

SZAKDOLGOZAT

A gammakitörések időbeli lefolyásának vizsgálata a Fermi műholddal

Szécsi Dorottya

Témavezető: Bagoly Zsolt, PhD.

egyetemi docens

ELTE Természettudományi Kar,

Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

ELTE, 2010.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. A gammakitörések szakirodalmának összefoglalása	6
2.1. Felfedezésük és kutatásuk	6
2.2. Eredetük	7
2.2.1. A tűzgolyó modell	8
2.2.2. Alternatív magyarázatok	9
2.3. Nyitott kérdések	10
2.4. A gammakitörések statisztikus vizsgálata	11
2.4.1. A T_{90} statisztikai változó meghatározása	11
2.4.2. T_{90} -hisztogram	13
3. A szakdolgozat célkitűzései	14
4. A Fermi műhold	15
4.1. A detektorok	16
4.2. Az adatok	20
5. Módszerek	22
5.1. Az adatfájlok kezelése	22
5.2. A detektor kiválasztása	23
5.3. A fénygörbe elkészítése	24
5.4. A háttér kezelése	24
5.5. Az integrális görbe elkészítése	25
6. Eredmények	27
6.1. A másodfokú illesztés: első minta	27
6.2. A harmadfokú illesztés: második minta	28
6.3. Az eredmények diszkussziója	30
7. Összefoglalás	31

Ábrák jegyzéke

1.	A BATSE által detektált gammakitörések eloszlása az égbolton egyenletes és izotrop.	7
2.	A tűzgolyó modell	9
3.	A 080916009 jelű kitörés fénygörbéi. Bal: eredeti differenciális alakban. Jobb: fölintegrált alakban, a függőleges vonalak közötti tartomány a T_{90} értéke.	12
4.	A kitörések időtartamának eloszlása	13
5.	A Fermi műhold fantáziaképe	15
6.	Egy NaI-detektor fényképe	16
7.	Egy BGO detektor fényképe. A fedélzeten két ilyet helyeztek el, két átellenes oldalon, lásd a	17
8.	A GBM detektorainak helyzete. Fönt: a hivatalosan publikált ábra a GBM detektorainak elhelyezkedéséről. Lent: a jobb átláthatóság kedvéért egy gömbfelületen ábrázoltam a detektorok irányítását.	19
9.	A 080916009-es kitörés adatsora egységesen 64 ms-os felbontással. Az időtengelyen a 0 s a kitörés kezdetéhez állítottam azzal, hogy levontam a kitörés kezdetének időpontját, a „triggertime”-ot.	24
10.	Bal: A 080916009-es kitörés fénygörbéje, függőleges vonalak között vastaggal feltüntetve a háttérintervallumok. Jobb: az illesztett polinom vastag vonallal látszik.	25
11.	A 080916009-es kitörés fénygörbéjének fölintegrált alakja, a kitörés körüli tartományra ránközelítve. A kijelölt minimum és maximum szintek vízszintes vonallal jelölve látszanak. A függőleges vonalak közötti tartomány a keresett T_{90} értéke.	26
12.	A Fermi által detektált kitörések időtartamának eloszlása. Másodfokú háttérillesztés eredményei.	28

13. A Fermi által detektált kitörések időtartamának eloszlása. Harmadfokú háttérillesztés eredményei.	29
---	----

Táblázatok jegyzéke

1. Gammakitörést detektáló műholdak	6
2. A GBM-detektorok iránya a műhold +Z tengelyéhez képest.	18

1. Bevezetés

Mióta a hidegháború alatt egy véletlen során fölfedezték a gammakitöréseket, a kutatókat egyre jobban foglalkoztatja ezen rejtélyes, galaxisunk határán túlról érkező, nagyenergiás kitörések eredete és magyarázata. A műholdak és műbolygók közül sokat gammakitörést 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 energiatarományban vizsgálja az eget. [23] [24]

Bár a gammakitörések kutatása csak pár évtizedes múltra tekint vissza, 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. [25] Az interneten keresztül bárki azonnal értesülhet egy új kitörés bekövetkezéséről és hozzáférhet az adatokhoz is. [26] [24] Ennek megfelelően a kitörések fizikáját leíró elméletek száma is egyre nő, és sok közülük már kielégítően megmagyaráz egyes megfigyeléseket (sajnos nem az összeset, az ilyen elmélet még várat magára). [22] 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 gammakitörések a legnagyobb energiát legrövidebb idő alatt kibocsátani képes objektumok az Univerzumban. [23] Bármilyen nagy részecskegyorsítókat építünk is, a gammakitörésekéhez fogható energiát (10⁵¹ 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. [18]

Szakedolgozatomban a kitörések egyik legfontosabb jellemzőjét, az időbeli lefolyást vizsgálom, melynek jelentősége azért olyan nagy, mert elsősorban az időtartam alapján sikerült a kitörések két csoportját elkülöníteni egymástól. A 2. fejezetben összefoglalom a téma szakirodalmát, az ezt követő fejezetekben (3–6.) pedig

bemutatom a saját kutatásomat. Kitérek a Fermi műhold működésére, melynek adatait földolgoztam, ismertetem az alkalmazott módszert (a kitörés fénygörbéjének elkészítése, a kitörésnek a háttértől való elkülönítése, háttérillesztés, a zajmentes fénygörbe fölintegrálása, és az így kapott integrális görbéből a T_{90} kiszámolása), majd leírom a kapott a végeredményeket és ezek diszkusszióját.

2. A gammakitörések szakirodalmának összefoglalása

2.1. Felfedezésük és kutatásuk

A kozmikus gammakitöréseket (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 gamma-sugár-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 gammakitörések modern tudományos kutatását. [23] Az 1. táblázatban felsorolt műholdak detektáltak gammakitöréseket az elmúlt harminc évben (a teljesség igénye nélkül).

