

# PRVO OTKRIĆE PROVALE GAMA-ZRAČENJA U PODRUČJU VISOKIH ENERGIJA

---

**Kirhofer, Mario**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:777369>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-12**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**MARIO KIRHOFER**

**PRVO OTKRIĆE PROVALE GAMA-ZRAČENJA U  
PODRUČJU VRLO VISOKIH ENERGIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja  
zvanja prvostupnika fizike

**Osijek, 2020. godina**

**„Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku pod vodstvom doc. dr. sc. Darija Hrupeca u sklopu sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera.“**

## **Sadržaj**

<b>Uvod.....</b>	<b>6</b>
<b>Teleskopi MAGIC.....</b>	<b>10</b>
<b>GRB 190114C.....</b>	<b>12</b>
<b>Zaključak.....</b>	<b>19</b>
<b>Literatura.....</b>	<b>20</b>
<b>Životopis.....</b>	<b>21</b>

Odjel za fiziku

## **PRVO OTKRIĆE PROVALE GAMA-ZRAČENJA U PODRUČJU VRLO VISOKIH ENERGIJA**

**MARIO KIRHOFER**

### **Sažetak**

Rad opisuje provale gama-zračenja, kozmički fenomen koji se desetljećima nakon otkrića smatrao najzagonetnijom pojavom u astrofizici. Uvodni dio rada daje povijesni pregled istraživanja provala gama-zračenja. Glavni dio rada opisuje nedavno otkriće provale gama-zračenja, događaj GRB 190114C, koji je prvi put opažen u području vrlo visokih energija Čerenkovljevim teleskopima MAGIC smještenima na kanarskom otoku La Palma.

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** provale gama-zračenja, teleskopi MAGIC, gama-zračenje vrlo visokih energija, inverzna Comptonova emisija

**Mentor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

# **FIRST DISCOVERY OF GAMMA-RAY BURSTS IN VERY-HIGH ENERGY REGION**

**MARIO KIRHOFER**

## **Abstract**

This thesis describes gamma-radiation, the cosmic phenomenon that was considered the greatest mystery in astrophysics decades after it was first discovered. Introductory part of this thesis presents insight into the history of research of gamma-ray bursts. Main part of the thesis describes recent discovery of gamma-ray burst, event named **GRB 190114C**, which was the first **GRB** ever detected in very high energy region by **MAGIC** telescopes, on La Palma, one of the Canary islands.

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** gamma-ray bursts, the MAGIC telescopes, very high energy gamma-ray bursts, inverse Compton emission

**Supervisor:** doc. dr. sc. Dario Hrupec

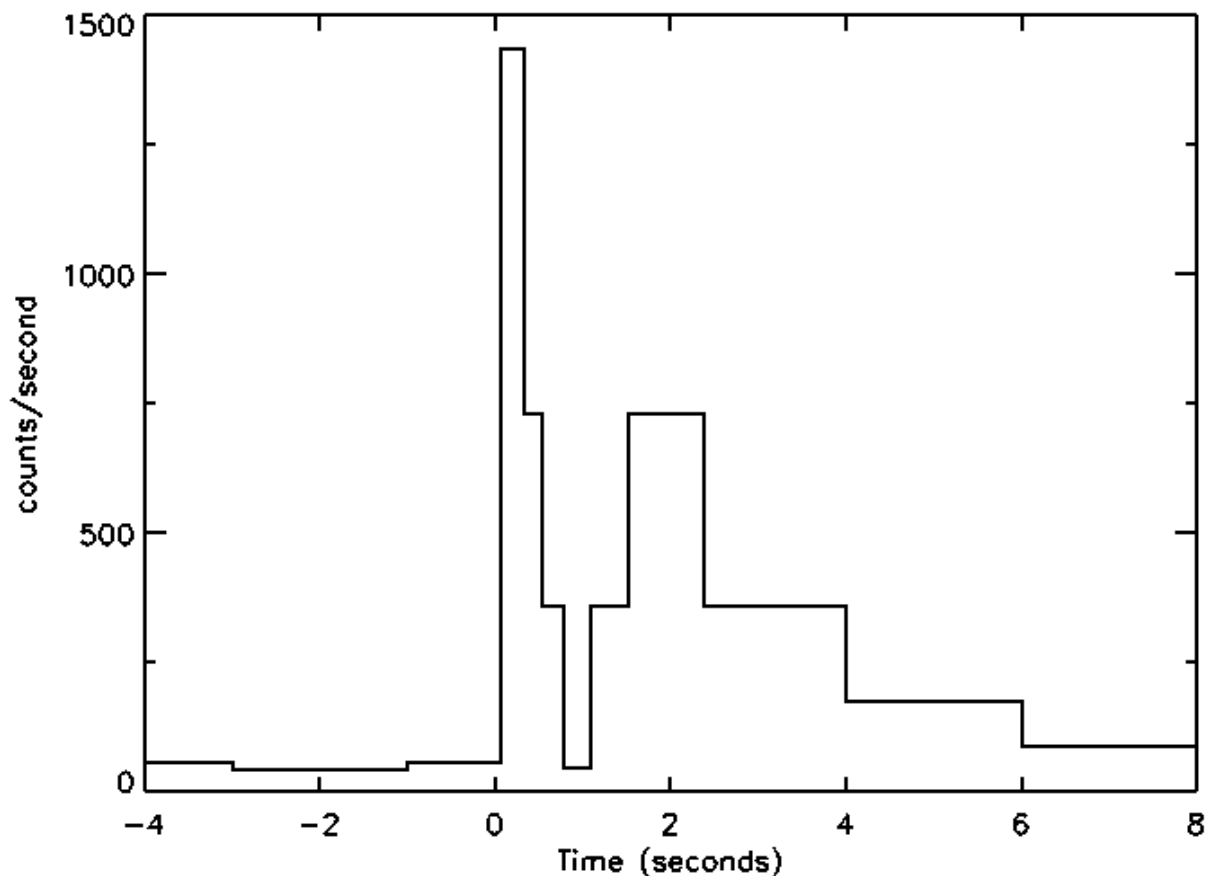
**Reviewers:**

**Thesis accepted**

## Uvod

Zakoni fizike prilično su nemilosrdni. Zakoni fizike ne diskriminiraju. U jednom trenutku zvijezda sjaji u punom sjaju i pruža svjetlost svim planetima u njenom sustavu. Milijunima godina ova zvijezda bila je glavni akter u svom djeliću galaksije. A zatim, u idućem trenutku, to joj je oduzeto. Život velike zvijezde je pri kraju, i u jednom trenutku biva iščupan iz nje. Zvijezda se urušava u samu sebe. U posljednjem „kriku“, zvijezda nasilno izbacuje materiju u svemir.

