

Líkan af glæðum gammablossa

Guðlaugur Jóhannesson, Gunnlaugur Björnsson og Einar H. Guðmundsson

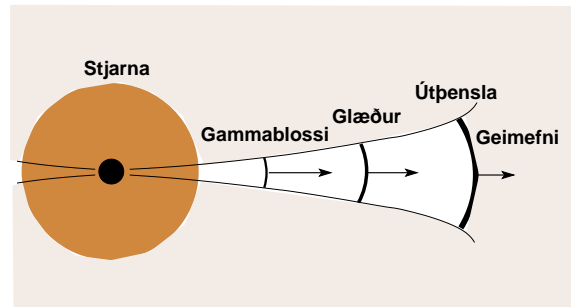
Raunvísindastofnun Háskólans

Vefútgáfa: 20. desember 2004

Útdráttur – Við gerum í stuttu máli grein fyrir endurbótum á strókalíkani sem mikið er notað við túlkun mælinga á glæðum gammablossa. Við sýnum meðal annars að orkuskot valda tímabundinni aukningu í birtu auk þess að hafa vel mælanleg áhrif á skautun ljóssins. Þetta gengur þvert á fyrri hugmyndir stjarnæðlisfræðinga um áhrif orkusinnspýtinga á birtueiginleika eldstrókanna. Við notum nokkur þekkt dæmi um glæður gammablossa til að sýna hvernig líkaninu er beitt við túlkun mælinga.

1. Inngangur

Almennt er nú talið að gammablossar sem vara lengur en um 2 sekúndur eigi uppruna sinn í þyngdarhruni massamikilla sólstjarna [47, 42, 16]. Við hrunið losnar gífurleg orka sem brýtur sér leið út eftir snúningsás stjörnunnar og rífur sig að lokum frá henni í afstæðilegum eldstrók (sjá mynd 1). Samkvæmt líkaninu sem mest er notað við túlkun mælinga [26, 50], myndar strókurinn afstæðilega höggbylgju í geimefninu utan við stjörnuna og ryður því á undan sér. Við víxlverkun stróks og geimefnis myndast samhraðalsgeislun (e. synchrotron radiation) sem er í mörgum tilfellum mælanleg frá jörðinni. Þessa rafsegulgeislun nefnum við glæður og spannar hún allt sviðið frá háorku gammageislum til lágorku útvarpsgeislunar. Eftir því sem strókurinn hleður utan á sig meira geimefni hægir hann smátt og smátt á sér og birta hans dofna, gjarna sem veldi af tíma. Við munum hér á eftir nefna þetta líkan *viðtekna líkanið*. Í mörgum blossomum tekur birtan að dofna hraðar u.þ.b. sólarhring eftir blossa-urðinn. Ástæður þessa geta verið tvær, annars vegar að einkennandi tíðnir í rófi glæðanna færast með tímanum yfir mælitíðnina vegna þess hvernig sambandi samhraðalsrófsins og birtuferilsins er háttáð í líkaninu [39]. Þessi örari dofnun getur líka orðið vegna lögunar stróksins [32]. Brotið sem þannig myndast í birtuferlinum ætti að vera stærra vegna stróklögunarinnar en vegna einkennistíðanna og óðháð tíðni. Það virðist líka vera raunin í flestum tilfellum þar sem slík brot í birtuferlum hafa sést.



Mynd 1. Myndin sýnir skematískt hvernig strókurinn þenst út. Orkan frá upptökunum (svartholinu?) í miðju stjörnunnar brýst út úr henni í eldstrók og myndar við það hrunu gammageislunar. Við áframhaldandi útpenslu og víxlverkun við geimefni utan stjörnunnar myndast glæður á lengri bylgjulengdum. Þegar strókurinn hefur hægt verulega á sér fer hann að þenjast út til hliðanna og fær á endanum lögun lúðurs. Stærðarhlutföll í myndinni eru verulega ýkt.

