det}) \\ -\cos(\delta_{det}) \sin(\alpha_{det}) \\ \sin(\delta_{det}) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(z_{det}) \cos(a_{det}) \\ \sin(z_{det}) \sin(a_{det}) \\ \cos(a_{det}) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

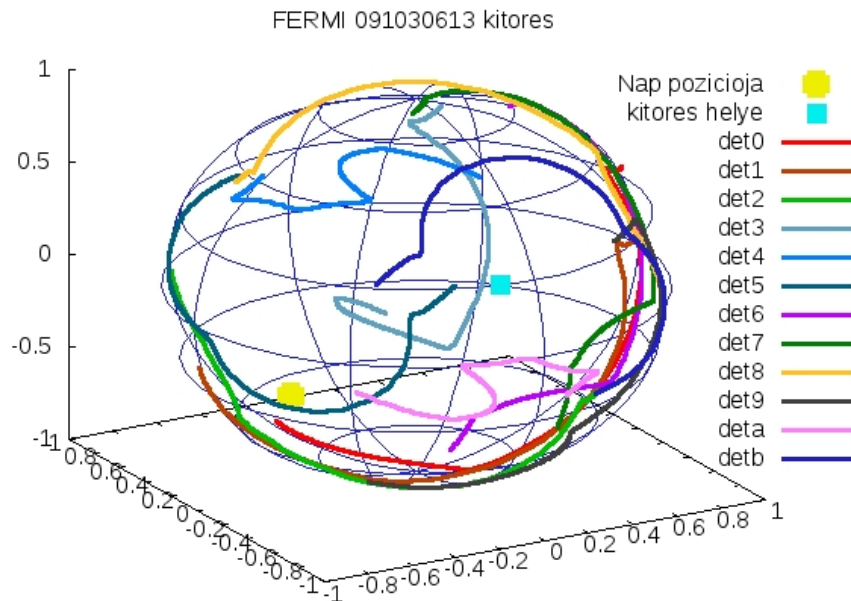
Ennek megoldása mátrixinvertálással történik. Ezt minden detektorra elvégeztem, és az eredményeket ábrázoltam egy gömbfelületen, annak szemléltetéseképpen, hogy a 12 detektor hogyan mozog az égbolton, a kitörést körülvevő 2000 másodperc folyamán.

A kitörés helyzetét (α és δ koordinátákban) szintén kikereshetjük a Fermi adatfájlaiból: a „tcat” jelölésű katalógusfájl headerjében α_{obj} és δ_{obj} cím alatt szerepel. A fenti ábrán ezt kék pont jelzi. A detektor irányának a kitörés helyével bezárt ϕ szögét gömbi koszinusz-tétel segítségével lehet megkapni:

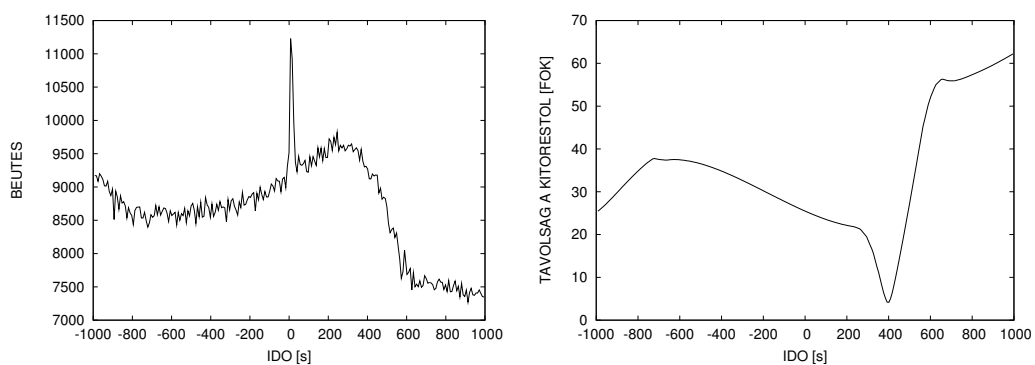
$$\cos(\phi) = \cos(\delta_{obj}) \cos(\delta_{det}) - \sin(\delta_{obj}) \sin(\delta_{det}) \cos(\alpha_{obj} - \alpha_{det}) \quad (5)$$

Az eddigiek alapján programot írtam, mely földolgozza az adatokat, és végeredményként a következő jól értelmezhető ábrákat kaptam (az előzőekből ismert 091030613-as kitörés esetére): lásd 13. ábra.

Egyértelmű, hogy a fénygörbén pont ott látható változás, ahol a detektor és a kitörés által bezárt szög is lényegesen változik. Azonban általában az nem egyértelmű, hogy a kitörés és a detektor távolsága hogyan befolyásolja a háttér változását. Több kitörést is megvizsgáltunk, és ennek alapján nem mondhatjuk egyértelműen, hogy a távolság csökkenésével a háttér is csökken és fordítva. Úgy tűnik, több hatás is érvényesül ezen kívül.



12. ábra. A 12 NaI detektor effektív felületének irányatása az égen, a 091030613-as kitörés körüli 2000 másodperces időtartamban. A kék pont a kitörés helyét mutatja, a sárga pont a Nap helyzetét (lásd 4.4. fejezet). A színes vonalak azt mutatják, hogy melyik detektor milyen irányba nézett egy adott időpillanatban. A vonal azért nem egy pont csak, mert a kitörést megelőző és követő 1000-1000 másdpercet is ábrázoltuk. A kitörés maga tehát egy-egy vonal közepe táján következett be, ezután a vonalak addig viszonylag egyenesen haladásában egy hirtelen törés következett be. Ez a törés vezet a 10. ábrán látható fénygörbe háttérének extrém változásához.

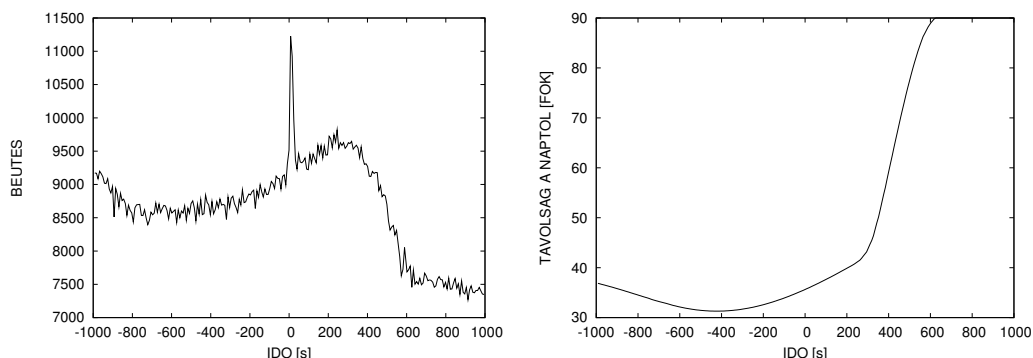


13. ábra. Balra: a 091030613-as kitörés fénygörbéje. Jobbra: a 3-as detektornak a kitöréssel bezárt szöge. Az x-tengelyek osztása a két ábrán ugyanaz. Össze lehet hasonlítani a fénygörbe háttérének változását a kitöréssel bezárt szög változásával: egyértelműen látszik, hogy kapcsolat van a kettő között.

4.4. A Nap helyzete

Mint említettem, a modellbe bevontam a Nap hatását is, mivel ez egy elég erős gammaforrás.

Efemerisz-táblázatokból kikereshető a Nap pozíciója a kitörés napján. Az adott detektornak a Nappal bezárt szögét kiszámolhatjuk és grafikonon ábrázolhatjuk minden időpillanatban.



14. ábra. Balra: a 091030613-as kitörés fénygörbéje. Jobbra: a 3-as detektornak a Nappal bezárt szöge. Az x-tengelyek osztása a két ábrán ugyanaz. Össze lehet hasonlítani a fénygörbe háttérének változását a Nappal bezárt szög változásával: egyértelműen látszik, hogy e kettő között is kapcsolat van.