Vela 1-6	1960-1970
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. Gammakitörést detektáló műholdak

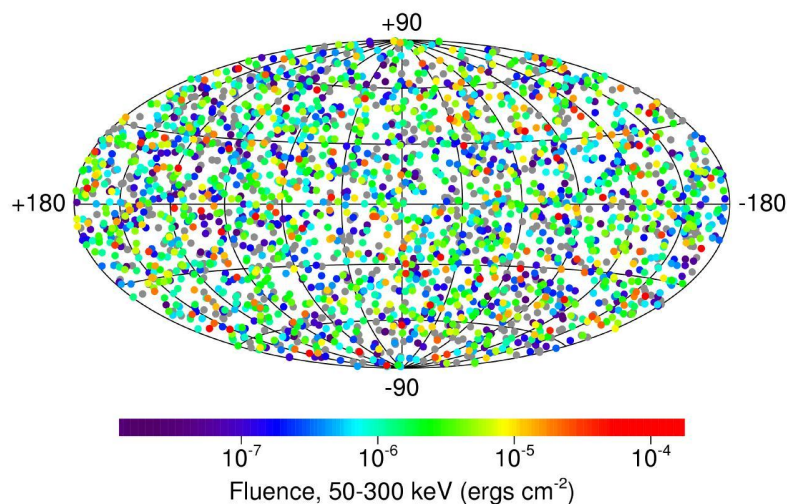
A legjelentősebb ezek közül a Compton Gamma-Ray Observatory fedélzetén működő BATSE (Burst and Transient Source Experiment) nevű eszköz, mely közel tíz éves működése során (1991. április 5-e és 2000. június 4-e között) több mint 2704

gammakitörést detektált, lefedve közel az egész égboltot. Mérései alapján dőlt el az a kérdés is, hogy vajon a gammakitörések 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. [2] Ez kizárja a galaktikus eredetet, ehelyett kozmológiai távolságokat valószínűsít.



1. ábra. A BATSE által detektált gammakitörések eloszlása az égbolton egyenletes és 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. [12] 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

kisebbs 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). [23] Az elmúlt években felmerült egy harmadik, közepes időtartamú csoport léte is (intermediate bursts), melynek eredete még nem tisztázott. [8] [9] [1] [17] [20] [11]

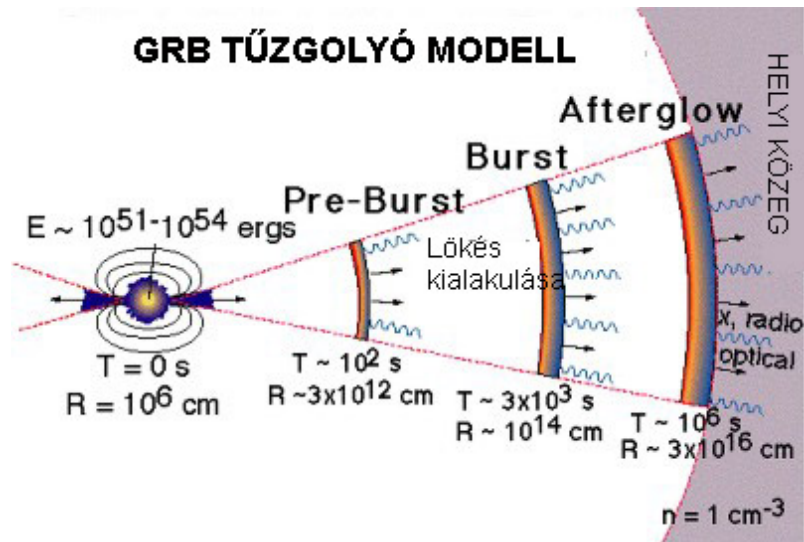
Az mindenesetre valószínű, hogy a hosszú gammakitörések 30 naptömegnél nagyobb csillagok (kollapszárnak is nevezik őket) összeroskadásakor, a rövid gammakitörések pedig kompakt objektumok (pl. neutroncsillag, fekete lyuk, fehér törpe) összeütközésekor jönnek létre. [23] Ezt onnan lehet tudni, hogy a 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 gammakitörésekhez tartozó nagy energiát. [22]

2.2.1. A tűzgolyó modell

Mindkét fajta gammakitörés 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.

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. [3]

Amikor a kilövellt nyaláb a külső közeggel, a csillagközi anyaggal vagy a saját



2. ábra. A tűzgolyó modell

maga által korábban lefűjt 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). [21]

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*). [15]

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 gammakitörés 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.) [14]

A jitter sugárzás elméletével a fenti ellentmondások megmagyarázhatók. Mindazonáltal a gammakitörések legteljesebb leírásához a két sugárzásfajta együttes jelenléte szükséges. [14] [7]

Egy másik, néhány kitörést kielégítően magyarázó elmélet az ún. ágyúgolyó (*cannonball*) modell. [6] A modell lényegi újdonsága az eddigiekhez képest, hogy feltételezi, hogy a szinkrotron sugárzás mellett az inverz Compton-szórás is szerepet játszik a gammakitörés folyamatában. [21]

2.3. Nyitott kérdések

Amellett, hogy az eredetükre többé-kevésbé jó modell van, nagyon sok még a nyitott kérdés a gammakitörések 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 közük 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. [22]) 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 gammakitörések megértésével és megmérésével talán közelebb jutunk az Univerzum történetének feltérképezéséhez is, mivel ezek az eddig ismert legfényesebb objektumok. [18] Sugárzásuk elnyelődését vizsgálva különböző kozmológiai korok történelmét is megismerhetjük. [22]

2.4. A gammakitörések statisztikus vizsgálata

A gammakitöréseket 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 gammakitörés történt: 5,76 magnitúdó fényességű volt az optikai utófénye a maximumban, a vöröseltolódására pedig $z = 0,937$ értéket mértek. [5])

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. Ebben a dolgozatban elsősorban ezt a változót vizsgálom, ezért definícióját és gyakorlati meghatározását itt ismertetem.