Viðtekna strókalíkanið hefur dugað vel til túlkunar mælinga flestra glæða hingað til, en þó hafa umtalsverð frávík mælst í nokkrum tilfellum. Glæður GRB 010222 dofnuðu til dæmis hægar en unnt er að skýra með góðu móti með strókalíkaninu vegna skorða sem það setur orkudreifingu rafeindanna og ósamræmis milli raunverulegs birtuferils og orkurófs og þess sem líkanið spáir. Birtuferlar blossomanna GRB 970508, 021004 og 030329 sýndu og óvenjuleg skeið birtuaukningar. Til þess að útskýra birtuaukninguna hafa verið gerðar endurbætur á viðtekna líkaninu þar sem víxl-

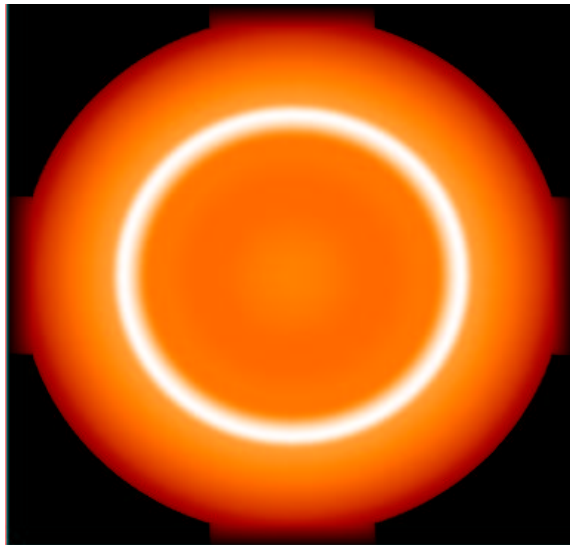
verkun stróksins við misleitt geimefni eiga að skýra aukninguna [23, 15, 27]. Vaxandi þéttleiki myndi þá auka birtuna á meðan minnkandi þéttleiki dregur úr henni. Einnig hefur verið stungið upp á því að skýra mætti birtuaukninguna með endurteknum orkuskotum [8, 12], en nýlega hefur því verið haldið fram að slíkt geti ekki verið raunin, sér í lagi vegna þess að orkuskotin hafi engin áhrif á skautunareiginleika líkananna [24].

Í þessari grein munum við sýna hvernig skýra má birtubreytingarnar með því að að bæta dreifðri orku- losun við viðtekna líkanið, samfellda losun fyrir hæga birtudofnun en strjála losun til að skýra tímabundna aukningu í birtu. Við sýnum einnig að strjál dreifing hefur mikil áhrif á eiginleika skautunarinnar.

2. Líkanið

Grunnhugmynd viðtekna líkansins er tiltölulega einföld [26, 50]: Við þyngdarhrun kjarna massamikillar stjörnu myndast svarthol. Þyngdarstöðuorkan sem þá losnar er ein meginkennistærð líkansins. Í einfaldaðri mynd má lýsa hamförum þessum sem sprengingu þar sem orkan E_0 losnar og stróklaga sprengileifar þeytast af stað út úr stjörnunni með afstæðilegum upphafshraða sem mældur er með Lorentz-þættinum Γ_0 . Þróun afstæðilegu höggbylgjunnar sem myndast þegar strókurinn brýst út úr yfirborði stjörunnar og fer að víxlverka við geimefnið umhverfis hana má lýsa með sjálfssamhverfri lausn [6] (sjá einnig [4] þar sem grein er gerð fyrir viðtekna líkaninu á íslensku). Í þeirri lausn er gert ráð fyrir að orkan losni samstundis við upphaf blossans. Það er hins vegar eðlilegt að gera ráð fyrir að orkan sem losnar í upphafi hafi einhverja dreifingu í Lorentz-þætti og jafnvel einnig í tíma og gæti þá annað hvort verið samfelld eða strjál [31, 38].

Endurbætur okkar á viðtekna líkaninu felast í því að leyfa dreifingu á orkunni sem losnar í upphafi. Við gerum í þessari grein ráð fyrir að öll orkan losni samtímis frá uppsprettunni en hafi dreifingu í Lorentz-þættinum. Orku- og skriðþungavarðveislur er svo beitt til að setja fram jöfnur er lýsa þróun eldstróksins í tíma fjarlægs athuganda. Í upphafi eru það afstæðilegu efniseiningarnar með hæsta Lorentz-þáttinn (sem líta má á sem þunnar skeljar) sem knýja strókinn, en svo bætist hægari hluti dreifingarinnar við þegar hraði stróksins minnkar. Líkanið ræður við hvaða hraða-dreifingu sem er en við höfum lagt megináherslu á



Mynd 2. Ef mælitæki athuganda hefðu næga skerpu væri þetta sú augnabliksmynd sem hann sæi af glæðum gamma-blossa. Vegna afstæðilegrar beiningar og samtímaflatarins kemur mesta birtan frá hring með opunarhorn $\sim 1/\Gamma$.

strjála dreifingu og svo dreifingu þar sem orkan gengur eins og veldi af Lorentz-þættinum.