Az ábrán látható, hogy a háttér a Nappal is kapcsolatban van. (A 610. másodperc környékén látható levágást az okozza, hogy a Nap itt a számításaim szerint belép a Föld árnyékába. Ilyenkor feltételezhetően megszűnik a közvetlen hatása, ezért a programom a Nap–detektor szögtávolságot automatikusan a maximális 90° -os értékre állítja.)

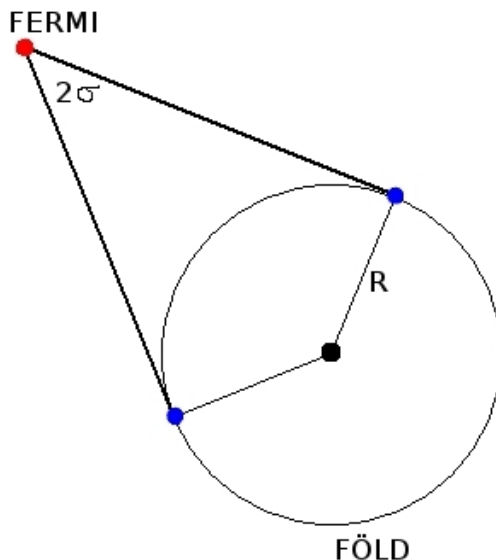
Megjegyzés: Előfordultak olyan esetek, amikor a Nap éppen nem tartózkodik a detektor látómezejében, tehát a 14. ábra jobb oldala konstans 90° -os értéket mutat. Ilyenkor ezt a hatást nem tudjuk figyelembevenni majd az illesztésnél (lásd 4.6. fejezet), ezért egy másik paraméter függvényében illesztünk: ezekben az esetekben a detektor által megtett út értéke lesz az illesztendő paraméter a Nap helyett.

4.5. A Föld korongjának helyzete

Megvizsgáljuk továbbá a Föld korongjának hatását is.

A LAT adatfájlokban szerepel egy-egy adatszlop, mely az α_{zenith} és δ_{zenith} nevet viseli. Ezek azt kódolják, hogy a műhold a Földhöz képest milyen α és δ irányokban tartózkodik a zenitben, vagyis a vektor irányát megfordítva a Föld pozíciója a Fermihez képest ezekből egyszerűen adódik. Szerepel ugyanitt a Fermi aktuális Föld fölötti magassága is (RAD_{geo}). Ezeket az adatokat használtam föl arra, hogy kiszámítsam a földkorong méretét, mely a

Fermi fedélzetéről látszik (szteradiánban). Ehhez előbb ki kell számolni a rálátás szögét, ehhez segít a 15. ábra.



15. ábra. A Fermi és a Föld. Az ábra értelmezését lásd a szövegben.

Legyen a rálátás szöge 2σ , a Föld sugara R , a műhold magassága a Föld felszínétől mérve h . Ekkor:

$$\sigma = \arcsin \frac{R}{R+h} \quad (6)$$

Az ismert adatok behelyettesítésével σ -ra becslést adhatunk: $R = 6373$ km, $h \approx 565$ km, $\sigma \approx 66,7^\circ$.

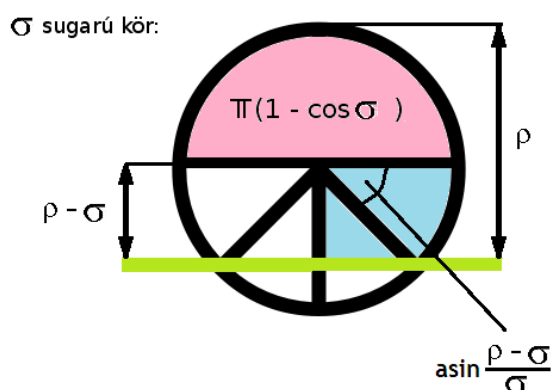
Egy adott síkdetektor látómezeje 2π szteradián. Ha a Föld teljes egészében a látómezejébe esik, akkor a terület, melyet kitakar, éppen egy σ csúcsszögű kúp által kimetszett térszög, melyet gömbi integrál segítségével számolhatunk ki:

$$\Omega_{teljes}(\sigma) = \int_0^{2\pi} \int_0^\sigma \sin \theta \, d\theta \, d\phi = 2\pi \int_0^\sigma \sin \theta \, d\theta = 2\pi [-\cos \theta]_0^\sigma = 2\pi (1 - \cos \sigma) \quad (7)$$

Azonban előfordulhat, hogy a Föld nem esik teljesen egészben a látómezejébe, de nem is esik teljesen kívül azon. Ezért a fenti integrált általánosítani kell arra az esetre, ha egy tetszőleges ρ szögnyi látszik csak a földkorongból a Fermi detektorának „horizontja” (zöld vonal) fölött:

A teljes kör területét már ismerjük, a felső félkör ennek fele. A kézzel jelölt terület kétszeresét kell hozzáadni a félkör területéhez, hogy megkapjuk a keresett alakzat területét. A kék terület:

$$\int_0^{\arcsin(\frac{\rho-\sigma}{\sigma})} \int_0^{\rho-\sigma} \sin \theta \, d\theta \, d\phi = \arcsin\left(\frac{\rho-\sigma}{\sigma}\right)(1 - \cos(\rho-\sigma)) \quad (8)$$



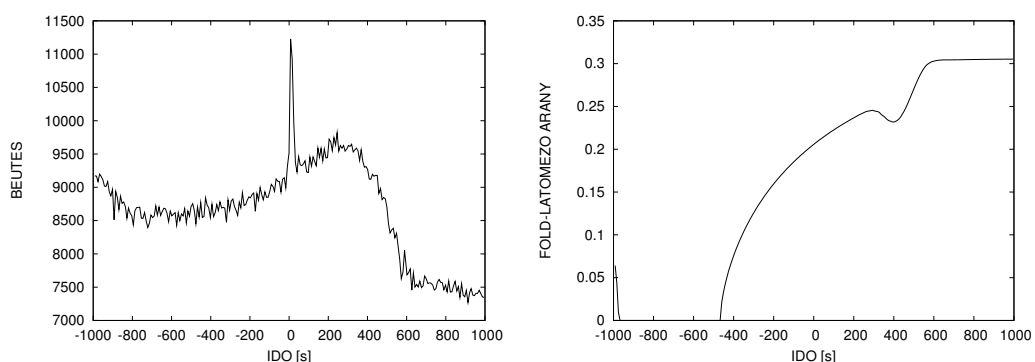
16. ábra. Integrálás egy gömbfelületen. Arra vagyunk kíváncsiak, hogy mekkora annak a vetületnek a területe, mely a Föld korongjából látszik a horizont (zöld vonal) fölött egy félgömbön. Az integrál kiszámoláshoz lásd (8) és (9) képletek.

Eredményül kapjuk a Föld által a látómezőből kitakart területet:

$$\Omega(\sigma, \rho) = \pi (1 - \cos \theta) + 2 \arcsin\left(\frac{\rho - \sigma}{\sigma}\right)(1 - \cos(\rho - \sigma)) \quad (9)$$

Ez a kifejezés $\rho = 2\sigma$ -ra visszaadja a teljes kör esetét: $\Omega(\sigma, \rho = 2\sigma) = \Omega_{teljes}(\sigma)$. (Ha $\rho < \sigma$ vagy $\rho > 2\sigma$, nincs értelmezve.)