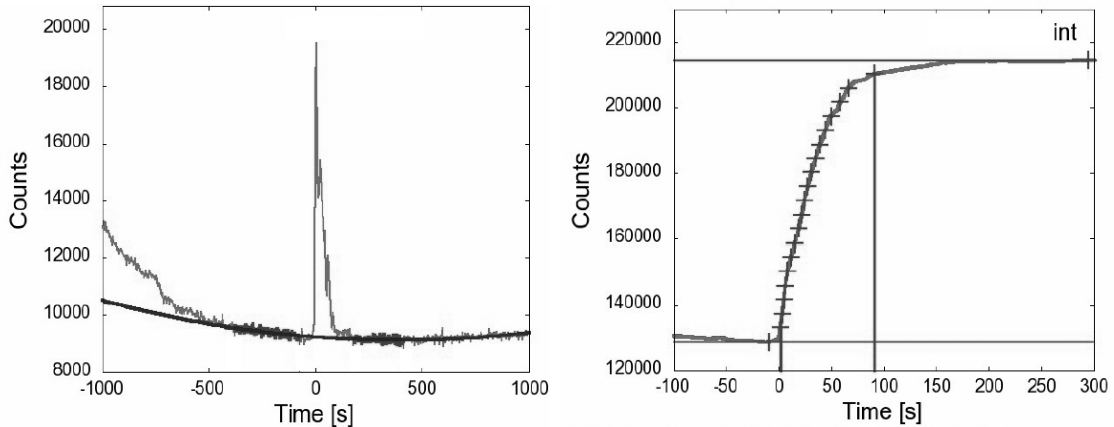
2.4.1. A T_{90} statisztikai változó meghatározása

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.) [19]

A T_{90} úgy határozható meg a gyakorlatban, hogy a fénygörbét¹ föl kell integrálni (a valószínűségszámításból ismert sűrűség- és eloszlásfüggvény közötti kapc-

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

solat 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} .



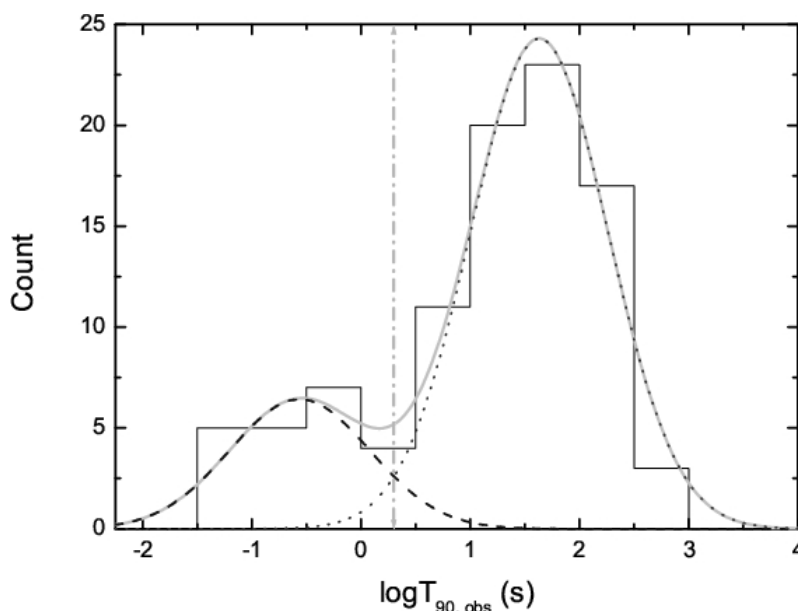
3. ábra. A 080916009 jelű kitörés fénygörbéi. Bal: eredeti differenciális alakban. Jobb: fölintegrált alakban, a függőleges vonalak közötti tartomány a T_{90} értéke.

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 a fölintegrálás 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. Munkám során másod- és harmadrendű görbével dolgoztam. Ezt a választást az indokolta, hogy a háttér változásaiért elsősorban a Fermi műhold mozgása és forgása felelős, ezért a háttér változása az esetek többségében nem lineáris. Vannak olyan hátterek, melyeket már egy parabola is jól modellez (az ilyenekből válogattam ki az első mintát, ld. 6. fejezet), de a legtöbbet csak harmadfokú görbével lehet kielégítően modellezni (a második minta ilyen kitöréseket tartalmaz).

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 átfog. Az 1990-es évek első felében megvizsgálták ennek eloszlását [13]. Azt találták, hogy az eloszlás egyértelműen két púpú, lásd 4. ábra. A két púp következménye, hogy a gammakitöréseket 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.



4. ábra. A kitörések időtartamának eloszlása

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. [8] [9] [1] [17] [20] [10]

3. A szakdolgozat célkitűzései

Munkám célja a T_{90} értékek meghatározása a Fermi műhold által mért gammakitörésekre. Mivel a Fermi katalógusa még nem jelent meg, ezért erről jelenleg nincsenek publikált adatok. A T_{90} értékeket a Fermi által eddig detektált kitörések esetén meghatározva elkészíthető a T_{90} -hisztogram.

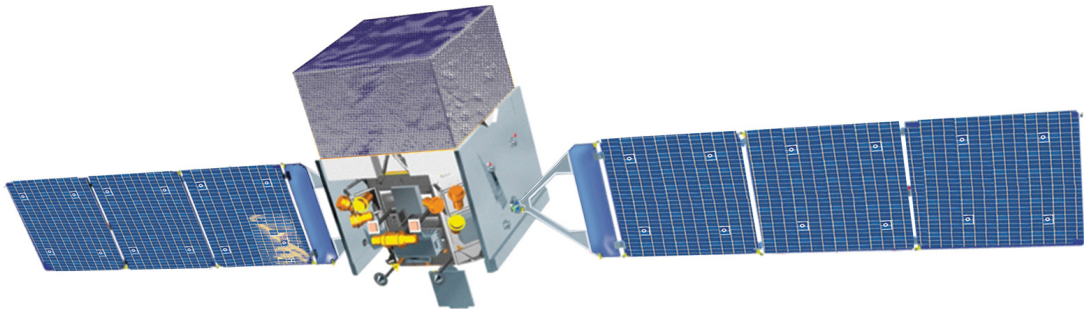
Ennek módszere: a mért adatokból fénygörbét kell készíteni, a háttérre elméleti görbét kell illeszteni és ezt a fénygörbéből le kell vonni, hogy a zaj lecsökkenjen, majd föl kell integrálni a fénygörbét, és az így kapott eloszlásfüggvényből a T_{90} -et meghatározni.