Mælingar benda til þess að útgeislunin stróksins sé samhraðalsgeislun og við gerum til einföldunar ráð fyrir að rófi hennar megi lýsa með mjúklega tengdum veldisföllum [13]. Við gerum einnig ráð fyrir að á hverju augnabliki sé strókurinn einsleitur í eigin kyrrstöðukerfi og hafi þykkt sem ákvarðast af stökkskilyrðum yfir höggbylgjuna [6] og varðveislur einda. Þetta má réttlæta þar sem mesta geislunin kemur frá tiltölulega þunnri skel. Nálgunin hefur þann kost fram yfir sjálfssamhverfu lausnina að líkanið ræður við hvaða þéttleikadreifingu sem er. Þó að útgeislunarflötur stróksins sé kúlulaga í eigin kyrrstöðukerfi er hann það ekki í kerfi fjarlægs athuganda. Vegna afstæðilegra hrifa fær flöturinn eggölgun og geislunin sem athugandi sér á hverjum tíma er því heildun yfir mörg tímabil í þróun stróksins. Þessi samtímaflötur (e. equal arrival time surface) ásamt afstæðilegri beiningu (e. relativistic beaming) veldur því að með nægjanlegri upplausn sæi athugandi lýsandi hring á útgeislunarflötinum eins og sýnt er á mynd 2.

Almennt er talið að segulsviðið sem veldur samhraðalsgeisluninni sé óreglulegt og stefnusnautt. Það þjappast hins vegar saman í útbreiðslustefnu högg-

bylgjunnar [22]. Vegna afstæðilegrar beiningar sér fjarlægur athugandi strókin að nokkru leyti frá hlið meginhluta þróunarinnar og ætti því mögulega að geta mælt skautaða útgeislun. Samhverfa í stróknum veldur því hins vegar að heildarskautun sést aðeins ef sjónlína athugandans er frábrugðin samhverfuás stróksins. Öll tímaþróun skautunarinnar verður þá af rúmfræðilegum ástæðum [10]. Til að meta styrk skautunarinnar á hverjum tíma reiknum við framlag til Stokes stikanna $dU = P(\theta)dL \cos(2\phi)$ og $dQ = P(\theta)dL \sin(2\phi)$ frá hverjum stað á samtímaflatinum. Hér er $P(\theta) = P_0 \sin^2 \theta' / (1 + \cos^2 \theta')$ þar sem θ' er hornið frá sjónlínu í kerfi stróksins, P_0 er hámarks-skautunin og dL er augnabliksgildi útgeislunarafllsins frá hverjum stað flatarins. Fyrir mest alla þróun stróksins er hámarksskautunin á sýnilega sviðinu gefin með $P_0 = (p + 1)/(p + 7/3)$ þar sem p er veldisstuðull rafeindadreifingarinnar. Ef einungis er um að ræða einn orkulosunaratburð í upphafi fáum við, eins og áður hefur verið sýnt fram á [10], tvö útgildi á skautunarferlinum með 90° stefnubreytingu í skautuninni á milli þeirra. Þessi umskipti verða, eins og brotið í birtuferlinum, þegar strókurinn hefur hægt nægilega mikið á sér til að verða allur sýnilegur. Það gerist þegar $\theta \approx \Gamma^{-1}$ þar sem θ er hálfvörðunarskorn stróksins og Γ Lorentz-þátturinn [10, 37, 11].