Ezt elosztva a teljes látómezővel (2π) egy arányszámot kapunk, mely jellemzi, hogy a kozmikus gammaháttérből mekkora részt takar ki a Föld. A teljes háttér elvileg ennyivel kevesebb lesz, viszont hozzáadódik a Földről jövő gammasugárzás mennyisége. Ezt az arányszámot is ábrázoltam az idő függvényében a már ismert kitörés folyamán:

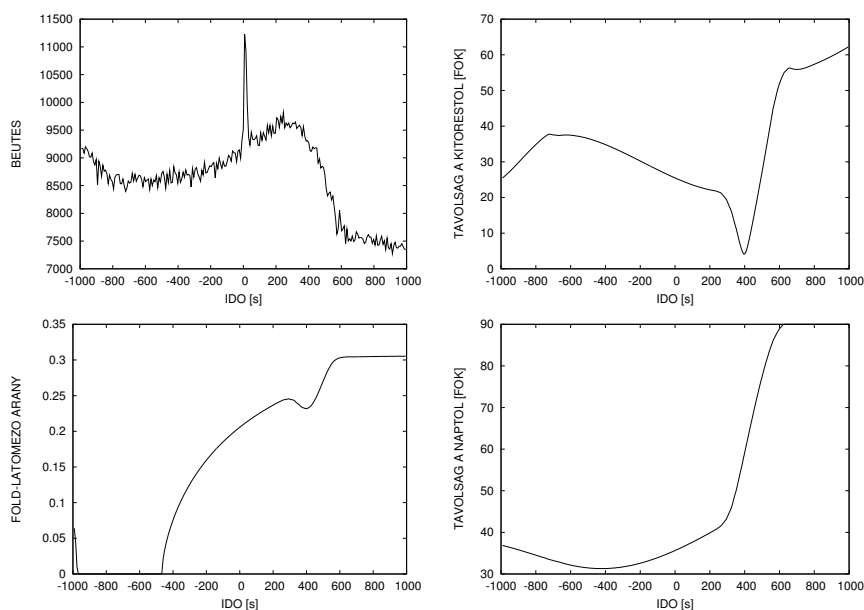


17. ábra. Balra: a 091030613-as kitörés fénygörbéje. Jobbra: a látómezőnek hányad részét takarja ki a Föld korongja a 3-as detektor esetén. Az x-tengelyek osztása a két ábrán ugyanaz. Össze lehet hasonlítani a fénygörbe háttérének változását a Föld kitakarásának értékével: egyértelműen látszik, hogy kapcsolat van e kettő között is.

Itt is megfigyelhetjük, hogy a fénygörbe változása egyértelmű kapcsolatban van a Föld által kitakart terület arányával.

4.6. A háttérillesztés

Sikerült tehát megmutatni, hogy a fénygörbe háttérén látható drasztikus változások összefüggnek a műhold mozgásával. Ez összefoglalva az alábbi négy ábrán is jól látható. (Ezek az előző fejezetből ismert ábrák, a vízszintes tengelyen mindig az idő látható, 0 másodpercnél volt a kitörés. Bal fent: fénygörbe, jobb fent: kitörés-detektor szöge, bal lent: Föld/látómező arány, jobb lent: Nap-detektor szöge.)



18. ábra. Az előző fejezetből ismert ábrák a 091030613-as kitörésre. A vízszintes tengelyen mindig az idő látható, 0 másodpercnél volt a kitörés. Bal fent: fénygörbe, jobb fent: kitörés-detektor szöge, bal lent: Föld/látómező arány, jobb lent: Nap-detektor szöge.

E három paraméter függvényében harmadfokú hiperfelületet illesztettünk a kitörés háttérére.

A háttér természetesen nem tartalmazhatja a kitörést magát, ezért a fénygörbéből a $[-50:100]$ másodperc közötti szakaszt kitöröltem az illesztés elvégzésekor. Azokban az esetekben, ahol ez az intervallum túl rövid vagy túl hosszú volt, mert pl. a kitörés maga hosszabb 100 másodpercnél vagy a háttér kritikusán változik ezen az időtartamon belül is, ott az előre megadott értéken utólag változtattam.

Az illesztés módszere az ún. általános lineáris legkisebb négyzetes illesztés [10]. Ha van egy (y_i, x_i) adathalmazunk, akkor (az egyenesillesztés analógiájából kiindulva) \underline{x} -nek bármilyen $X_k(\underline{x})$ függvényeit vehetjük, ahol a paraméterek lineárisan szerepelnek. Ezzel

az elméleti $y(\underline{x})$ értéke kifejezhető a következőképpen:

$$y(\underline{x}) = \sum_{k=1}^M a_k X_k(\underline{x}). \quad (10)$$

A χ^2 költségfüggvény bevezetése és minimumának megkeresése után egy lineáris egyenletrendszert kapunk:

$$\underline{b} = \underline{M} \cdot \underline{a}, \quad (11)$$

melyet mátrixinvertálással oldhatunk meg.

Az \underline{x} kifejezés a fenti egyenletekben azt jelenti, hogy nem egy mért paraméterünk van, hanem több, és ezek függvényében kívánunk illeszteni. Ez a gyakorlatban annyiban más, mint az egyparaméteres illesztés, hogy az invertálandó mátrix dimenziója $i \times M$ helyett $i \times M \cdot j$, ahol j az \underline{x} vektor dimenziója, azaz a paraméterek száma.

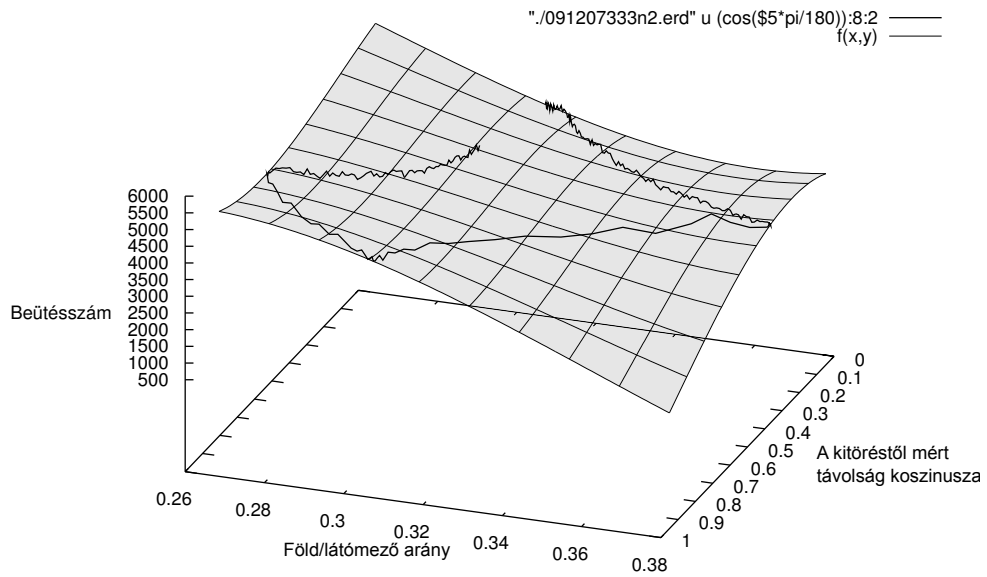
Ennek a mátrixnak az invertálása a gyakorlatban azért nehéz, mert ez a mátrix közel szinguláris, és ez numerikusan nem jól kezelhető a szokásos Gauss–Jordan-eliminációval. Az ilyen esetekben általánosított inverz eljárást kell alkalmazni, erre szolgál numerikusan az ún. szinguláris érték dekompozíció (Singular Value Decomposition, SVD) nevű módszer. Ennek elmélete a szakirodalomban megtalálható [19], de rendelkezésre állnak olyan programcsomagok, melyekbe beleépítették ezt az eljárást. Ilyen például az általam használt OCTAVE⁵ szabad forráskódú program, melynek `pinv` funkciója SVD módszerrel invertál mátrixot („pszeudoinverz”).[19]

Az illesztés eredményeként kapott hiperfelületet a kitörés eredeti fénygörbéjéből levonva a 20. ábrát láthatjuk.