Događa se snažna eksplozija i dva mlaza gama-zraka, brzinom od 300 000 km/s, izlaze iz središta umiruće zvijezde. Putujući kroz svemir milijardama godina, gama-zrake, 14. siječnja 2019. godine dolaze do Zemlje i detektiraju ih **BAT** (*Burst Alert Telescope*) sa Neil Gehrels Swift observatorija i **GBM** (*Gamma-ray Burst Monitor*) sa satelita *Fermi*. Nakon dojave **MAGIC** (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes*) okreće se prema izvoru provala i detektira do danas najsnažniju provalu gama-zračenja, čija energija doseže TeV područje. No, vratimo se malo na početak. Prvi ovakav događaj dogodio se 2. lipnja 1967. godine. Detektirali su ga sateliti blizanci Vela 4, nazvani Vela 4A i Vela 4B, a Vela 3 satelit također je zabilježio događaj.



**Slika 1** Prva zabilježena provala gama-zraka. Horizontalna os predstavlja vrijeme trajanja signala, vertikalna os snagu signala. Signal ima dva maksimuma od koji prvi traje osminu sekunde, a drugi traje oko dvije sekunde.

Ray Klebesadel i Roy Olsen otkrili su zapis događaja sa Vela satelita u ožujku 1969. godine. I nije bilo nikakve pogreške u čitanju rezultata. Oba satelita zabilježila su nevjerojatan događaj koji je imao raspodjelu s dva vrha (dva maksimuma).

Uzmemo li u obzir da su Vela sateliti nastali u vrijeme hladnog rata, kada je strah od Sovjetskog saveza i nuklearnog naoružanja bio sveprisutan u svijetu, te da je njihova svrha bila praćenje eksplozija nuklearnog naoružanja, a signal koji su detektirali bio nemjerljivo snažniji od bilo kojeg oružja koje su ljudi u to vrijeme mogli napraviti, nema govora kako se radi o izuzetnom signalu koji nije mogao doći sa Zemlje ili iz neposredne blizine.

Roy Klebesadel je svoje otkriće prvi puta obznanio u znanstvenom časopisu *The Astrophysical Journal Letters*, 1. srpnja 1973. godine. Tada svijet prvi puta doznaje za provalu gama-zraka. Iako nije bio jedini čiji su sateliti zabilježili razne misteriozne signale i vrhove, ipak se otkriće pripisuje njemu. Tom Cline iz NASA-inog Centra za svemirske letove u Goddardu, u saveznoj državi Maryland, također je otkrio slične signale. Tom Cline je vjerovao kako su izvori tih signala eksplozije supernova. No, nastaje jedan problem. **Kako otkriti izvor tih signala?** Najjednostavnije bi bilo pogledati da li se nešto značajno dogodilo na mjestu odakle je signal došao.

Kevin Hurley, astronom sa Sveučilišta Kalifornija iz Berkleya, imao je jednostavnu ideju. U svemir treba lansirati sonde koje će, na međusobnoj udaljenosti od nekoliko desetaka milijuna kilometara, detektirati dolazak gama-zraka. Vremenske razlike u detekciji signala različitih sondi tada će omogućiti triangulaciju signala. I tako je nastala ideja **IPN-a** (*Interplanetary Network*) odnosno, međuplanetarna mreža.

Prvu međuplanetarnu mrežu znanstvenici su počeli opremiti instrumentima za detekciju GRB-a (*Gamma-Ray Bursts*). Prvi satelit prvog **IPN-a**, lansiran 1976. godine, bio je Helios-2 (uključuje satelite Helios-2A i Helios-2B), koji se priključio Vela satelitima. Njemu su se 1978. godine priključili i ostali sateliti: *Pioneer Venus Orbiter*, i sovjetski sateliti *Venera 11* i *Venera 12*, *Prognoz-7*, **ISEE-3** (*International Sun-Earth Explorer-3*), *Opservatorij Einstein*. Ovi sateliti tvorili su trokut Zemlja-Sunce-Venera, a sateliti oko Venere također su tvorili još jedan manji trokut. Dana 5. i 6. ožujka 1979. godine detektori gama-zraka, imena *Konus*, na sondama Venera 11 i Venera 12 detektirali su provale tvrdih X-zraka (X-zrake energije 5-10 keV) iz izvora koji se nalazi u zvijezdu *Dorado*. Ova mreža funkcionirala je sve do 1980. godine i otkrila je 84 provale. Iako je *Pioneer Venus Orbiter* nastavio svoju misiju sve do 1992. godine, kada se zabio u površinu Venere, cijela je mreža bila previše degradirana kako bi nastavila dalje funkcionirati.

Kada su se **PVO**-u pridružile letjelice *Ulysses* (1990.) i **CGRO** (*Compton Gamma-Ray Observatory*, 1991.) nastao je drugi **IPN**. Veliki pomak donio je **BATSE** (*Burst And Transient Source Experiment*). Do rezultata koji su dobiveni iz podataka koje poslao **BATSE** vjerovalo se u tzv. lokalnu hipotezu. Naime, znanstvenici su smatrali da provale gama-zraka dolaze iz naše galaksije, *Mliječni put*, što bi značilo da bi raspodjela provala trebala biti u „trakama“ uz rub naše galaksije. Međutim, **BATSE** je pokazao sasvim nešto drugo. Raspodjela provala sferna, a mi ju promatramo direktno iz središta. To zapravo znači da



provale dolaze iz dubokog svemira, odnosno iz drugih galaksija. To otkriće dovelo je do žučnih rasprava oko toga odakle zapravo dolaze provale gama-zraka. Iako je **BATSE** pokazao da provale dolaze iz drugih galaksija znanstvena zajednica podijelila se na dva tabora. Jedna strana i dalje je tvrdila da provale dolaze iz naše galaksije jer, u suprotnom bi značilo da su provale izuzetno visoke energije i pobornici lokalne hipoteze smatrali su da su takve energije nemoguće.