Fjöldi stika í líkaninu getur verið nokkur, sér í lagi ef um er að ræða mörg stök orkuskot í strjáltri dreifingu. Til að ákvarða stika viðtekna líkansins, þ.e. upphafsorkuna E_0 , upphafs Lorentz-þáttinn Γ_0 , hlutfall orku í rafeindum ϵ_e , og segulsviði ϵ_B , svo og þéttleika geimefnisins n_0 , þarf mælingar á öllum tíðnisviðum auk rauðviks blossans. Ef orkulosunin er strjál, má auðveldlega ákvarða viðbótarstikana út frá tímasetningu og stærð birtuaukninganna. Ef skautunarmælingar eru fyrir hendi geta þær gefið besta matið á upphaflegu opunarhorni stróksins θ_0 , sér í lagi ef brotið í birtuferlinum tynist í tímabundinni aukningu birtunnar. Skautunarmælingarnar eru einnig notaðar til þess að festa hornið θ_v , sem sjónlína athuganda myndar við samhverfuás stróksins. Það skal tekið fram að stíkar líkansins eru ekki allir innbyrðis óháðir og breytingar á einum hafa yfirleitt í för með sér breytingar á einhverjum öðrum. Því getur verið erfitt að fá einhlítt ákvarðaða stika. Þéttari mælingar á mörgum tíðnisviðum þrengja stikarúmið hins vegar mikið.

Í stuttu má lýsa áhrifum staks orkuslots á eftirfarandi hátt: Þegar afstæðileg skel rekst á þá hægfare

sem á undan fer, eykst Γ snögglega en þróast upp frá því í tíma með sama hætti og áður en árekstur skeljanna varð [49]. Birta stróksins eykst við þessa auknu orku en þar sem hún ákvarðast af heildarútgeislun samtímaflatarins verður ekki um skörp skil að ræða heldur hægfare birtuaukningu. Ef orkuslotið er mjög öflugt getur ný höggbylgja innan stróksins valdið hraðari birtuaukningu, en í flestum tilfellum verður það ekki raunin [49]. Það er mikilvægt að taka eftir því að birtuaukningin kemur fyrst fram á svæðinu í kringum sjónlínuna sem verður fljótlega bjartara en hringlaga svæðið sem áður var ráðandi í útgeisluninni (sjá mynd 2). Bjarta svæðið færast með tímanum fjær sjónlínunni og verður að björtum hring eins og áður er sýnt. Þetta hefur mikil áhrif á þróun skautunarinnar því hringlaga svæði umhverfis sjónlínuna gefur enga skautun vegna samhverfu og því minnkar skautunin fyrst eftir orkuslotið. Eftir að hámarksbirtu er náð fer skautunin aftur að aukast og þróast með líkum hætti og fyrir skot, en vegna aukningarinnar í Γ hefur þróuninni seinkað. Við munum í næsta kafla sýna dæmi um þetta. Áhrif annarra orkuslota verða með svipuðum hætti. Ef orkulosunin er samfelld verða engin skörp skil á birtuferlinum en öll þróun verður hægari en búast má við í atburðum þar sem öll orkan losnar á andartaki í upphafi.

3. Samanburður við mælingar

Við sýnum hér með nokkrum dæmum hvernig líkanið er notað við túlkun gagna. Ekki er um að ræða eiginlega mátun heldur eru stíkar líkansins stilltir eins og lýst var að framan þar til niðurstöðurnar falla að mælingum. Allir eiginleikar blossans eru reiknaðir í einni keyrslu og engir viðbótarstíkar notaðir til að hækka eða lækka ferlana til að þeir passi betur við gögnin eins og oft hefur verið gert við túlkun birtuferla í viðtekna líkaninu. Þar hefur mesta áherslan verið lögð á það að finna hallatölu birtuferlana og draga út frá þeim ályktanir um aðra stíka líkansins.

3.1. GRB 990510

GRB 990510 var allbjartur blossi með rauðvik $z = 1.619$ [44]. Birtuferlarnir fylgja vel forspá viðtekna líkansins og til eru ítarleg mæligögn á mörgum tíðnisviðum sem henta vel til samanburðar við líkanreikninga okkar. Greinilegt tíðnióháð brot er í birtuferlunum á sýnilega sviðinu eftir u.þ.b. 1 dag [14], sem rennir stoðum undir strókalíkanið og einnig virð-