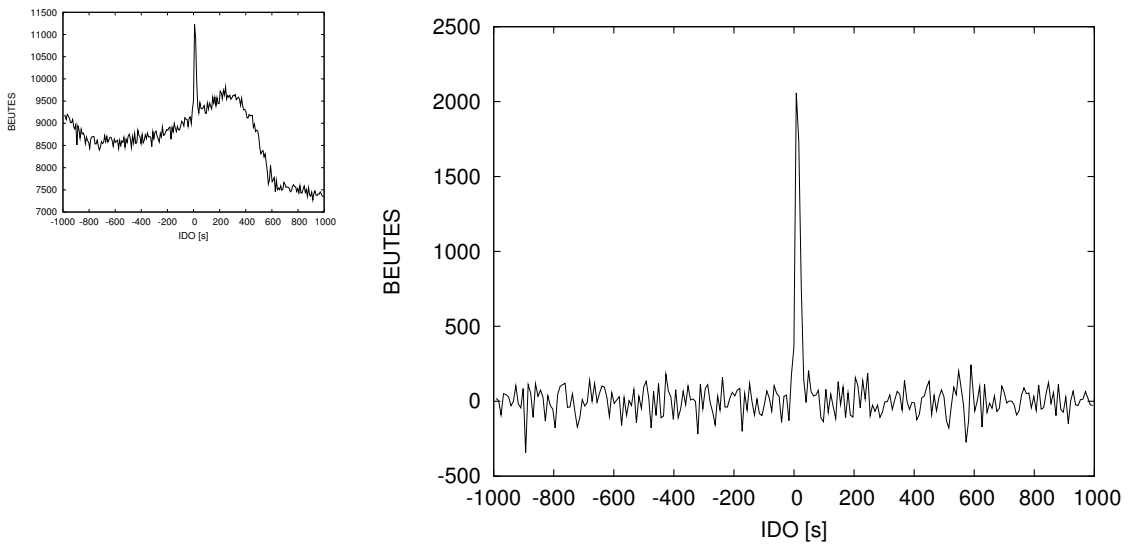
4.7. A módszer összefoglalása

Abból kiindulva, hogy a gamma-fénygörbék extrém háttérváltozását a műhold mozgása okozza, modellt alkottunk a háttér változására, melyben figyelembe vettük a detektor irányának és a kitörés pozíciójának egymással bezárt szögét, a Nap távolságát és a Föld korongjának kitakarását. Mivel sem a kozmikus gamma-háttér értékét, sem a teresztrikus gamma-felvillanások energiáját nem ismerjük, szükséges volt numerikusan illeszteni ezen paraméterek függvényében. A háttérre így illesztett harmadfokú hiperfelület kellően jól modellezte a háttér változásait, és ezzel egy háttérmentes fénygörbét kaptunk (20. ábra), mely alkalmas további vizsgálatokra. A következő fejezetben az ezzel a módszerrel háttérmentesített gamma-kitörések időbeli lefolyását vizsgáljuk meg, és összehasonlítjuk az eredményt azzal, ha a háttérrel csak mint egy másod- vagy harmadfokú (egyparaméteres) függvényt vonnánk le.

⁵OCTAVE: www.octave.org



19. ábra. Szemléltető ábra egy 2 paraméteres harmadfokú felületről, mely egy gamma-kitörés fénygörbéjére illeszkedik. A szürke felület adja a legjobb illeszkedést a fénygörbére, mely a fekete vonallal van rárajzolva. Látszik, hogy a felület jó követi a fénygörbe háttérének változásait a két illesztett paraméter függvényében. A két illesztett paraméter itt a Föld-látómező arány és a kitöréstől mért távolság koszinusza. Jelen munka során 3 paraméterre illesztünk, a harmadik a Naptól mért távolság koszinusza, így egy háromparaméteres hiperfelületet kapunk, melyet azután levonunk a fénygörbéből, hogy a háttérrel eltüntessük.



20. ábra. A 091030613-as kitörés fénygörbéje a háttér levonása után. Érdekes összehasonlítani a 10. ábrával, melyen a háttérillesztés előtti fénygörbe látható.

5. A módszer ellenőrzése

Ebben a fejezetben a fent ismertetett módszerrel előállított háttérmentes fénygörbék T_{90} értékét határozom meg, és elkészítem a T_{90} -hisztogramot (lásd 2.4.1. fejezet). Az eredményeket összevetem két korábbi vizsgálatommal [27], melyekben a háttérre egy másod- és harmadfokú polinomot illesztettem az idő függvényében.

5.1. Az energiacsatornák és a binek kezelése

A Fermi műhold működésének első két évében (2008. augusztus 4. és 2010. március 4. között) 687-szer adott triggerjelet, de ebből csak 416-ról állapították meg, hogy valóban gamma-kitörés. Ezek közül 332 darab volt alkalmas a harmadfokú hiperfelülettel való illesztésre, a többi esetében az illesztés nem sikerült megfelelően a háttér extrém változásai miatt. Ezeket kihagyjuk a további elemzésből.

A CTIME fájlok 8 energiacsatornát tartalmaznak. Általánosan igaz az elektromágneses sugárzást detektáló műszereknél, hogy a mérési tartomány alsó és felső határához közel a mérés hibája megnő. Ennek kiküszöbölése végett a 8 energiacsatorna közül a legalacsonyabb és legmagasabb energiájúakat elhagytam, és a maradék 6 csatorna adatát összegeztem (11–982 keV). Az összegzés azért volt célszerű, mert jelen esetben nem foglalkozom a kitörések energetikájával vagy spektrális felbontásával, csak az időbeli lefolyásával.

A CTIME fájlok időbineinek mérete változik, attól függően, hogy triggerjel van-e (64 ms) vagy nincs (256 ms). Ennek kiküszöbölésére és a legjobb felbontás elérése érdekében a binméretet egységesen 64 ms-ra állítottam úgy, hogy a 256 ms-os bineket négy egyenlő részre osztottam. Ez persze azzal jár, hogy ott, ahol 4-gyel osztottam, 4 egymás utáni bin ugyanazt az értéket fogja tartalmazni, ami a zaj eloszlását befolyásolja: itt most ennek hatásait (hogy a görbe itt lépcsőssé válik, és a szórás is kisebb lesz) figyelmen kívül hagyjuk.

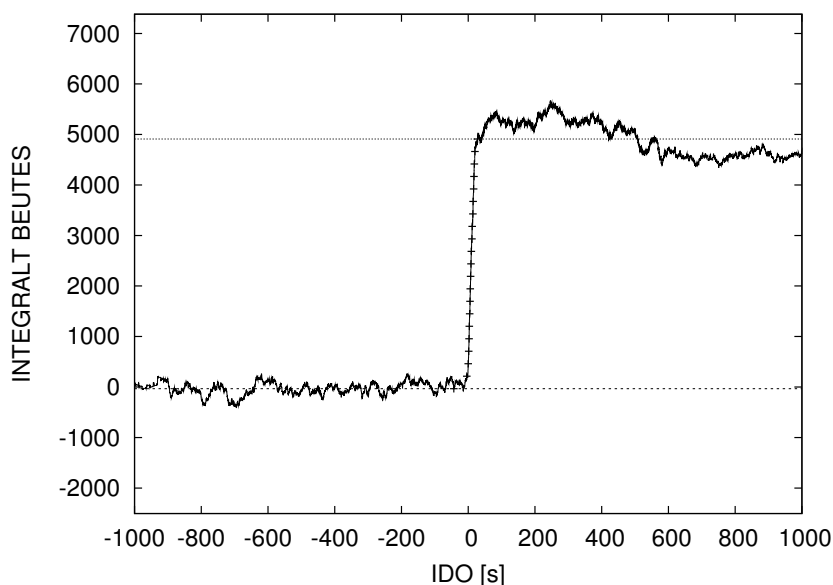
5.2. Az integrális fénygörbe

Az integrális fénygörbe elkészítése előtt a háttér sztochasztikus fluktuációját kezelni kell. A 4. fejezetben leírt háttérillesztési eljárást összevetem két korábbi vizsgálatommal [27], melyekben a háttérre egy másod- vagy harmadfokú polinomot illesztettem a gnuplot⁶ nevű programmal, χ^2 -módszerrel. (Egészen pontosan a gnuplot az ún. Marquardt–Levenberg-algoritmust használja, ami egy nemlineáris legkisebb négyzetek módszer. [41])

A háttértől megszabadított fénygörbéket fölintegráltam. A T_{90} mennyiség meghatározásához az integrális görbén ki kell jelölni a minimum és maximum szintek értékét, melyek

⁶ www.gnuplot.info

között elvileg monoton növekvő a függvény. Mivel még a háttér levonása után is terhelt a görbe valamennyi hibával, a két szint nem mindig teljesen egyenes, és gyakran erősen fluktuál. Ez azonban a T_{90} értékét csak nagyon kis mértékben fogja befolyásolni, mivel a definíció alapján az első és utolsó 5% nem számít bele az értékébe. A minimum és maximum szintek értékét a fluktuáció kiátlagolásával határoztam meg. Ezek után vettem a minimum és maximum szintek különbségének középső 90%-át, és kiszámoltam az ehhez tartozó időtartamot, ami definíció szerint a keresett T_{90} érték.