**Slika 2** S lijeva na desno: *Bohdan Paczyński, Martin Reese i Don Lamb.*

Najpoznatija i ključna rasprava o udaljenosti izvora provale gama-zraka odvila se 22. travnja 1995. S jedne strane zagovornik lokalne teorije Don Lamb, sa Sveučilišta u Chicagu, a s druge strane zagovornik kozmičke hipoteze Bohdan Paczyński.

Rasprava oko toga gdje su zapravo izvori provale gama-zračenja jednom i zauvijek riješio je talijansko-nizozemski satelit *BeppoSAX*.

Postojalo je nekoliko modela izvora gama-zračenja koji su pretpostavljali da bi svaku provalu trebalo popratiti zračenje većih valnih duljina koje nastaje kao posljedica sudaranja čestica provale i međuzvezdanog plina. To zračenje zove se naknadni sjaj (eng. *afterglow*).

Međutim, prvi pokušaji da se pronađe naknadni sjaj bili su neuspješni jer je bilo teško uhvatiti duge valne duljine neposredno nakon provale. Konačno, detektor je uspio otkriti provalu **GRB-970228** u veljači 1997. godine. Kada ga je detektor otkrio, kamera za X-zrake okrenula se prema smjeru iz kojega je došla provala gama-zraka i detektirala je naknadni sjaj. Nakon što je **GRB** nestao i nakon dubokog slikanja (eng. *deep imaging*) ustanovljeno je da se na mjestu iz kojega je došao **GRB** vidi galaksija. Iako je ustanovljeno da se tamo nalazi

galaksija, nekoliko godina bilo je potrebno ne bi li se ustanovilo koliko je ona udaljena od Zemlje, zbog toga što je galaksija jako slabog sjaja. Veliko otkriće dogodile se 8. svibnja 1997. godine, kada je BeppoSAX otkrio još jedan takav događaj nazvan **GRB-970508**. Događaj je zabilježen vrlo brzo nakon detekcije i znanstvenici su uspjeli ustanoviti da je ta galaksija od nas udaljena oko 6 milijardi godina. Godinu dana nakon toga do Zemlje je došao još jedan takav **GRB**, nazvan **GRB-980425**. Ta provala došla je od supernove iz također udaljene galaksije i znanstvenicima pružila bolji uvid u to kako nastaju provale gama-zračenja. Ova tri događaja bila su nepobitan dokaz da se provale zaista događaju u udaljenim galaksijama, a ne u našoj kako se do tada vjerovalo i pitanje udaljenosti **GRB**-ova bilo je potpuno riješeno.

## Teleskopi MAGIC (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescopes*)

Na La Palmi, jednom od otoka Kanarskog otočja, na nadmorskoj visini od oko 2200 metara, nalazi se sustav od dva teleskopa **MAGIC**. Ovaj sustav dio je opservatorija *Roque de los Muchachos*. Teleskopi MAGIC su Čerenkovljevi teleskopi s promjerom od 17 metara i površinom reflektora 236 m<sup>2</sup>.

**Zašto je MAGIC toliko važan za gama-astronomiju?** Od otkrića provale gama-zračenja, pa do danas pojavile su se razne tehnike praćenja tih događaja. Tehnika na kojoj počiva **MAGIC**, a koja je ujedno i najuspješnija, zasniva se na opažanju Čerenkovljevog zračenja.

Velika prednost koju **MAGIC** ima pred drugim teleskopima je ta što može promatrati fotone energijskog raspona od ~50 GeV pa čak do ~300 TeV. To mu omogućuju njegova velika, segmentirana zrcala i kamera koja je puno osjetljivija na svjetlost nego druge kamere u istoj kategoriji. Zrcala su sačinjena od oko 1000 manjih zrcala sačastog oblika čija je površina sačinjena od aluminijske i kvarca što omogućava refleksiju 85% upadne svjetlosti pri valnim duljinama od 300 do 600 nm. Također, svako zrcalo u sebi ima unutarnje grijanje, koje sprječava zadržavanje leda i rose. Čerenkovljeva svjetlost odbija se od zrcala i upada na kameru koja se nalazi u fokusu zrcala. Kamera je napravljena od aluminijske i u sebi sadržava heksagonsku matricu koja se sastoji od gotovo 600 fotosenzorskih ćelija koje omogućavaju da se upadno svjetlo što bolje iskoristi. Svaka ćelija u sebi sadrži svjetlosni skupljač oblika *Winstonovog konusa* (*Winston Cone*) kako bi se što bolje optimizirao prijenos svjetlosti na polusferne fotokatode. To omogućava svjetlosti da prođe kroz fotosenzor više od jednog puta, što za posljedicu ima povećanje iskoristivosti fotoelektrične konverzije. Čerenkovljeva svjetlost koja dolazi od gama-zraka jako su kratki pulsevi (1-2 ns). To se može iskoristiti kako bi se smanjile pozadinske smetnje. Kamera šalje podatke u kontrolnu kuću pomoću optičkih kablova pri tome izbjegavajući razne smetnje. U kontrolnoj kućici nalazi se elektronika za analizu zraka svjetlosti, koja digitalizira signal. Ovaj sustav, koji koristi *LabView* programski kod, omogućava praćenje astronomskih izvora i prikupljanje podataka.

Ovakav sklop uređaja omogućuje opažanje gama-zraka kroz velik raspon energije, od nekoliko GeV pa sve do velikih energija od nekoliko TeV. Ovo je važno jer nam opažanje velikog raspona daje uvid u puno kozmičkih fenomena kao što je npr. nastanak galaksije ili crnih rupa. Još jedna važna osobina koja odlikuje **MAGIC** nad ostalim teleskopima je njegova brza reakcija na provalu gama-zraka. Nakon što sateliti pošalju upozorenje na nadolazeću provalu gama zračenja, teleskop se okreće prema izvoru s najvećim odstupanjem od 20-ak sekundi i to ga čini zasada najbržim takvim teleskopom na svijetu.