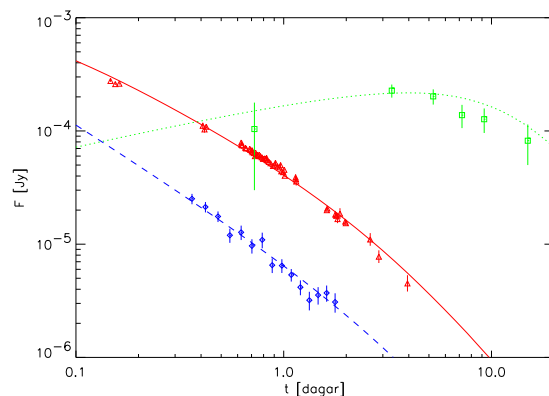
Tafla 1. Taflan sýnir stikana sem notaðir voru við útreikning nokkurra birtuferla. Hér er E_{Tot} heildarorkan sem knýr glæðurnar, þ.e.a.s. upphafsorkan E_0 ásamt orkuskotum eða samfeldri dreifingu þar sem við á. Sjá nánari skýringar í texta.

Stíki	990510	021004	010222
E_0 [erg]	$4.8 \cdot 10^{50}$	$1 \cdot 10^{50}$	$5.4 \cdot 10^{49}$
E_{Tot} [erg]	$4.8 \cdot 10^{50}$	$2.9 \cdot 10^{51}$	$4.3 \cdot 10^{51}$
Γ_0	1000	800	750
n_0 [cm^{-3}]	1	26	0.5
θ_0	4.3°	1.4°	1.3°
$\theta_v[\theta_0]$	0.3	0.95	-
p	2.1	2.2	2.2
ϵ_e	0.45	0.21	0.4
ϵ_B	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$
s	-	-	1.7
γ_{min}	-	-	5
$E_1 [E_0]$	-	3.5	-
$E_2 [E_0]$	-	5.6	-
$E_3 [E_0]$	-	13	-
$E_4 [E_0]$	-	7	-

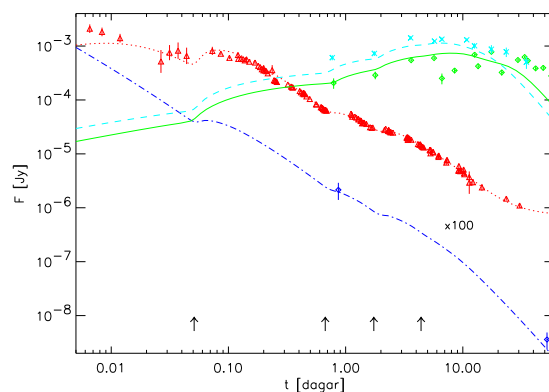
ast röntgenmælingar sýna svipað brot [21]. Ein skautunarmæling náðist af glæðum blossans [46] og var það í fyrsta sinn sem slík mæling heppnast. Þar sem einungis var um eina mælingu að ræða setur hún litlar skorður á líkanið og sjónlínuhornið gerir okkur kleift að skýra hana án vandræða. Mynd 3 sýnir hvernig niðurstöður líkansins falla að mælingum á birtuferlunum. Greinilegt samræmi er milli mælinganna og líkansins. Niðurstöðum okkar svipar mjög til niðurstaðna annarra [28] og stíkar líkananna eru nánast eins ef frá er talinn þéttleiki geimefnisins.

3.2. GRB 021004

Í birtuferli GRB 021004 á R borða voru óvenjulegar birtuaukningar og sýndist mönnum ferillinn brotna eftir 4.74 daga ef mælingarnar voru túlkaðar innan viðtekna líkansins [18]. Þessi tími fékkst með því að máta brotið veldisfall við mælingarnar en óvissan var umtalsverð. Allítarlegar skautunarmælingar voru gerðar og sýndu $\sim 90^\circ$ breytingu í skautunarhorninu við u.þ.b. 1 dag [33], í samræmi við skautunarlíkanið [10]. Samkvæmt forspá viðtekna líkansins ættu brotið í birtuferlinum og breytingin í skautunarhorninu að verða á sama tíma, en mælingarnar gefa allt annað til kynna. Með því að bæta við fjórum orkuinnspýtingum ofan á upphaflega strókinn getum við útskýrt birtuaukningarnar á birtuferlunum eins og sést á mynd 4.