21. ábra. A 091030613-as kitörés fénygörbéjének integrális alakja. A kijelölt minimum és maximum szintek vízszintes vonallal jelölve látszanak. A pontok a T_{xx} értékeket jelölik, a két szélső közötti tartomány a keresett T_{90} értéke.

Természetesen nemcsak a T_{90} számolható így ki, hanem valamennyi T_{xx} érték is. Az ábrán ezt a kis \times -ek szemléltetik: a minimum és maximum szintek között 20 egyenlő intervallumot kijelölve, és ezekhez az integrális görbén hozzárendelve a megfelelő értékeket (ezt jelölik az \times -ek), bármelyik kettő különbségét vehetjük, és ezekkel további statisztikai vizsgálatokat végezhetünk.

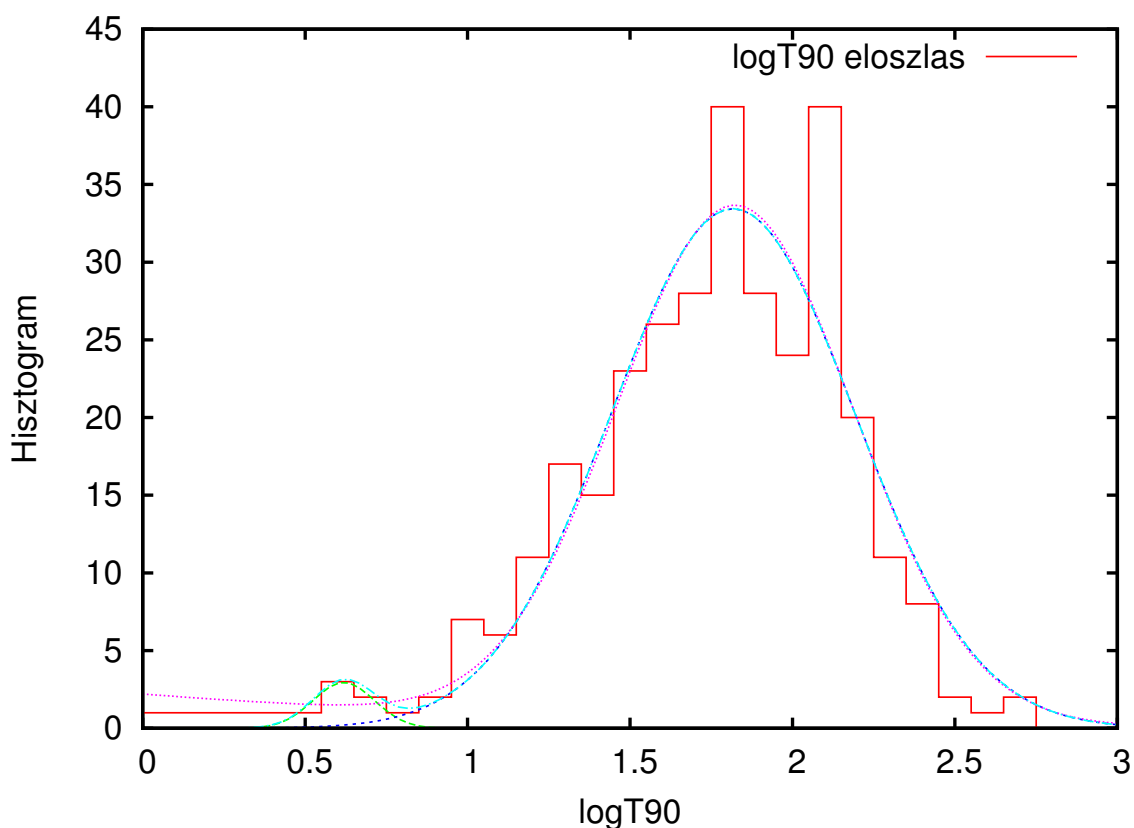
5.3. Eredmények

5.3.1. A harmadfokú hiperfelület-illesztés eredményei

A 2.4.2 fejezetben írottak szerint a T_{90} időtartamok tízes alapú logaritmusának gyakorisága két púpú eloszlást követ. A 22. ábrán látható a T_{90} -hisztogram a Fermi 332 kitörésére. Az ábrán látszik a két púp, melyet a rövid és a hosszú kitörések alkotnak (lásd

2.4.1. fejezet). A rövid kitörések viszonylag kevesen vannak a mintában, de azért látható púpot adnak.

Ennek magyarázata az lehet, hogy a Fermi műhold GBM műszerének NaI detektorai, melyeknek adatait földolgoztam, kevésbé érzékenyek a rövid és (ennélfogva) „kemény” kitörésekre. Másik magyarázat lehet, hogy a rövid kitörések jobban beleolvadnak a háttérzajba, így közülük sokan kiestek a mintából, mivel nem látszik rajtuk kiértékelhető adat még a háttér levonásával együtt sem. Ezen hibák kiküszöbölésére érdemes lenne megvizsgálni a Fermi műhold másik műszerének, a LAT-nak a mért adatait és összevetni a GBM adatokkal.

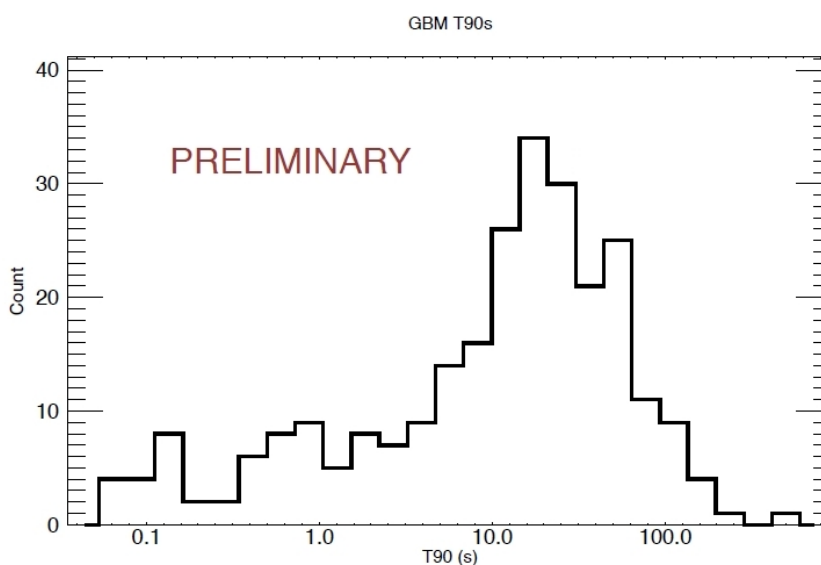


22. ábra. A harmadfokú hiperfelület-illesztéssel kapott T_{90} -hisztogram. Saját eredmény. Az ábra elkészítésekor azt a mintát használtuk föl, melyet a 4. fejezetben kidolgozott módszerrel háttérmentesítettünk. Az ábrán látszik a rövid és hosszú kitörések két púpjá, mellyel alátámaszthatjuk a szakirodalmi eredményeket. (Ezen az ábrán a $\log T_{90}$ értékek szerepelnek a vízszintes tengelyen.)