**Slika 3** Teleskopi **MAGIC** na La Palmi, Kanarsko otočje, 2200 m nadmorske visine.

Iako je opažanje provala gama-zračenja jedan od glavnih ciljeva **MAGIC** teleskopa, to nije jedina njegova primjena. Zbog već spomenutog velikog energijskog raspona **MAGIC** može opažati puno drugih pojava i objekata u svemiru. Recimo, ovim teleskopima opažaju se aktivne galaktičke jezgre. Aktivna galaktička jezgra je gusto zbijeno središte galaksije koje ima izuzetno velik luminoznost, barem na jednom dijelu spektra, što bi značilo da ta luminoznost ne dolazi od zvijezda u galaksiji. Najsnažnije takve jezgre zovemo kvazari i one imaju veliki crveni pomak. Do pojave teleskopa **MAGIC**, Čerenkovljevi teleskopi mogli su opažati objekte čiji je crveni pomak bio maksimalnog iznosa  $z = 0,1$  dok **MAGIC** može opažati objekte čiji je crveni pomak čak  $z = 3$ .

**Što je crveni pomak?** Crveni pomak je pomak u spektru promatranog objekta prema duljim (crvenim) valnim duljinama. To se događa zbog Dopplerovog efekta, odnosno promjene valne duljine koja je posljedica brzog gibanja izvora valova (radiovalova ili svjetlosnih valova) u odnosu na promatrača. Edwin Powell Hubble, američki astronom, 1929. godine objavio je kako se udaljene galaksije još više udaljavaju od nas, a proporcionalno s njihovom udaljenošću povećava se i njihov crveni pomak. Pomoću Dopplerovog efekta Hubble je odredio vezu između udaljenosti galaksija i brzina kojima se one udaljavaju od nas. Naime, zaključio je da su udaljenosti galaksija i brzine kojima se one udaljavaju od nas proporcionalne. To se zove Hubbleov zakon, a matematički se zapisuje kao:

$$v = H_0 d,$$

gdje su  $v$  – brzina udaljavanja,  $H_0$  – Hubbleova konstanta,  $d$  – udaljenost galaksije

## GRB 190114C

Dana 14. siječnja 2019. godine detektiran je dugotrajni signal nazvan **GRB 190114C**. Signal su prvo detektirali uređaji **BAT** (*Burst Alert Telescope*) sa Neil Gehrels Swift observatorija i **GBM** (*Gamma-ray Burst Monitor*) sa satelita Fermi. Vrijeme trajanja  $T_{90}$ , što predstavlja interval u kojem je detektirano 90% fotona koji su pogodili detektor, bilo je 116 sekundi za **GBM** i 362 sekunde za **BAT**. Naknadni sjaj se ubrzo pojavio nakon prve detekcije. Također je izmjeren crveni pomak izvora čiji je iznos  $z = 0,4245 \pm 0,0005$ .

Detekcije sa uređaja **GBM** i **BAT** aktivirale su **MAGIC** koji je zatim promatrao izvor.

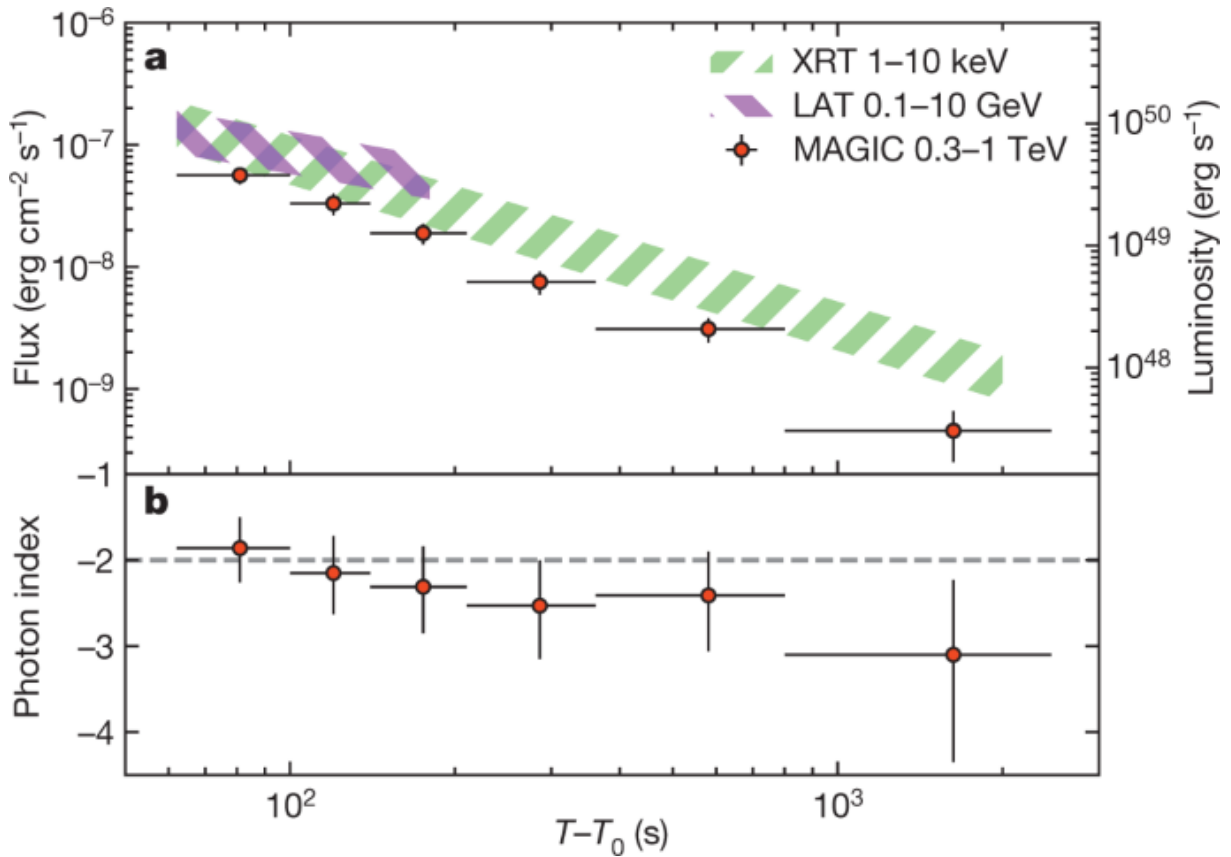
Razlog zbog kojeg ovaj izvor toliko važan je taj što je **MAGIC** detektirao gama-zrake iz provala gama-zraka u dosad najvišem energijskom području 0.2 – 1 TeV. Izvor je udaljen 4,5 milijardi svjetlosnih godina od nas. Jedna bitna pojava koju moramo uzeti u obzir kod mjerenja energije udaljenih izvora je izvangalaktička pozadinska svjetlost. Izvangalaktička pozadinska svjetlost (**EBL**, *Extragalactic Background Light*) je ukupno zračenje uzrokovano nastankom zvijezda, a doprinos daju i aktivne galaktičke jezgre. **EBL** obuhvaća sve valne duljine osim mikrovalnih, koje dominiraju u kozmičkom mikrovalnom zračenju. **EBL**, nakon kozmičkog mikrovalnog zračenja, čini drugo po redu raspršujuće zračenje, i zbog toga je važno za razumijevanje energijske ravnoteže svemira.