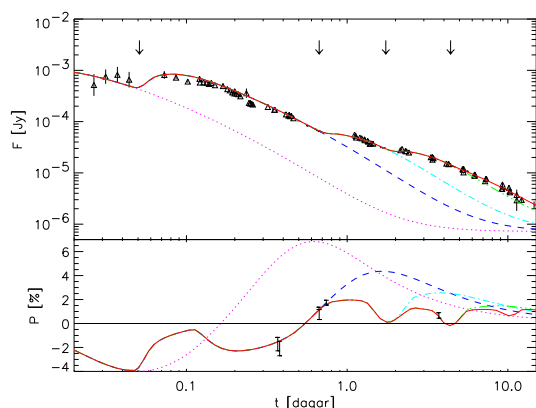
Mynd 3. Birtuferlar GRB 990510 á R borða (gögn frá [14, 40], heil lína), Röntgen (margfölduð með 100, frá [21], brotin lína), og 8.7 GHz (gögn frá [14], punktalína). Ferlarnir falla vel að viðtekna líkaninu. Ein skautunarmæling náðist af þessum blossa sem einnig fellur auðveldlega að líkaninu.



Mynd 4. Birtuferlar GRB 021004 á R borða (gögn frá [43, 30, 18], punktalína), Röntgen (margfölduð með 100, frá [34, 35], strika-punktalína), 8.46 GHz (heil lína) og 15 GHz (strikalína). Með því að nota 4 orkuskot má skýra birtuaukningarnar á R borðanum og halda innbyrðis samræmi við birtuferla á öðrum tímum. Örvanar á myndinni segja til um hvenær orkuskotin ná stróknum. Ferillinn á R borðanum inniheldur einnig birtu hýsilvetrabrautar blossans sem hefur birtustig 24. GHz gögnin eru frá [2] og <http://www.vla.nrao.edu/astro/prop/largeprop>. Eftir [5].

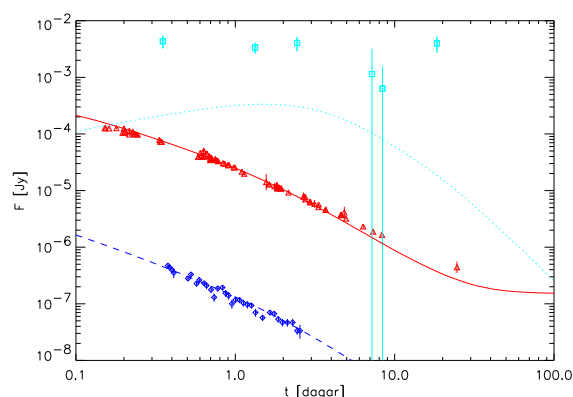
Örlítið ósamræmi er þó fyrsta hálf tímamann en ekki er ólíklegt að þá hafi endurkastshöggbylgja (e. reverse shock) verið ráðandi í birtuferlinum [20, 29].

Mynd 5 sýnir hluta birtuferils á R borða ásamt skautunarferlunum. Á myndinni eru sýnd áhrif hvers



Mynd 5. Efri hlutinn sýnir hluta af birtuferli GRB 021004 á R borða þar sem áhrif hvers orkuskot eru sýnd. Punktalínan sýnir birtuferilinn ef engin auka orkuskot eru sett inn, strikalínan sýnir áhrif eins skots, strika-punkta línan áhrif tveggja, strika-þrípunkta línan þriggja og heila línan birtuferilinn með öllum skotum. Örvarnar sýna hvenær skotin ná stróknum. Neðri hlutinn sýnir samsvarandi skautunarferla. Takið eftir því hvernig skautunin lækkar tímabundið við hvert skot sem einnig hægir á þróun hennar. Skautunargögnin eru frá [33, 24]. Eftir [5].

skots á birtu- og á skautunarferilinn. Einnig má sjá hvers vegna ósamræmi virðist á milli tímans þar sem birtuferillinn brotnar og þess er skautunarhornið breytist um 90° . Orkuskotin hægja á birtuferlinum og seinka brotinu. Mátun gagnanna við brotið veldisfall vanmetur því hallann á birtuferlinum og ofmetur brottímann. Breytingin á skautunarhorninu gefur því réttari ákvörðun á brottímanum í þessu tilviki heldur en birtuferillinn því brotið þar týnist í röð orkuskotanna. Við hvert orkuskot eykst birtan mjúklega miðað við feril án orkuinnspýtingar en heldur síðan áfram fyrri þróun. Áhrifin á skautunina eru hins vegar þveröfug þar sem skautunin minnkar tímabundið við hvert orkuskot vegna birtuaukningar kringum sjónlínuna eins og lýst er hér að framan, en heldur síðan áfram fyrri þróun sem þó hefur seinkað vegna hærri Lorentz-þáttar. Þess vegna sjáum við að breytingunni í skautunarhorninu hefur seinkað frá um 0.2 dögum til 0.6 daga og ef vel er að gáð sjást önnur víxl við 4 daga þar sem orkuinnskotið hefur náð að auka Lorentz-þáttinn nógu mikið til þess að færa þróunina tímabundið fram fyrir brotið.