A Fermi műhold működésének első két évében (2008. július 11. és 2010. március 4. között) 687-szer adott triggerjelet, de ebből csak 416-ról állapították meg, hogy valóban gammakitörés. Ezek közül választottam ki két mintát. Az első minta esetén a háttérrel parabolával illesztettem, a második minta esetén harmadfokú polinommal. A két mintára külön-külön elkészítettem a T_{90} -hisztogramot és ezeket összehasonlítottam, ld. 6. fejezet.

Itt jegyzem meg, hogy a munka lényegi része a fénygörbe földolgozásának folyamata volt. A T_{90} fent leírt definíciójából indulok ki, és a nyers adatokat, adatsorokat dolgozok föl. A munka sarkallatos pontja a háttérintervallumok kijelölése. A háttérintervallumokat az eddigi legnagyobb és legtöbbet használt adathalmazra, a CGRO (BATSE) műhold adataira 2001-ben közzétették [28] [19], de az újabb műholdak, így a Fermi esetén ez eddig nem történt meg (és kérdéses, hogy meg fog-e egyáltalán történni). A kidolgozott és az alábbiakban leírt eljárás alkalmas további minták földolgozására, mert semmi más nem szükséges hozzá, mint a Fermi eredeti adatai és az általam megírt programok. Így lehetővé válik majd, hogy néhány év múlva, ha a Fermi már kellően sok kitörést detektált, a módszert az összesre alkalmazzuk. Ezzel egy későbbi kutatás alapjait vetettük itt meg.

4. 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 gamma sugarakat 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. [24]

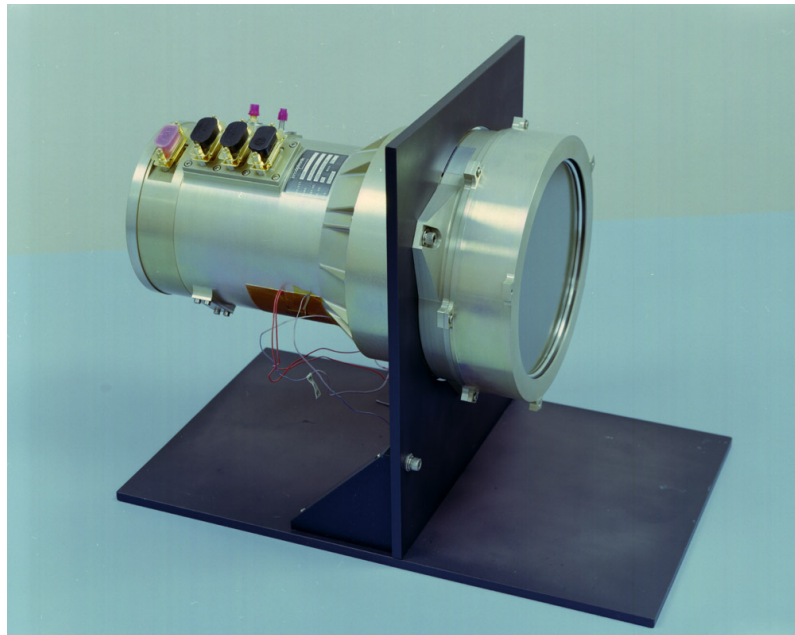
A Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) érzékenysége a 8 keV – 40 MeV-os energiatartományt fedi le, vagyis a viszonylag alacsony energiákon is végez méréseket. Ha észlel egy kitörést, a fedélzeti számítógépe (DPU) által meghatározott koordinátákat elküldi a LAT-nak, amely az objektumot sokkal hosszabb ideig (még 5 óráig) detektálja. [16]

Ebben a dolgozatban a GBM által detektált adatokat elemeztem.

4.1. A detektorok

A 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. [16]



6. ábra. Egy NaI-detektor fényképe

- 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. [16]



7. ábra. Egy BGO detektor fényképe. A fedélzeten két ilyen helyeztek el, két átellenes oldalon, lásd a 8. ábrát.

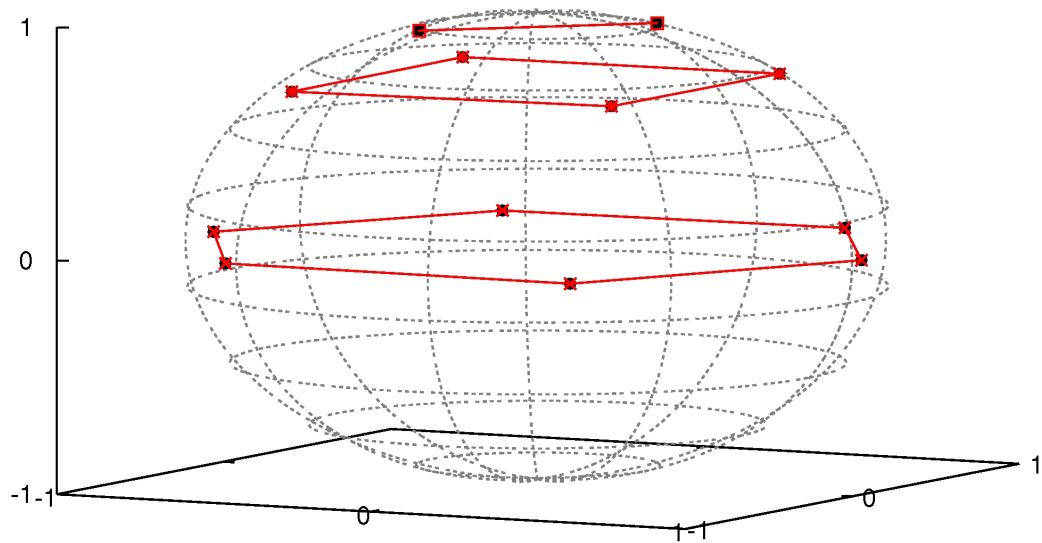
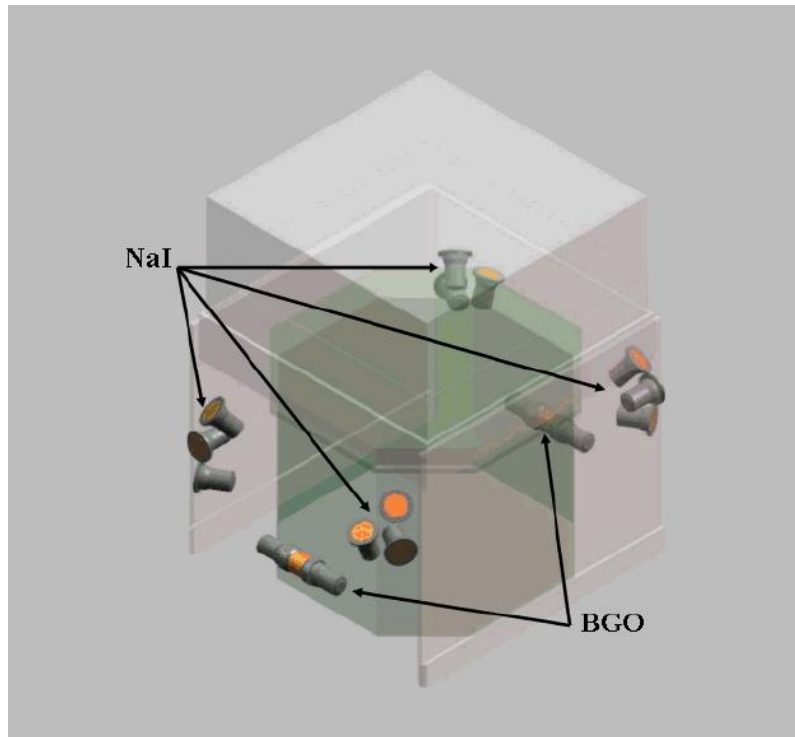
A 12 db NaI-detektor elhelyezkedése egymáshoz és a műhold tengelyéhez képest elég összetett. A 2. táblázat megadja a detektorok irányát a műhold ún. +Z tengelyéhez képest (mely tulajdonképpen a LAT maximális effektív felületének irányát jelenti). Az azimutszöget az óramutató járásával megegyező irányban 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.