Az eloszlásra Gauss-görbéket illesztettünk, külön-külön a rövid és hosszú kitörésekre (zöld és kék vonalak), valamint együttesen az egész adatsorra két Gauss összegét (lila vonal). A zöld és sötétkék Gauss találkozásánál húzhatjuk meg a határt a rövid és a hosszú kitörések között, ennek értéke: $\log(T_{90}) \approx 0.8 \rightarrow T_{90} \approx 6,3$ s.

A lila vonalat megvizsgálva azt látjuk, hogy a teljes eloszlás egy asszimmetrikus Gauss-görbével illeszthető. Elképzelhető, hogy a szimmetriától való eltérést a közepes csoport (*intermediate*) okozza, sőt még az eddig a rövid kitöréseknek tulajdonított, 1,5 körül látható magas csúcsért is ezek lehetnek a felelősek. Ennek végleges eldöntéséhez azonban mindenképpen szélesebb körű vizsgálatot kell folytatni, erre egy későbbi munkában kerül majd sor.

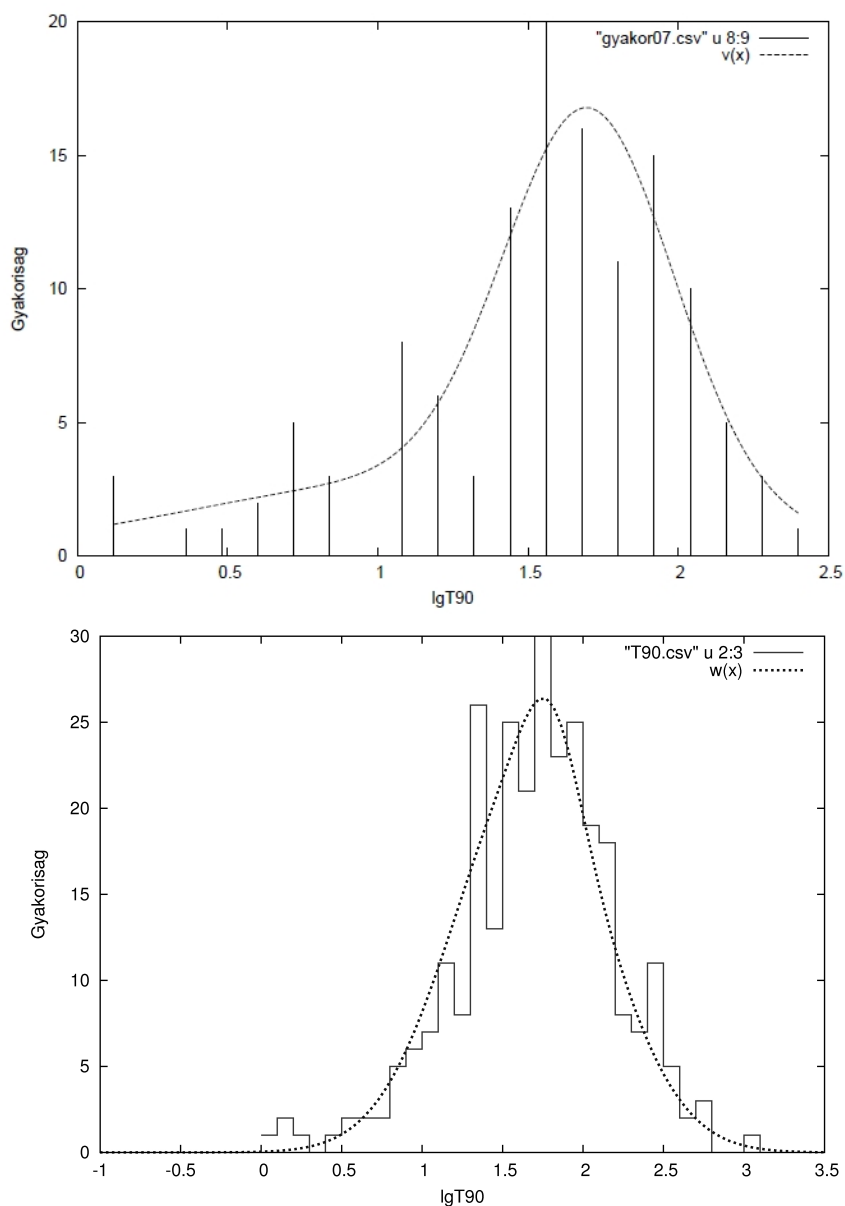
Mindenesetre a hisztogram azt mutatja, hogy a háttérillesztés új módszere helyes és eredményes, mivel alá tudtuk vele támasztani a szakirodalomból ismert eredményeket a T_{90} eloszlásról ([13] [14] [3] [23] [34] [15]). Egy ilyen összehasonlítás kínálkozik a Fermi kutatócsoportjának előzetes elemzéséből kapott ábrával (23. ábra) [8].



23. ábra. A kitörések időtartamának eloszlása a Fermi hivatalos kutatócsoportjának előzetes eredményei alapján. Látható a hasonlóság a saját feldolgozású minta (22. ábra) és a hivatalos minta között. (Ezen az ábrán a T_{90} értékek szerepelnek a vízszintes tengelyen, logaritmikus skálán.)

A fenti két ábrát összehasonlítva elmondhatjuk, hogy a módszerünk helytálló, mert sikerült a Fermi által detektált kitöréseket megfelelően feldolgozni.

5.3.2. A másod- és harmadfokú egyparaméteres illesztés



24. ábra. Fent: Másodfokú háttérillesztés 126 Fermi-kitörésre. Lent: Harmadfokú háttérillesztés 285 Fermi-kitörésre. A másodfokú esetén a minta nem tartalmaz kitöréseket 2.5-es $\log T_{90}$ érték fölött. Ennek oka, hogy a parabolával való háttérillesztési eljárás kivágta a hosszú emissziót a kitörés lecsengésében. A harmadfokú polinom illesztésnél már látszik ez a farok is, azonban hiányoznak a mintából az igazán rövid kitörések, melyek nyomát az új módszerrel feldolgozott mintában már megtaláljuk. (Mindkét ábrán a t_{90} értékek szerepelnek a vízszintes tengelyen.)

Korábbi vizsgálatok eredményeként kaptuk a 24. ábrát [27]. Ezek a másod- és harmadfokú egyparaméteres illesztések alapján készültek, melynek során az idő paraméter

függvényében illesztettem polinomot a kitörés háttérére. Ezen módszer azért nem elfogadható komoly vizsgálatokra, mert mint említettem, a kitörésekre ráakadó háttér időnként igen extrém módon változhat, melyet egy harmadfokú polinom már nem képes követni. Ezért van, hogy a polinomillesztéskor csak korlátozott számú kitörésből állt a minta, jóllehet sokkal több állt rendelkezésre. Ezen kívül (ahogy az ábrákon is láthatjuk) a másodfokú illesztés esetén a minta nem tartalmaz kitöréseket 2.5-es 90 érték fölött. Ennek oka, hogy a parabolával való háttérillesztési eljárás kivágta a hosszú emissziót a kitörés lecsengésében. A harmadfokú polinom illesztésnél már látszik ez a farok is, azonban még mindig kevesebb kitörésre volt alkalmazható, mint a most kidolgozott módszer.

A 22. ábrával összehasonlítva az látható, hogy nagyon hasonló eredményt kaptunk. A különbség a hagyományos (másod- és harmadfokú polinomillesztés) és az új módszer (több paraméteres hiperfelület-illesztés) között elsősorban abban van, hogy az utóbbival lényegesen több kitörést lehetett elfogadhatóan illeszteni. Az egyparaméteres polinomillesztés során a mintából azonnal kiestek azok a kitörések, melyeknek a háttére túl gyorsan változik. Márpedig a Fermi műholdat arra programozták, hogy forduljon a megfelelő irányba, ha kitörést detektál, tehát ha a Fermi adatokat szeretnénk elemezni, akkor olyan háttérkezelési eljárásra van szükség, mely nem csak a kitörések egy bizonyos hányadára alkalmazható, hanem az egész mintára.