Mynd 6. Birtuferlar GRB 010222 á R borða (gögn frá [7, 17, 45], heil lína), Röntgengögn (frá [48], strikalína) og 350 GHz (punktalína). Birtuferlarnir féllu óvenju hægt með tíma en það má útskýra með samfelldri orkuinnspýtingu. Mælingarnar á 350 GHz (kassarnir) eru ekki frá glæðunum heldur hýsilvetrarbrautinni sem var óvenju björt á þessu tíðnisviði [9]. Birtuferillinn á R borðanum inniheldur einnig hýsilvetrarbraut gammablossans en hún hefur birtustig 25.7.

3.3. GRB 010222

Glæður GRB 010222 voru óvenjulegar að tvennu leyti. Í fyrsta lagi brotnaði birtuferillinn eftir u.þ.b. 0.5 daga [7, 41] sem er óvenju snemma og bendir til þess að strókurinn hafi haft lítið opunarhorn. Einnig dofnaði birtan óvenju hægt með tíma, með veldisstuðul -0.7 fyrir brot og -1.3 á eftir [41, 7]. Séu þessar niðurstöður túlkaðar innan viðtekna líkansins gefa þær $p \approx 1.4$ sem er mun lægra en gildið $p \approx 2.2 - 2.3$, sem fræðilegir útreikningar gefa til kynna [1]. Þetta er einnig í ósamræmi við mælingar á rófi glæðanna á sýnilega sviðinu [25] sem benda til þess að $p \approx 2.2$, ef tekið er tillit til deyfingar í hýsli gammablossans. Með því að nota síðastnefnda gildið á p og samfellda dreifingu á orku ásamt rauðviki blossans $z = 1.477$ [19], fæst gott samræmi á milli líkansins og mælinganna eins og sjá má á mynd 6. Þetta er einnig í ágætu samræmi við fyrri niðurstöður [3].

4. Lokaorð

Við höfum lýst endurbótum á viðtekna líkaninu og sýnt hvernig má nota það til þess að máta birtuferla þriggja gammablossa og skautunarferil eins þeirra. Í öllum tilfellum er gott samræmi á milli reiknaðra niðurstaðna og mælinganna. Samræmi á milli gildis stikanna sem notaðir voru við máttunina er einnig

mjög gott. Þetta gefur til kynna að eðlisfræðilegar undirstöður líkansins séu traustar og líkanið stöðugt.

Þakkir

Rannsóknirnar sem hér er lýst eru hluti öndvegisverkefnis Rannís 2001, *Gammablossar og heimsfræði*. Þær hafa einnig verið styrktar að hluta af rannsóknasjóði Háskólans.

Summary We discuss improvements of the standard fireball model used to interpret gamma-ray burst afterglow light curves. We give examples of its use by considering data for GRB 990510, GBR 010222 and GRB 021004.