Detector ID	Azimuth (deg)	Zenith (deg)
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-detektorok iránya a műhold +Z tengelyéhez képest.

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 tányérja felé mutat) a lehető legjobban lefedjék detektorokkal, és így a legnagyobb határfokot érik el. Ennek módját a legkönnyebb úgy megérteni, hogy elképzeljük, hogy a 12 detektor irányuk alapján egy félgömb felületén helyezkedik el (8. 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 csúcsán 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 csúcsát alkotják, tehát a függőlegesen állók és a vízszintesen fekvők közötti irányokban is folyik adatvétele ezekkel.



8. ábra. A GBM detektorainak helyzete. Fönt: a hivatalosan publikált ábra a GBM detektorainak elhelyezkedéséről. Lent: a jobb átláthatóság kedvéért egy gömbfelületen ábrázoltam a detektorok irányítását.

4.2. Az adatok

A GBM-detektorok jeleit egy 9,6 MHz-en működő analóg-digitál konverter 4096 energiacsatornába (12 bit) osztja. Két esemény közti holtidő minimálisan $2,6 \mu\text{s}$, de ennek pontos értéke függ a jel magasságától is. Az adatok 8 ill. 128 energiacsatornába kovertálódnak 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. [16]

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

A 128 energiacsatornát tartalmazó fájlok az ún. CSPEC fájlok. Itt a spektrális adatok a lényegesek, éppen ezért az időbeli fölbontás rosszabb: 4096 ms a binek szélessége általában.

A fent említett két fájltypus 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 gamma-kitörés 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 ismertetettől. 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. [16]

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 gammakitörés. A többi trigger a következők egyike lehetett:

- 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 műhold összes adatát közzéteszik a <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data> oldalon. Alapvetően három nagy kategóriába osztják őket: 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. [16]

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.

5. Módszerek

5.1. Az adatfájlok kezelése

Az általam feldolgozott adatok a `legacy.gsfc.nasa.gov` nyilvános webhelyről érhetők el. Itt 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 (ezek a kitörés helyére, idejére és a detektorokra vonatkozó információkat tartalmazzák).

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.

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.

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.

5.2. A detektor kiválasztása

Egy kitörés esetén valamennyi detektor adatsora elérhető. Ez kitörésenként 14 detektort jelent (12 NaI és 2 BGO detektor). Az egyszerűség kedvéért a továbbiakban csak a NaI detektorok adataival foglalkozok, de még így is 12 adatsorból választhatok az elemzéshez. Kézenfekvő lehetőség, hogy a triggerjelet adó (ún. triggerelt) detektorokat használjam. Ebből legalább kettő van, mivel koincidencia szükséges a triggerhez. Fölmerül a kérdés, hogy vajon a triggerelt detektor adatsora tartalmazza-e a legtöbb hasznos információt a 12 adatsor közül.

Ennek eldöntéséhez valamennyi kitörés valamennyi detektorára lefuttattam egy programot, ami megméri a fénygörbe maximális beütésszámát (a legnagyobb csúcs aljától a tetejéig). A kapott eredmények összesítéséből a következő arányok adódtak:

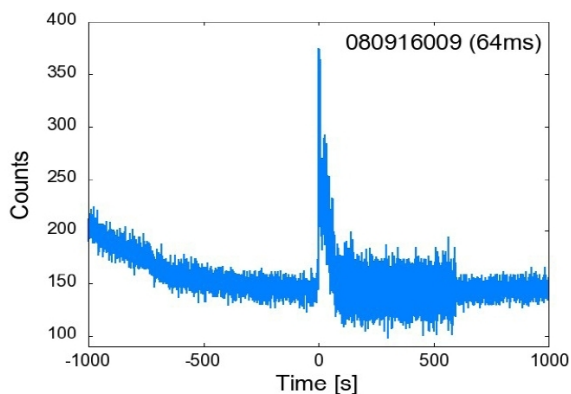
- a kitörések 53%-ában két triggerelt detektor éri el a két legnagyobb beütésszámot,
- 40% esetében a két legnagyobb beütésszámot egy triggerelt és egy nem triggerelt detektor éri el, valamint
- a maradék 7% esetén a két legnagyobb beütésszámot nem triggerelt detektorok érik el.