Još jedna pojava koja je prvi put u povijesti detektirana na **GRB 190114C** je naknadni sjaj koji je također bio u TeV području, a to je posljedica inverznog Comptonovog raspršenja. Naime, akrecijski disk (spiralni pad difuzne tvari na nebesko tijelo pri čemu raste ukupna masa toga tijela), koji se nalazi oko crne rupe, proizvodi termalni spektar. Fotoni koji dolaze iz tog spektra male su energije, ali ih ultrarelativistički elektroni, koji se nalaze u koroni, raspršuju na više energije.

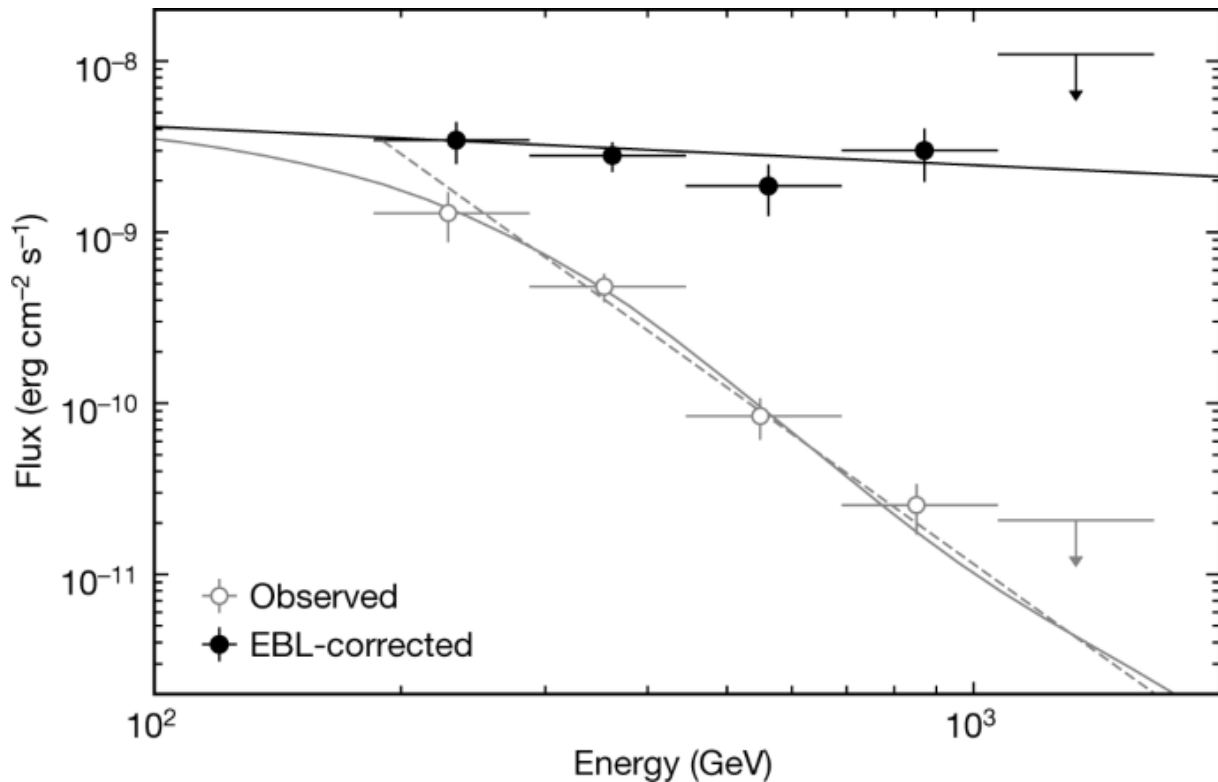
## Zračenje provale gama-zraka GRB 190114C u teraelektronvolt (TeV) području

**Slika 4** pokazuje krivulju svjetlosti za **EBL**-ispravljenu intrinzičnu energiju toka u intervalu  $\varepsilon = 0,3 - 1$  TeV. Krivulji dobro odgovara funkcija zakona potencije  $F(t) \propto t^\beta$ , gdje je  $\beta = -1,60 \pm 0,07$ . Tok se mijenja od  $F(t) \sim 5 \cdot 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $\text{erg} = 10^{-7} \text{ J}$ ) u vremenu  $t \sim T_0 + 80 \text{ s}$  na  $F(t) \sim 6 \cdot 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  u trenutku  $t \geq T_0 + 10^3 \text{ s}$ , nakon čega tok opada ispod nivoa osjetljivosti i postaje ga nemoguće detektirati. Ne zna se što je uzrok u prekidima funkcije svjetlosti, niti nepravilnim promjenama nakon monotonog opadanja. Krivulje svjetlosti keV i GeV području pokazuju slično ponašanje kao i krivulja u TeV, s tim da krivulja u GeV području sporije opada. To upućuje na to da je većina opaženog zračenja povezana sa periodom naknadnog sjaja, umjesto sa početnom provalom koja pokazuje nepravilnu promjenjivost. Unatoč tome, doprinos početnog zračenja TeV zračenju ne može se

zanemariti. Promatrani tok u  $t \sim T_0 + 80$  s odgovara luminoznosti  $L_{iso} \sim 3 \cdot 10^{49}$  erg s<sup>-1</sup> pri intervalu  $\varepsilon = 0,3 - 1$  TeV, što znači da je ovo najsjajniji izvor pri ovim energijama.