Heimildir

- [1] Achterbeg, A., Gallant, Y. A., Kirk, J. G., Guthmann, A. W., 2001, MNRAS 328, 393
- [2] Berger, E., Frail, D. A., & Kulkarni, S. R. 2002, GCN 1613
- [3] Björnsson, G., Hjorth, J., Pedersen, K., & Fynbo, J. U. 2002a, ApJ, 579, L59
- [4] Gunnlaugur Björnsson, Sigríður S. Gylfadóttir, Ingimar H. Guðmundsson, 2002b, Eðlisfræði á Íslandi X, ritstj. Ari Ólafsson, bls. 65-71
- [5] Björnsson, G., Guðmundsson, E. H. & Jóhannesson, G., 2004, ApJ, í prentun
- [6] Blandford, R. D. & McKee, C. F. 1976, Physics of Fluids, 19, 1130
- [7] Cowsik, R., et al., 2001, Bull. Astr. Soc. India, 29, 157
- [8] Fox, D. W., et al., 2003, Nature, 422, 284
- [9] Frail, D. A., et al. 2002, ApJ 565, 829
- [10] Ghisellini, G. & Lazzati, D. 1999, MNRAS, 309, L7
- [11] Granot, J. & Königl, A. 2003, ApJ, 594, L83
- [12] Granot, J., Nakar, E., & Piran, T. 2003, Nature, 426, 138
- [13] Granot, J. & Sari, R. 2002, ApJ, 568, 820
- [14] Harrison, F. A., et al., 1999, ApJ, 523, L121
- [15] Heyl, J. S. & Perna, R. 2003, ApJ, 586, L13
- [16] Hjorth, J., et al., 2003, Nature, 423, 847
- [17] Holland, S. T., et al., 2001, GCN 1002
- [18] Holland, S. T., et al., 2003, AJ, 125, 2291
- [19] Jha, S., et al. 2001, ApJ 554, L155
- [20] Kobayashi, S. & Zhang, B. 2003, ApJ, 582, L75
- [21] Kuulkers, E., et al., 2000, ApJ, 538, 638
- [22] Laing, R. A. 1980, MNRAS, 193, 439
- [23] Lazzati, D., Rossi, E., Covino, S., Ghisellini, G. & Malesani, D. 2002, A&A, 396, L5
- [24] Lazzati, D., et al., 2003, A&A, 410, 823
- [25] Lee, B. C., et al., 2001, ApJ, 561, 183
- [26] Mészáros, P. 2002, ARA&A, 40, 137
- [27] Nakar, E., Piran, T., & Granot, J. 2003, New Astronomy, 8, 495
- [28] Panaitescu, A. & Kumar, P. 2001, ApJ, 554, 667
- [29] Panaitescu, A. & Kumar, P. 2004, MNRAS, in press (astro-ph/0406027)
- [30] Pandey, S. B., et al., 2003, BASI, 31, 19
- [31] Rees, M. J. & Mészáros, P. 1998, ApJ, 496, L1
- [32] Rhoads, J. E. 1999, ApJ, 525, 737
- [33] Rol, E., et al., 2003, A&A, 405, L23
- [34] Sako, M. & Harrison, F. A. 2002a, GCN Circ. 1624
- [35] Sako, M., & Harrison, F. A. 2002b, Circ. 1716
- [36] Salmonson, J. D. 2003, ApJ, 592, 1002
- [37] Sari, R. 1999, ApJ, 524, L43
- [38] Sari, R. & Mészáros, P. 2000, ApJ, 535, L33
- [39] Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, ApJ, 497, L17
- [40] Stanek, K. Z., Garnavich, P. M., Kaluzny, J., Pych, W. & Thompson, I., 1999, ApJ, 522, L39
- [41] Stanek, K. Z., et al., 2001, ApJ, 563, 592
- [42] Stanek, K. Z., et al., 2003, ApJ, 591, L17
- [43] Uemura, M., et al., 2003, PASJ, 55, L31
- [44] Vreeswijk, P. M., et al., 2001, ApJ, 546, 672
- [45] Watanabe, J., et al., 2001, PASJ, 53, L27
- [46] Wijers, R. A. M. J., et al., 1999, ApJ, 523, 33
- [47] Woosley, S. E. 1993, ApJ, 405, 273
- [48] in 't Zand, J. J. M., et al. 2001, ApJ 559, 710
- [49] Zhang, B. & Mészáros, P. 2002, ApJ, 566, 712
- [50] Zhang, B. & Mészáros, P. 2003, Int. J. Mod. Phys. A, 19, 2385

Um höfundana: Guðlaugur Jóhannesson er doktorsnemi við raunvísindadeild H.Í., Gunnlaugur Björnsson er vísindamaður við Raunvísindastofnun Háskólans, Einar H. Guðmundsson er prófessor í eðlisfræði við Háskóla Íslands.

Raunvísindastofnun Háskólans
Dunhaga 3, IS-107 Reykjavík
gudlaugu, gulli, einar@raunvis.hi.is
Móttékin 2. sept. 2004