Nem lehet tehát kijelenteni, hogy a triggerelt detektorok lennének a legerősebb, legtöbb adatot összegyűjtő detektorok. Ezért a 12 detektor közül mindig azt az egyet választottam ki az elemzéshez, melynek maximális a beütésszáma, függetlenül attól, hogy adott-e triggerjelet.

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. Az összegzés azért volt célszerű, mert jelen esetben nem foglalkozom a kitörések energetikájával vagy spektrális felbontásával, csak az időbeli lefolyásával.

5.3. A fénygörbe elkészítése

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 lépcsősé válik, és a szórás is kisebb lesz) figyelmen kívül hagyjuk.



9. ábra. A 080916009-es kitörés adatsora egységesen 64 ms-os felbontással. Az időtengelyen a 0 s a kitörés kezdetéhez állítottam azzal, hogy levontam a kitörés kezdetének időpontját, a „triggertime”-ot.

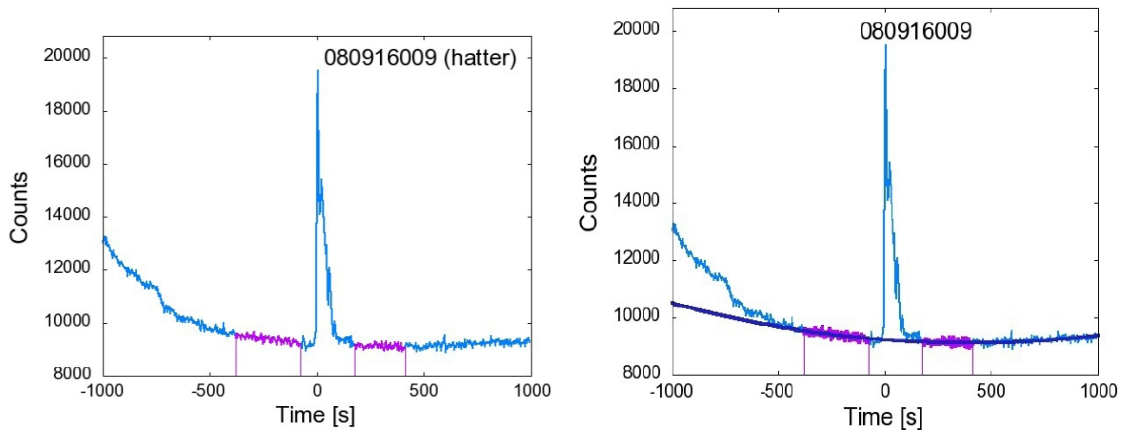
Az így elkészített fénygörbe alkalmas a fölintegrálásra.

5.4. A háttér kezelése

A fölintegrálás előtt a háttér sztochasztikus fluktuációját kezelni kell. Ehhez a háttérre egy másod- vagy harmadfokú polinomot illesztettem a gnuplot⁴ nevű programmal, χ^2 -módszerrel. (Egészen pontosan a gnuplot az ún. Marquardt–Levenberg-algoritmust használja, ami egy nemlineáris legkisebb négyzetek módszer. [27])

⁴ www.gnuplot.info

Ahhoz, hogy az illesztést el tudjuk végezni, először meg kell határozni azt az intervallumot, amely a háttérrel tartalmazza – ebbe nem szabad belevenni a kitörést magát, mivel akkor az egész háttérleválasztás értelmét veszti, és nem érdemes foglalkozni a nagyon távoli időkkel sem, mivel az ottani háttér már egészen más lehet, mint az, ami a kitörésre ráakódik. Általában két intervallumot jelöltem ki, egyet a kitörés előtt, és egyet utána, és ezekre illesztettem.

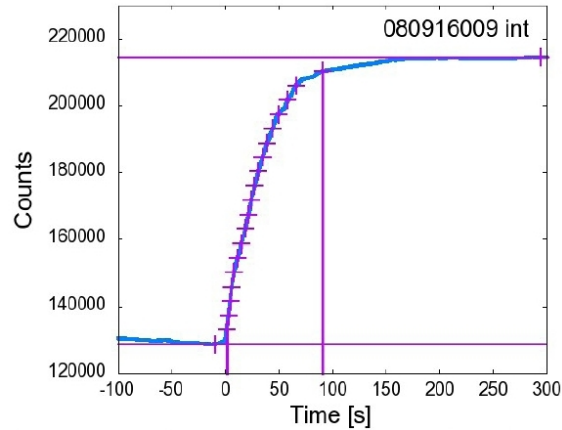


10. ábra. Bal: A 080916009-es kitörés fénygörbéje, függőleges vonalak között vastaggal feltüntetve a háttérintervallumok. Jobb: az illesztett polinom vastag vonallal látszik.

5.5. Az integrális görbe elkészítése

Az illesztett polinomfüggvényt a fénygörbéből levontam, majd a fénygörbét fölintegráltam. A T_{90} mennyiség meghatározásához az integrális görbén ki kell jelölni a minimum és maximum szintek értékét, melyek 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}



11. ábra. A 080916009-es kitörés fénygörbéjének fölintegrált alakja, a kitörés körüli tartományra ráközelítve. A kijelölt minimum és maximum szintek vízszintes vonallal jelölve látszanak. A függőleges vonalak közötti tartomány a keresett T_{90} értéke.

érték.

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.

6. Eredmények

A 5. fejezetben leírt módszert valamennyi kitörésre automatizálva elvégeztem. A rendelkezésre álló 416 kitörésből két mintát válogattam ki. Az első minta csak 126 kitörést tartalmaz. A kiválasztás szempontja az volt, hogy a háttér jól illeszthető legyen egy másodfokú parabolával. A második minta már 285 kitörést tartalmaz. E minta esetén harmadfokú polinommal dolgoztam, ami több szabadságot enged a háttérrel illetően, így a kiválasztás szempontja csupán az volt, hogy a fénygörbén megkülönböztethető-e a zajon kívül bármilyen látható csúcs, valamint hogy a háttér leválasztása és a fölintegrálás után használható adatsort kaptam-e.

A 2.4.2 fejezetben írottak szerint a T_{90} időtartamok tízes alapú logaritmusának gyakorisága két púpú eloszlást követ. A következőkben megvizsgáljuk, hogy teljesül-e ez a tulajdonság az elkészített mintákra.