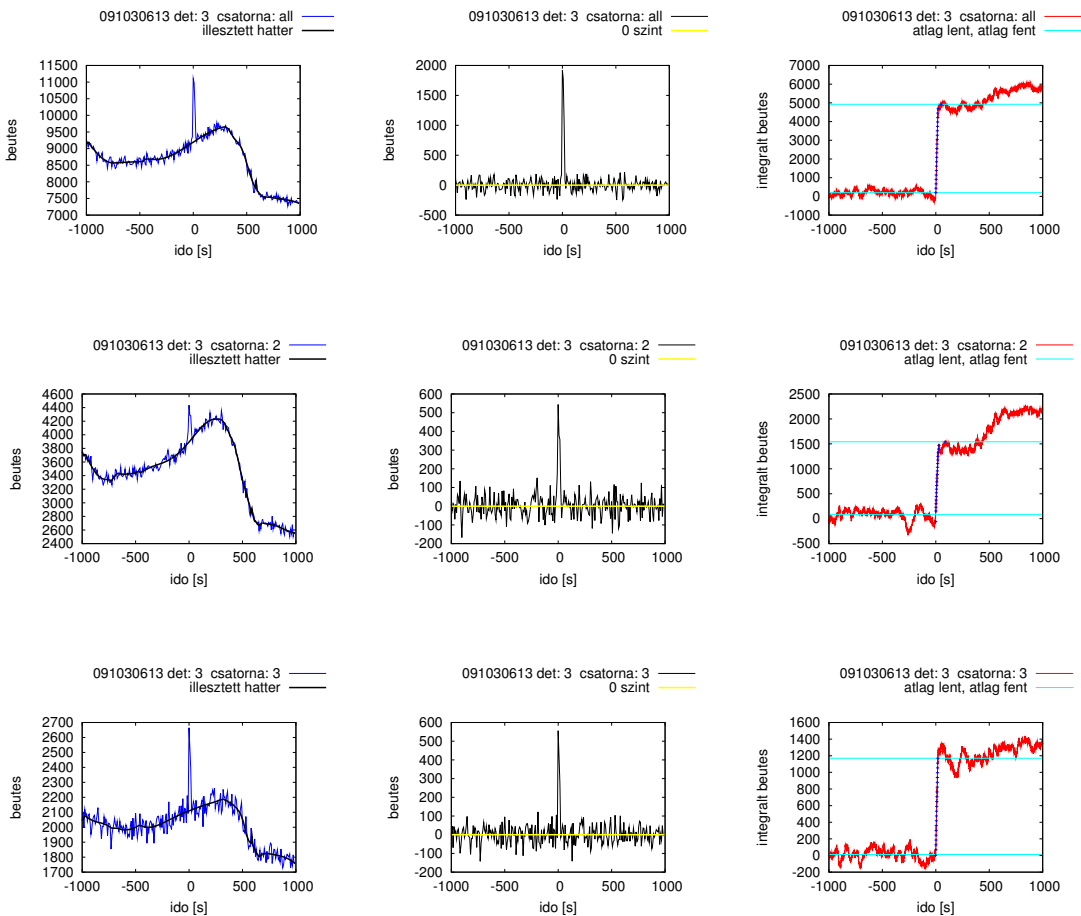
6. Illesztés csatornánként

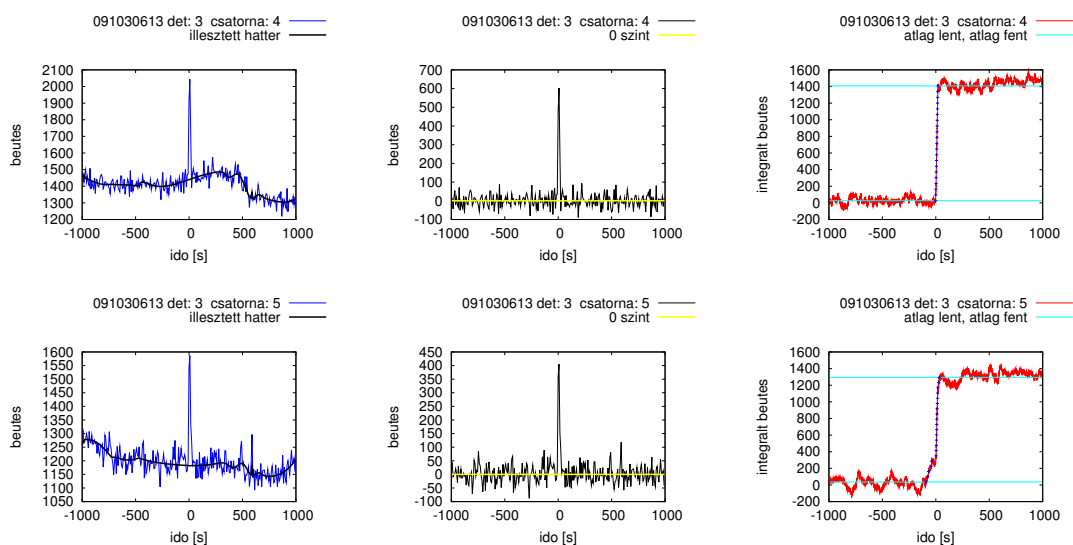
Ebben a fejezetben a már ismert 091030613-as kitörést vizsgáljuk részletesebben (melynek elemzését a 4. fejezetben kezdtük el).

A Fermi GBM-katalógusa $T_{90}^{kat}=19,2\pm 0,9$ sec-ot ad meg ennek időtartamára [40]. Azonban ez a katalógus úgy készült, hogy a fénygörbére polinomot illesztettek az idő függvényében [24]. A polinomillesztés, amint azt a 10. ábrán is láttuk, nem minden esetben ad kielégítő eredményt: főleg az olyan esetekben problémás a használata, amikor a műhold fedélzeti számítógépe Autonomous Repoint Request (ARR) parancsot ad ki, és a műhold gyorsan forogni kezd a lehető legmegfelelőbb pozíció elérése érdekében.

A 10. ábra problémája talán kiküszöbölhető azzal, ha nem az egész CTIME időtartamot (2000 sec) illesztjük, hanem kijelölünk a kitörés körül egy néhány száz másodpercnyi időtartamot, és csak erre illesztünk egy polinomot az idő függvényében, ahogy az a katalógus készítésekor is történt [24], és ahogy azt mi is megtettük az 5.3.2. fejezetben.

Mi azonban a fent leírt módszerrel képesek vagyunk az egész CTIME adatsorra kiterjedő illesztést készíteni. Ezt tettük itt a 091030613-as kitöréssel: a fent leírt módszerrel háttérmentesítettük a fénygörbét, és kiszámoltuk a T_{90} értékét a csatornák összegére, valamint a 8 csatornára külön-külön is. [32]





25. ábra. A 091030613-as kitörés háttérillesztése csatornánként. Balra: fénygörbe a háttérillesztés előtt és az illesztett háttér. Középen: fénygörbe a háttérillesztés és -levonás után. Jobbra: felintegrált fénygörbe és a számolt T_{90} értéke a grafikon alatt.

A 091030613-as kitörés esetében két detektor adott triggerjelet: a 3-as és a 8-as. A 3-as detektor adatait dolgoztuk föl itt, lásd 25. ábra. (A 12. ábrán a 3-as detektor útja szürkés-kék vonallal látszik az égen).

A CTIME fájlok 8 energiacsatornát tartalmaznak 4–2000 keV között, de a legmagasabb és legalacsonyabb energiájú csatorna adata túl zajos a további analízishez. Ezért a 2-7 csatornák összegét, valamint a 2, 3, 4 és 5-ös csatornákat ábrázoltuk. A csatornákhöz tartozó energiatartományok a 3. táblázatban vannak föltüntetve.

	-tól [keV]	-ig [keV]
Csatornák összege (2-7)	11.50	982.23
2-es csatorna	11.50	26.63
3-as csatorna	26.63	50.43
4-es csatorna	50.43	102.38
5-ös csatorna	102.39	295.74

3. táblázat. A 25. ábrán látható fénygörbék csatornáinak energiatartományai.