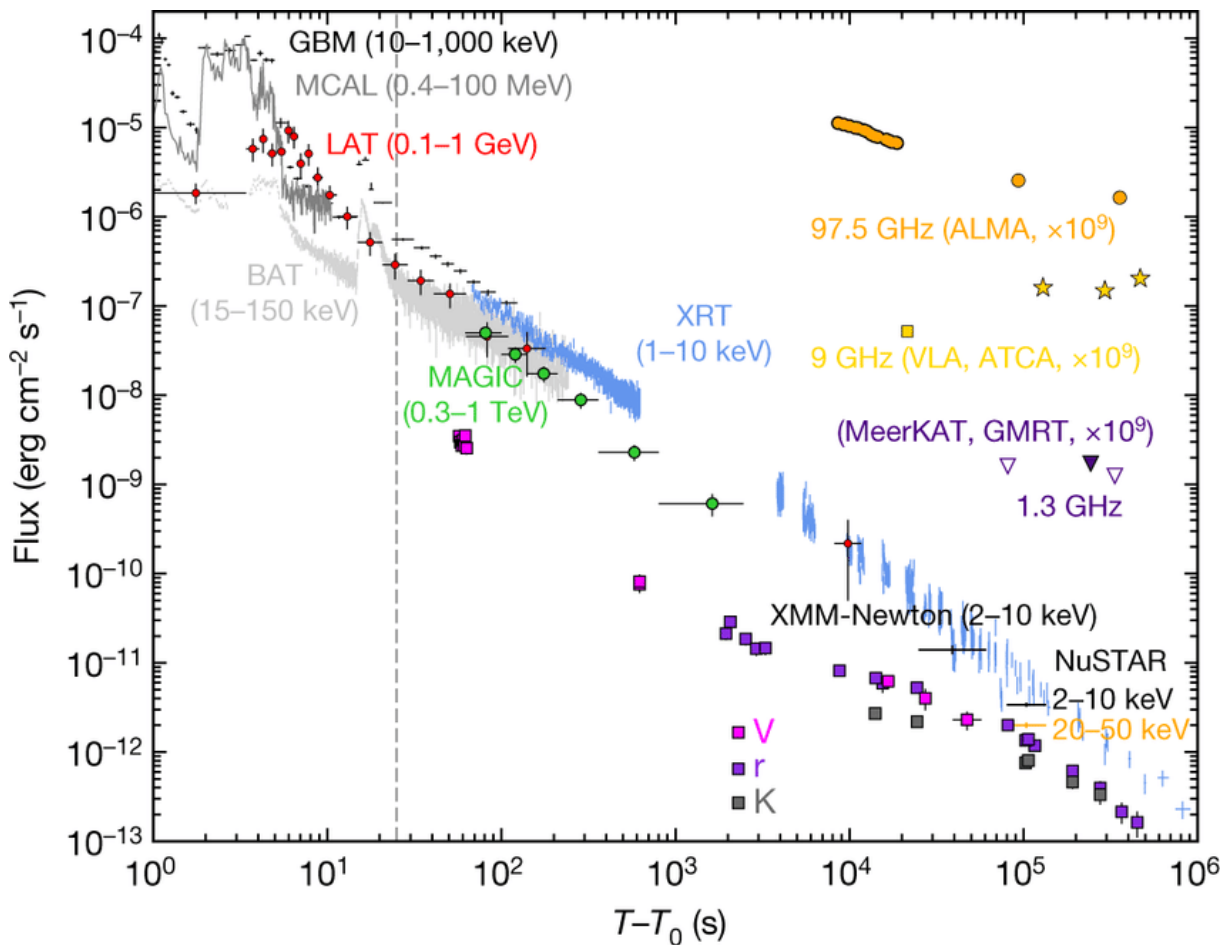
**Slika 4** Krivulje svjetlosti u keV, GeV i TeV područjima, i spektralna promjena u TeV području. Slika **a**) Lijeva os ordinata prikazuje krivulje svjetlosti u jedinicama energije, a desna strana luminoznost za **MAGIC**, **Fermi/LAT** i **Swift/XRT**. Slika **b**) Vremenska promjena zakona potencije fotonskog indeksa. Vremenska promjena dobije se kada uzmemo u obzir i vremenski ovisan diferencijalni spektar fotona, ispravljen za utjecaj **EBL**-a, čija je funkcija zakona potencije  $dF/d\varepsilon \propto \varepsilon^{\alpha_{int}}$  [3]



**Slika 5** Prosječni spektar iznad 0,2 TeV tokom perioda  $T_0 + 62$  s i  $T_0 + 2454$  s za **GRB 190114C**. Slika prikazuje dva spektra; promatrani spektar (označen crno) i **EBL**-ispravljeni prosječni unutarnji spektar toka (označen sivo), iznad 0,2 TeV, tokom vremena  $T_0 + 62$  s i  $T_0 + 2454$  s kada je **GRB 190114C** detektirao **MAGIC**. Promatrani spektar odgovara energiji 0,2 – 1 TeV ukoliko upotrijebimo jednostavan zakon potencije s fotonskim indeksom  $\alpha_{\text{obs}} = -5,43 \pm 0,22$ . Ovo je jedan od najstrmijih spektara ikad opaženih kod izvora gama-zračenja. Također, činjenica da su fotoni opaženi pri energijama  $\epsilon \sim 1$  TeV, unatoč jakom utjecaju **EBL**-a pri tim energijama, zaista je izuzetna. [3]

Najveći dio zračenja energija do GeV **GRB 190114C** najvjerojatnije je sinkrotronsko zračenje elektrona tokom naknadnog sjaja. Zračenje u TeV također se može povezati sa naknadnim sjajem. Unatoč tome, to ne može biti samo spektralni produžetak sinkrotronskog zračenja elektrona. Maksimalna energija elektrona određuje se iz ravnoteže njihove izgubljene energije, kojom dominira sinkrotronsko zračenje, i njihovog ubrzanja. Energija sinkrotronskih fotona naknadnog sjaja tada je ograničena svojom maksimalnom vrijednošću  $\epsilon_{\text{syn,max}} \sim 100(\Gamma_b/1000)$  GeV, što ovisi samo o Lorentzovom faktoru  $\Gamma_b$ , za koji je malo vjerojatno da će prijeći  $\Gamma_b \sim 1000$ . Iako je do sada detektirano nekoliko gama-zraka čija je energija bila blizu  $\epsilon_{\text{syn,max}}$ , nije bilo konkretnog dokaza da postoji zasebna spektralna komponenta. Kod ove provale čak i fotoni najniže energije, koje je detektirao **MAGIC**, imali su energiju veću od 1 TeV, što je nepobitan dokaz postojanja komponente osim sinkrotronskog zračenja kod naknadnog sjaja.