6.1. A másodfokú illesztés: első minta

A 12. ábrán látható a vizsgált 126 kitörés $\lg T_{90}$ gyakorisági eloszlása (első minta). Megfigyelhető, hogy az eloszlást lényegében a hosszú kitörések ($T_{90} > 2$ s, azaz $\lg T_{90} > 0,3$) dominálják, eltekintve attól a kis púptól 0 és 0,3 között, melyet a mintában lévő, mindössze három darab 2 s-nál rövidebb kitörés okoz.

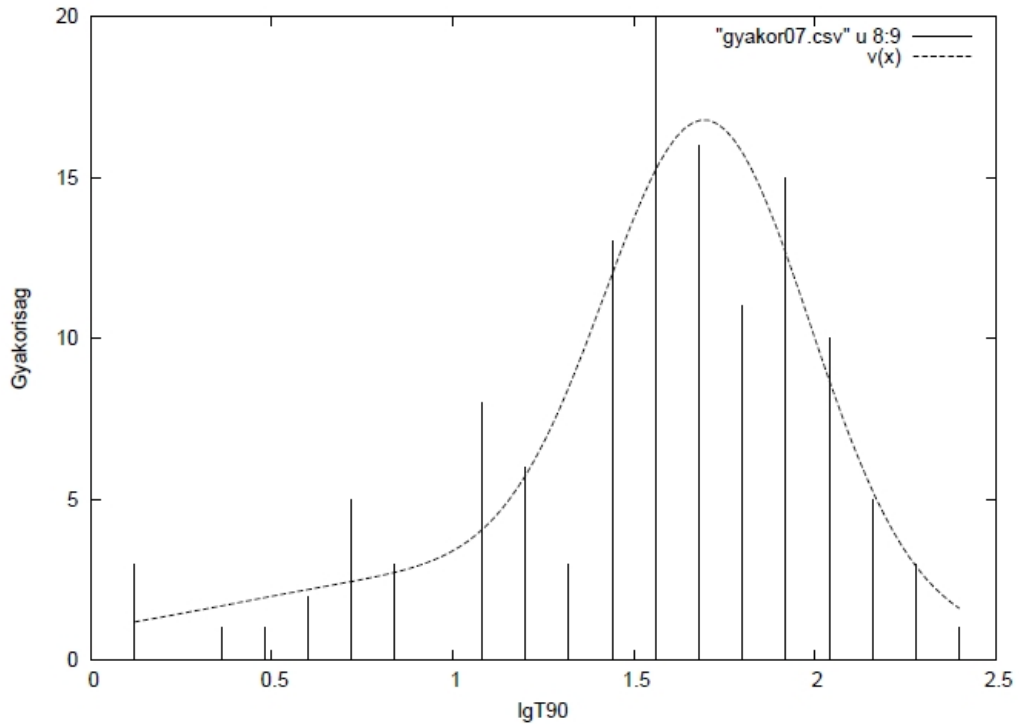
Az említett három rövid kitörés túl kevés ahhoz, hogy a két púpú eloszlást illeszteni tudjuk a mintára. Viszont már az ábrán is látszik, hogy a hosszú kitörések eloszlása nem szimmetrikus, hanem a rövidebb idők irányában lassabban cseng le, mint a hosszabb idők irányában. Ezt az effektust igyekeztem illeszteni az ábrán látható, (1) alakú görbével.

Az illesztett görbe alakja és paraméterei:

$$v(x) = \frac{A_1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{A_2}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (1)$$

$$A_1 = 5,83 \quad \mu_1 = 1,19 \quad \sigma_1 = 0,81$$

$$A_2 = 10,13 \quad \mu_2 = 1,70 \quad \sigma_2 = 0,28$$

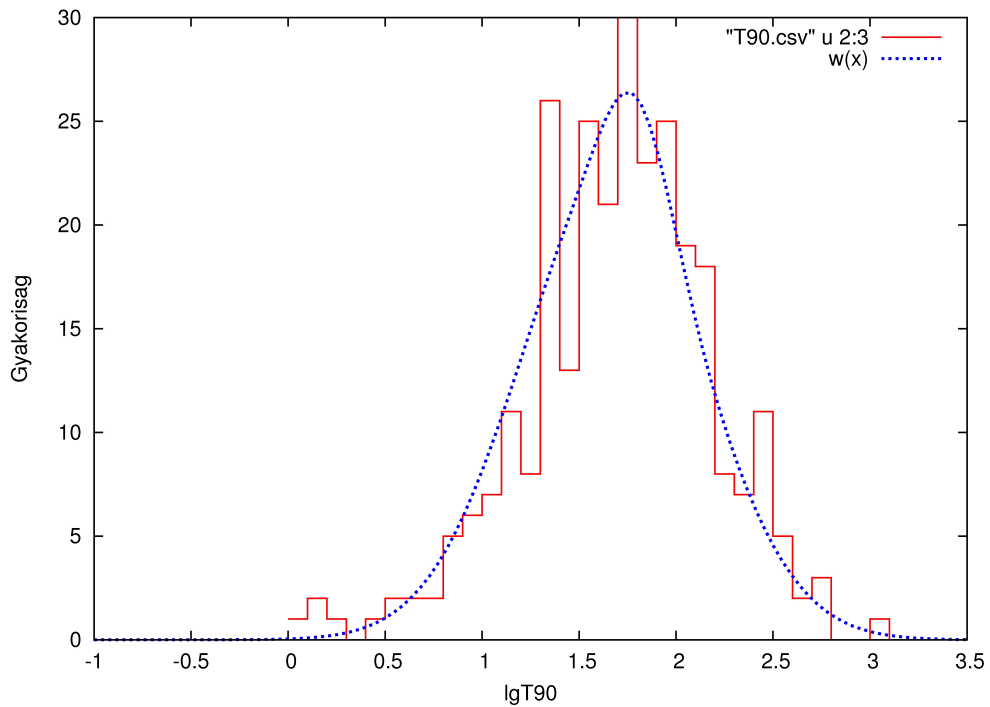


12. ábra. A Fermi által detektált kitörések időtartamának eloszlása. Másodfokú háttérillesztés eredményei.