A katalógusbeli értéket legjobban megközelítő értéket a 4-es csatorna adatából kaptuk: $T_{90}^4=18,6$ sec, ami hibahatáron belül egyezik a katalógusbeli értékkel. Ez a csatorna tartalmazza a legtöbb beütést is, itt tehát a legjobb a jel-zaj arány. A többi vizsgált csatornában valamivel kisebb a jel, és itt a katalógusbeli értéktől is nagyobb eltérést ta-

pasztalunk. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy az az általános gyakorlat, hogy (a magas beütésszám elérése érdekében, vagyis a jel-zaj arány javítására) a csatornákat összeadják a T_{90} számolásakor. A csatornák összegével számolt T_{90}^{all} értéke: 21,0 sec. Ez az érték tehát a saját eredményünk a 091030613-as kitörés időtartamára.

7. Összefoglalás

A gamma-kitörések kutatása fontos, érdekes és egyedülálló részterülete a csillagászatnak és az asztrofizikának, mivel maguk a kitörések páratlanul energetikusak, valamint a vizsgálatukra alkalmas módszerek elég összetettek. A diplomamunka eredményeit úgy kaptuk, hogy egyszerre alkalmaztuk a nagyenergiás asztrofizika, az égimechanika, a statisztika és természetesen az analitikus matematika módszereit (lineáris algebra, gömbi integrálszámítás).

A diplomamunkában azt vizsgáltuk, hogy a Fermi gamma-műhold mozgása milyen hatással van a detektált adatokra. Beláttuk, hogy a műhold pozíciója és a detektorok irányítása alapvetően befolyásolja a mért fénygörbék háttérének alakulását. Figyelembe véve a detektor és a kitörés szögének változását, valamint a Nap és Föld hatását, modelleztük a háttérrel, és eltávolítottuk azt a fénygörbéről. (Az új háttérleválasztási módszer, melyet kidolgoztunk, azon alapszik, hogy több paraméter függvényében illesztünk a háttérre egy többdimenziós, harmadfokú hiperfelületet, és ezt levonjuk a háttérből.) Ezzel a fénygörbe alkalmassá válik további statisztikus vizsgálatokra.

Azért fontos a háttér megfelelő kezelése, mert enélkül a gamma-kitörés valamennyi mért paramétere nagy hibával lesz terhelt, ami hibás következtetésekhez vezethet a további vizsgálatok során. A Fermi műholdat arra programozták, hogy pályáján haladása közben saját mozgást is végezzen, és képes legyen megváltoztatni az irányát percekben belül, ha erre szükség van (például egy kitörés felé oda kell fordulnia). Azonban ez az alapvetően nagyszerű tulajdonság igen megnehezíti az adatokat földolgozni kívánó kutatók dolgát, mivel a kitörésekre a mozgás közben ráakódó háttér kezelése nem egyértelmű, nem lehet hatványfüggvénnyel egyszerűen leválasztani. Ezért dolgoztuk ki a fent ismertetett eljárást, mely a műhold pozíciójának ismeretében képes hatékonyan eltávolítani a forgással ráakódott háttérrel.

A modellt és az eljárást ellenőrizendő elkészítettük a kitörések időtartamának eloszlását, mely konzisztens a várakozásainkkal. Összevetettük a mintát két másik módszerrel feldolgozott mintával is. Továbbá megmutattuk, hogy a nemrég megjelent hivatalos Fermi-katalógus adataival is hibahatáron belül egyezik az eredményünk.

8. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőim, Bagoly Zsoltnak a diplomamunkám elkészítésében végzett munkájáért, támogatásáért, ötleteiért. Továbbá a kutatócsoport többi tagjának, Horváth Istvánnak, Balázs Lajosnak és Veres Péternek a munka során nyújtott kitartó segítségért, a tanácsokért és magyarázatokért.

OTKA-szám: 77795.

Hivatkozások

- [1] Bagoly Z, Csabai I, Meszaros A, Meszaros P, Horvath I, Balazs LG, Vavrek R, A&A 398:(3) pp. 919-925. (2003)
- [2] Bagoly, Z., 2005, Meteor Cs.É. 233
- [3] Balázs, L.G., et al. 1998, A&A, 339, 1
- [4] Balázs, L.G., et al. 1999, A&A Sup. 138, 417
- [5] Balázs, L.G., et al. 2003, A&A, 401, 129
- [6] Balázs, L.G., et al. 2004, BaltA., 13, 207B
- [7] Bloom, J.S. et al. 2009, ApJ, 691, 723
- [8] Briggs, M., Gamma Ray Bursts 2010 Conference (Nov 1-4, 2010, Annapolis, MD)
- [9] Dado, S. et al. 2003, Physics Letters B, 562, 3-4
- [10] Gisbert, Stoyan: Numerikus matematika - Mérnököknek és programozóknak, Typo-TeX Kiadó, 2007
- [11] Hededal, C., 2005, PhD thesis (Gamma-Ray Bursts, Collisionless Shocks and Synthetic Spectra)
- [12] Horváth, I., et al. 1996, ApJ, 470, 56
- [13] Horváth, I., 2002, A&A 392, 791-793
- [14] Horváth, I., Balázs, L.G., et al. 2006, A&A, 447, 23
- [15] Horváth, I., et al. 2008, A&A, 489, L1-L4
- [16] Horváth, I., et al. 2010, ApJ, 713 552
- [17] Lipunov, V. M. et al. 1997, A&A
- [18] Kouveliotou, C., et al. 1993, ApJ, 413, L101
- [19] Long, P.J.G., 2005, Introduction to Octave
- [20] Medvedev, M. V., 2000, ApJ, 540, 704
- [21] Medvedev, M. V., 2009, ApJ, 702, L91
- [22] Meegan, C. et al. 2009 ApJ 702 791

- [23] Mészáros, A. et al. 2000, ApJ, 539, 98
- [24] PACIESAS W.S. et al. Astrophys. J., Suppl. Ser., 199, 18 (2012)
- [25] Perez-Ramirez, D. et al. A&A 510: Paper A105. (2010)
- [26] Salvaterra, R. et al., Nature 461, 1258-1260
- [27] Szécsi, D., 2010. szakdolgozat, ELTE (A gamma-kitörések időbeli lefolyásának vizsgálata a Fermi műhoddal)
- [28] Szécsi, D., 2010-2011. Tudományos Diákköri Dolgozat (A Fermi gammaműhold mozgásának vizsgálata)
- [29] Szécsi, D. et al., 2012, Acta Polytechnica Vol. 52, No.1, p.43
- [30] D. Szécsi, Zs. Bagoly, A. Mészáros, L. G. Balázs, P. Veres, and I. Horváth: New background-filtering algorithm based on the motion of the Fermi Gamma-ray Space Telescope (Poszter megjelent: GRBs as Probes: From the Progenitor's Environment to the High Redshift Universe Conference, Máj. 16-20, 2011, Como, Olaszország)
- [31] Dorottya Szécsi, Zsolt Bagoly, István Horváth, Lajos G. Balázs, Péter Veres, Attila Mészáros: GRB duration distribution considering the position of the Fermi (Poszter megjelent: 8th INTEGRAL/BART Workshop, Ápr. 26-29, 2011, Karlovy Vary, Csehország)
- [32] Szécsi, D. et al., 2012. Background fitting of Fermi gamma-ray burst 091030613 (Poszter megjelent: Fermi/Swift GRB Conference, 2012. május 7-11., München)
- [33] Varga, B., 2005. diplomamunka, ELTE (Gamma-kitörések vizsgálata)
- [34] Vavrek, R. et al. 2008, MNRAS, 391, 1741
- [35] Veres, P., 2006, diplomamunka, ELTE (Gamma felvillansok spektrális elemzése)
- [36] Zhang, B., 2007, Chin.J.Astron.Astrophys. 7, 1-50
- [37] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [38] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/>
- [39] http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html
- [40] <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/fermi/fermigbrst.html>
- [41] <http://www.gnuplot.info/>
- [42] ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse/ascii_data/