## Inverzna Comptonova emisija duge gama-provale

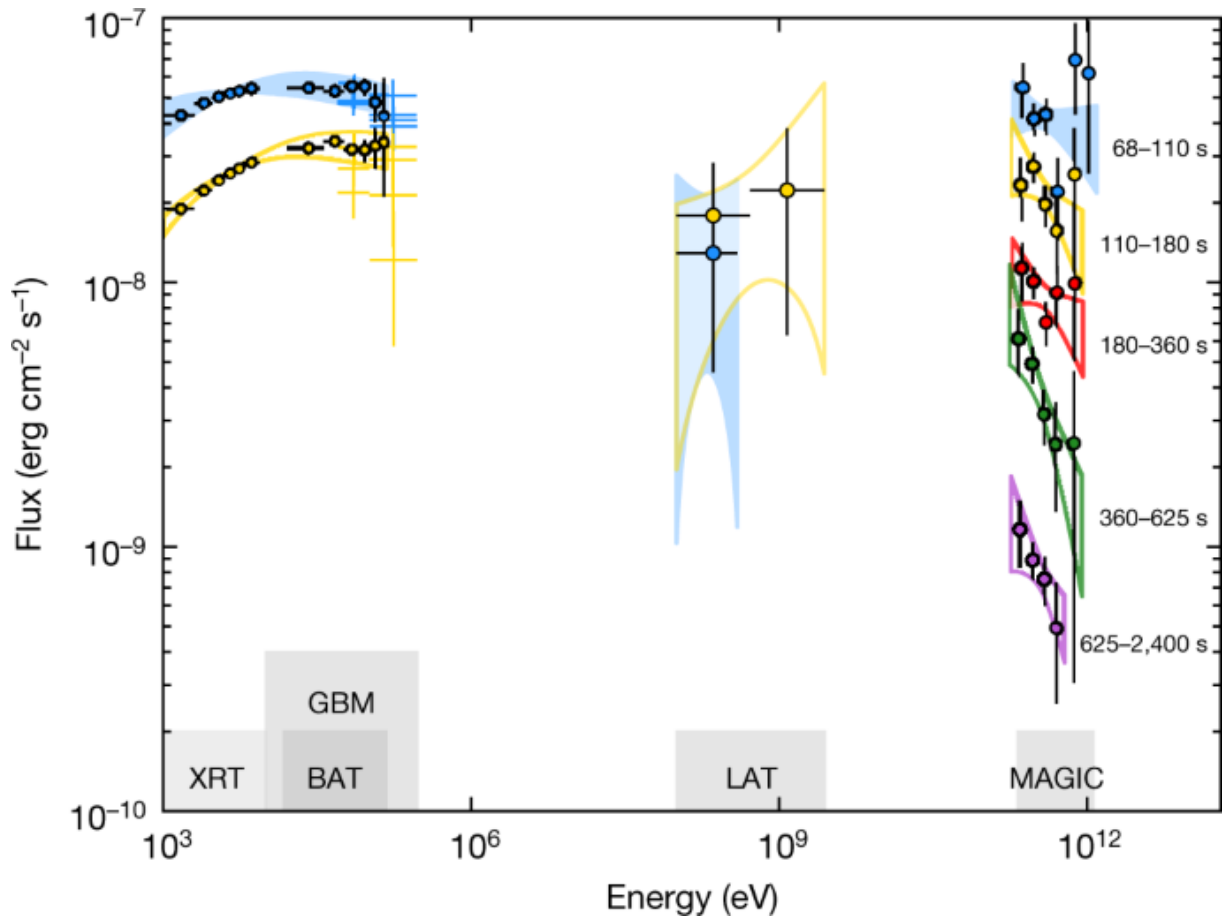


**Slika 6** Krivulje svjetlosti više valnih duljina **GRB 190114C**. Vertikalna isprekidana crta predstavlja kraj prvotnog dijela zračenja (sama provala gama-zračenja). Na podatkovnim točkama u grafu iscrtane su dvije linije; vertikalne predstavljaju pogreške (odstupanja) u toku, dok horizontalne predstavljaju vrijeme trajanja promatranja. [2]

Na slici 7 prikazana su raspodjele spektralnih energija koje je detektirao **MAGIC**, a samo trajanje zračenja koje je detektirao **MAGIC** podijeljeno je na pet dijelova. Za prva dva intervala, vidimo i trake za GeV i X-zrake. Tokom prvog intervala sinkrotrona komponenta naknadnog sjaja ima vrh u području X-zrake. Na višim energijama raspodjela spektralne energije je opadajuća funkcija energije. Naprotiv, tok iznad 0,2 TeV ukazuje na promjenu spektra prema tvrđem spektru (što znači većem eksponentu). To znači da novootkriveno TeV zračenje nije samo produžetak poznatog sinkrotrona zračenja naknadnog sjaja, nego dosad još neviđena, odvojena komponenta. Dugo trajanje i zakon potencije opadanja zračenja daju naslutiti kako postoji uska povezanost između zračenja u području TeV i zračenja naknadnog sjaja.

Za to je najvjerojatnije odgovorno sinkrotrono samo-Compton zračenje (*synchrotron self-Compton radiation*, **SSC**). Ista populacija elektrona odgovorna je za inverznu Comptonovu emisiju. **SSC** je još davno bio predviđen za naknadni sjaj iako se značaj **SSC**-a nije mogao kvantitativno odrediti.