Kérdés, mi okozhatta, hogy az eloszlás nem szimmetrikus. Mielőtt ennek magyarázatát keresnénk, vizsgáljuk meg a második mintát, mely a nagyobb mintaelemszám és a harmadfokú polinom használata miatt pontosabb eredményt ad.

6.2. A harmadfokú illesztés: második minta

A 13. ábra mutatja annak a 285 kitörésnek a T_{90} -hisztogramját, melynek háttérét harmadfokú polinommal illeszttem (második minta). A hosszú ($>2s$) kitörések itt is nagy számban vannak jelen a mintában, míg a rövid ($<2s$) kitörésekből mindössze néhány akad.



13. ábra. A Fermi által detektált kitörések időtartamának eloszlása. Harmadfokú háttérillesztés eredményei.

Az illesztés ebben az esetben is a (1) alakú görbével történt. A kapott paraméterek:

$$\begin{aligned}
 A'_1 &= 2,20 & \mu'_1 &= 1,80 & \sigma'_1 &= 0,17 \\
 A'_2 &= 25,93 & \mu'_2 &= 1,66 & \sigma'_2 &= 0,47
 \end{aligned}$$

Érdekes probléma, hogy mi okozza az 1,5 tájékán látható magas csúcsot. Ez a csúcs az illesztést is befolyásolta: a görbe nem teljesen szimmetrikus a második minta esetén sem.

6.3. Az eredmények diszkussziója

Minőségileg mindkét minta esetén hasonló eredményt kaptam. Ezekre kell most magyarázatot keresni.

- *A mintából szinte teljesen hiányoznak a rövid kitörések.* Ennek magyarázata az lehet, hogy a Fermi műhold GBM műszerének NaI detektorai, melyeknek adatait földolgoztam, kevésbé érzékenyek a rövid és (ennélfogva) „kemény” kitörésekre (ld. 2.2. fejezet). Másik magyarázat lehet, hogy a rövid kitörések jobban beleolvadnak a háttérzajba, így közülük sokan már a legelején a szelekciókor kiestek a mintából, mivel nem vagy alig látszik rajtuk kiértékelhető adat. Ezen hibák kiküszöbölésére érdemes lenne megvizsgálni a Fermi műhold másik műszerének, a LAT-nak a mért adatait és összevetni a GBM adatokkal.
- *A hosszú kitörések eloszlása asszimmetrikus.* A jelenleg rendelkezésre álló adatok alapján elképzelhető, hogy a szimmetriától való eltérést a közepes csoport (*intermediate*) okozza, sőt még a 13. ábrán 1,5 körül látható magas csúcsért is ezek lehetnek a felelősek. Ennek végleges eldöntéséhez azonban mindenképpen szélesebb körű vizsgálatot kell folytatni, belevonva a többi Fermi által detektált kitörést is. Erre egy későbbi munkában kerül majd sor.

7. Összefoglalás

Áttekintettem a gammakitörések kutatásának főbb állomásait és eredményeit, valamint a jelenség lefolyására kidolgozott modelleket, alternatív modelleket és nyitott kérdéseket.

Bemutattam a Fermi mesterséges hold felépítését, működését és a földre továbbított adatok típusait.

Definiáltam a kitörések időbeli lefolyását jellemző T_{90} statisztikus paramétert, és bemutattam azokat a tudományos eredményeket, melyek az időtartam alapján két fő csoportot különítenek el.

A T_{90} definícióját fölhasználva a Fermi által detektált kitörésekre meghatároztam a T_{90} értékeket. Ennek módszere: a fénygörbe elkészítése a nyers adatokból, a fénygörbén a megfelelő háttérintervallumok kijelölése, a háttérre elméleti görbe illesztése és levonása a fénygörbéből, a zajmentes fénygörbe fölintegrálása, az integrált fénygörbén a maximum és minimum szintek megkeresése és végül a beérkezett energia 90%-ához tartozó T_{90} érték kiszámolása.

A végén a kapott mintákon elvégeztem egy statisztikus vizsgálatot (T_{90} -hisztogram), ezzel ellenőrizve a módszer helyességét.

8. Köszönetnyilvánítás

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

Hivatkozások

- [1] Balázs, L.G., et al. 1998, A&A, 339, 1
- [2] Balázs, L.G., et al. 1999, AA Sup. 138, 417
- [3] Balázs, L.G., et al. 2003, A&A, 401, 129
- [4] Balázs, L.G., et al. 2004, BaltA., 13, 207B
- [5] Bloom, J.S. et al. 2009, ApJ, 691, 723
- [6] Dado, S. et al. 2003, Physics Letters B, 562, 3-4
- [7] Hededal, C., 2005, PhD thesis (Gamma-Ray Bursts, Collisionless Shocks and Synthetic Spectra)
- [8] Horváth, I., 2002, A&A 392, 791-793
- [9] Horváth, I., Balázs, L.G., et al. 2006, A&A, 447, 23
- [10] Horváth, I., et al. 2008, A&A, 489, L1-L4
- [11] Horváth, I., et al. 2010, ApJ, 713 552
- [12] Lipunov, V. M. et al. 1997, A&A
- [13] Kouveliotou, C., et al. 1993, ApJ, 413, L101
- [14] Medvedev, M. V., 2000, ApJ, 540, 704
- [15] Medvedev, M. V., 2009, ApJ, 702, L91
- [16] Meegan, C. et al., 2009, ApJ (The Fermi Gamma-Ray Burst Monitor)
- [17] Mészáros, A. et al. 2000, ApJ, 539, 98
- [18] Salvaterra, R. et al., Nature 461, 1258-1260
- [19] Varga, B., 2005. diplomamunka, ELTE (Gamma-kitörések vizsgálata)

- [20] Vavrek, R. et al. 2008, MNRAS, 391, 1741
- [21] Veres, P., 2006, diplomamunka, ELTE (Gamma felvillansok spektrális elemzése)
- [22] Zhang, B., 2007, Chin.J.Astron.Astrophys. 7, 1-50
- [23] Bagoly, Z., 2005, Meteor Cs.É. 233
- [24] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- [25] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/>
- [26] http://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3_archive.html
- [27] <http://www.gnuplot.info/>
- [28] ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/compton/data/batse/ascii_data/