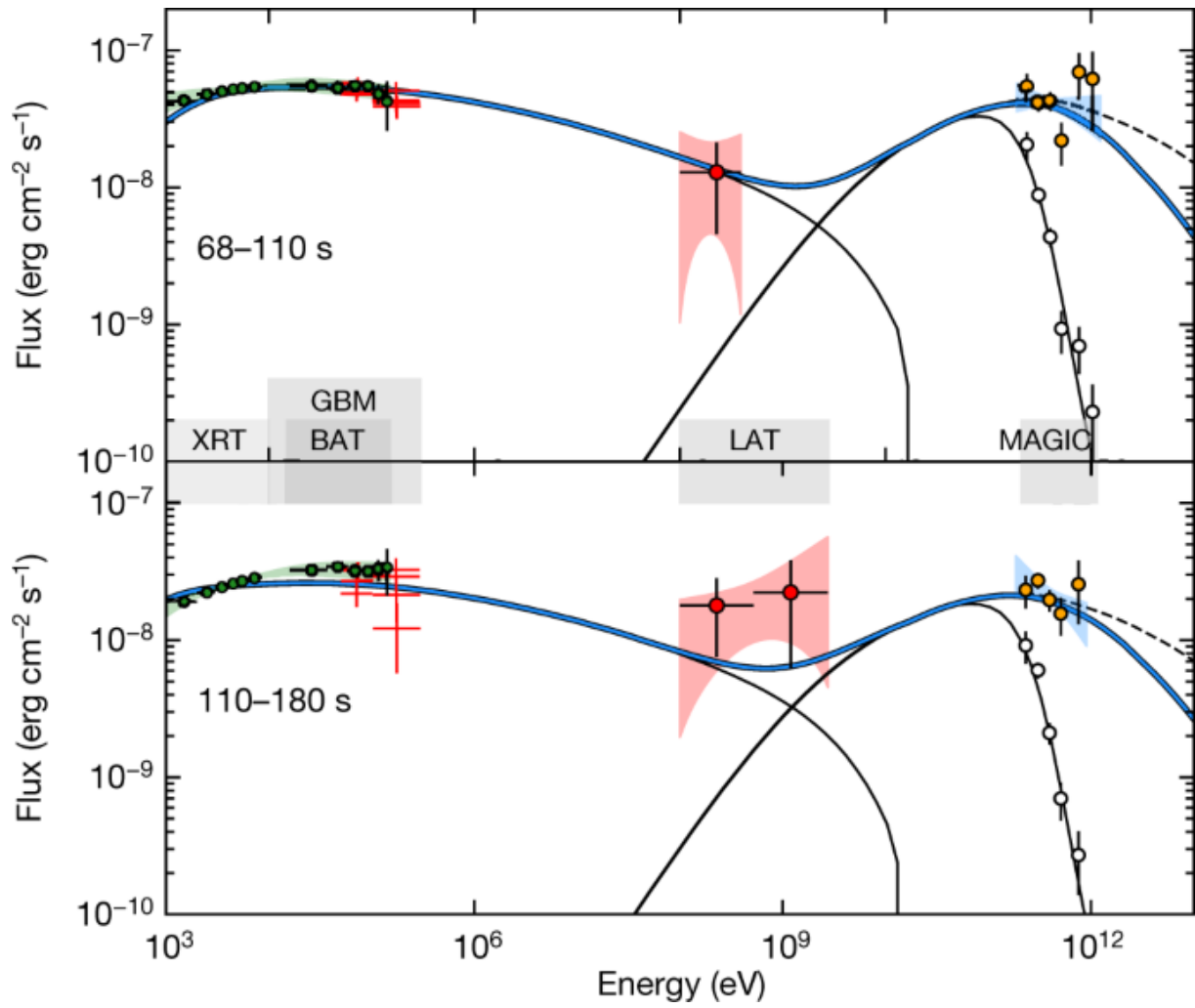




**Slika 7** Na ovoj slici možemo vidjeti više traka spektra u vremenskom intervalu 68 - 2400 s. Ukupan vremenski interval podijeljen je na 5 manjih. Također se u obzir uzima opadanje uzrokovano **EBL**-om. [2]

Sa slike 8 možemo vidjeti da je energija udarnog vala usporediva sa energijom koja se oslobodi u obliku radijacije tokom početne faze. To bi značilo da je početna radijacija morala raspršiti i izračiti pola od svoje energije početnog snopa, dok je druga polovica stvorila naknadni sjaj. Također, možemo zaključiti kako je uravnotežena energija između sinkrotronih i **SSC** komponenata. Procjenjuje se kako je energija sinkrotronih i **SSC** komponenata je  $\sim 1,5 \cdot 10^{52}$  erg i  $\sim 6,0 \cdot 10^{51}$  erg u vremenskom intervalu 68 – 110 s i  $\sim 1,3 \cdot 10^{52}$  erg i  $\sim 5,4 \cdot 10^{51}$  erg u vremenskom intervalu 110 – 180 s. To zapravo znači da je dosadašnjim proučavanjima **GRB**-ova nedostajao veliki dio energije koja se zrači tokom faze naknadnog sjaja, a koji je bitan za razumijevanje provala.

Vrijednosti parametara faze naknadnog sjaja koje se mogu dobiti iz modeliranja u vrijednostima su tipičnim za širokopojasna (radio u GeV) proučavanja naknadnog sjaja **GRB**-a. To zapravo upućuje da je **SSC** u **GRB**-u normalan proces za koji nisu potrebni posebni uvjeti, a to znači da bi se **SSC** mogao detektirati i u drugim **GRB**-ovima.



**Slika 8** Slika prikazuje modeliranje širokopojasnog spektra u vremenskim intervalima 68 – 110 s i 110 – 180 s. [2]



## **Zaključak**

Provale gama-zračenja otkrivene su prije više od šest desetljeća. Iako se od njihovog otkrića puno vremena uložilo na njihovo proučavanje, na rasprave oko toga što su izvori tih provala i koja je njihova stvarna udaljenost, čak i danas one ostaju velika nepoznanica.

Otkrićem njihovih udaljenosti, kao i činjenice da interakcijom sa kozmičkim plinom ostavljaju naknadni sjaj (*afterglow*) dobivamo puno bolju sliku o tome kako nastaju i koliko su zapravo to snažne eksplozije. I jedna stvar je prilično sigurna; provale gama-zračenja rezultat su urušavanja zvijezda u crne rupe. I iako same provale ne stvaraju u svemiru nove elemente niti na jedan način ne ostavljaju materiju za sobom, nisu ništa manje važne od ostalih pojava u svemiru.

## **Literatura**

[1] Schilling, G., *Flash! The hunt for the biggest explosions in the universe*, Cambridge, University Press, 2002.

[2] MAGIC Collaboration, Observation of inverse Compton emission from a long gamma-ray burst. // *Nature*, 575, str. 459-463, 2019.

[3] MAGIC Collaboration, Teraelectronvolt emission from the  $\gamma$ -ray burst GRB 190114C. // *Nature*, 575, str. 455-458, 2019.

[4] Lorenz E., Martinez M., The Magic telescope, *Astronomy & Geophysics*, Volume 46, Issue 6, December 2005, stranice 6.21–6.25

Mario Kirhofer rođen je 3. rujna 1991. godine u Osijeku. Pohađao je OŠ „Grigor Vitez“ u Osijeku. 2006. godine upisao je III. gimnaziju također u Osijeku. Srednju školu završava 2010. godine, a iste te godine upisuje Odjel za fiziku na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.