

Małe teleskopy w badaniu błysków gamma

Grzegorz Wrochna

wrochna@fuw.edu.pl

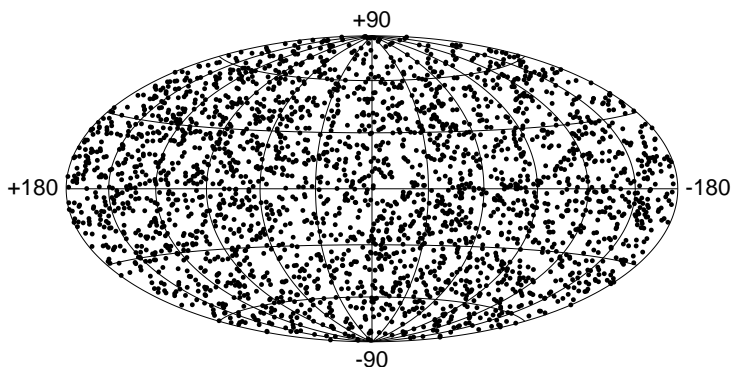
Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa

1 Historia badań błysków gamma

Badanie błysków gamma (*ang.* Gamma Ray Bursts - GRB) to dziedzina, w której małe, a nawet bardzo małe teleskopy odniosły chyba najbardziej spektakularne sukcesy i to na frontowej linii nauki. Te niezwykle zjawiska stanowią jedną z największych zagadek astrofizyki ostatnich lat. Są to krótkie (0.01-100s) impulsy promieniowania gamma dochodzące z punktowych źródeł na sferze niebieskiej. Pierwszy odkryto w 1967 przy pomocy amerykańskiego satelity wojskowego VELA poszukującego promieniowania gamma powstającego w wyniku ewentualnych prób jądrowych w kosmosie [1].

Przez lata spierano się o pochodzenie tych błysków. Proponowano wiele hipotez na temat mechanizmów ich powstawania. Wymieniano źródła zarówno galaktyczne jak i pozagalaktyczne. Przełomu dokonał detektor BATSE na satelicie CGRO. Zaobserwował on niemal 3000 błysków gamma i pokazał, że mają rozkład izotropowy (rys. 1, co stanowiło mocny argument za pochodzeniem pozagalaktycznym [2]. Wniosek ten przypieczętowały obserwacje optycznych poświat, które umożliwiły pomiar przesunięcia ku czerwieni i wyznaczenie odległości [3].



Rysunek 1: 2074 GRB obserwowanych przez BATSE we współrzędnych galaktycznych [2].

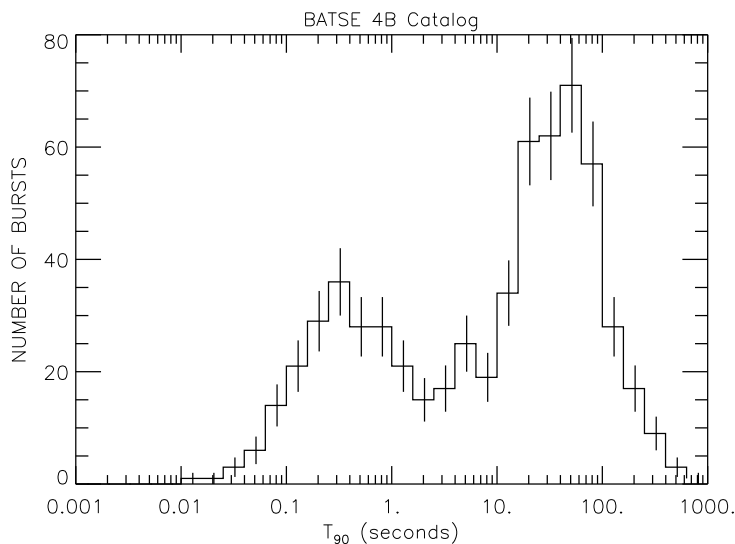
Badania były kontynuowane przez m.in. satelity BeppoSAX, HETE, Integral i Swift, z których trzy ostatnie są ciągle aktywne. Informacja o zaobserwowanym błysku jest w ciągu sekund rozsyłana do naziemnych obserwatoriów przy pomocy sieci GCN (*ang.* GRB Coordinate Network). Dzięki temu zaobserwowano, że błyskom gamma towarzyszą poświaty w całym zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego od fal radiowych, aż do fotonów o energiach rzędu TeV.

2 Natura błysków gamma

Udało się wyodrębnić klasę błysków powtarzalnych, zwanych Soft Gamma Repeaters (SGR). Stwierdzono, że ich źródłem są magnetyary - gwiazdy neutronowe o gigantycznych polach magnetycznych rzędu 10^{11} T. Obiekt taki jest mocno spłaszczony na skutek szybkiej rotacji (okres rzędu sekund). Wypromieniowując energię zwalnia i zmienia kształt na bardziej kulisty. Powoduje to pęknięcie i przebudowę skorupy neutronowej co wywołuje "trzęsienia gwiazdy" i silne burze magnetyczne, dostrzegane przez nas właśnie jako błyski SGR.

Wspólną cechą pozostałych błysków gamma jest ich jednorazowy charakter. Pomiar przesunięcia ku czerwieni umożliwił wyznaczenie odległości do ok. 50 z nich. Rekordzista ma $z = 4.5$, co odpowiada 13 mld lat świetlnych. Energię eksplozji będących źródłami błysków gamma pierwotnie oceniano na 10^{53} ergów, zakładając izotropową emisję. Obserwacje załamania krzywych blasku poświat pozwoliły jednak wydedukować, że energia jest emitowana w wąskich dżetach, co obniża oszacowanie całkowitej emisji do 10^{51} ergów. Ciągłe jednak jest to energia gigantyczna, porównywalna z całkowitą energią wyemitowaną przez gwiazdę taką jak Słońce w ciągu całych 10 mld lat swojego istnienia.

Poza SGR wyodrębniono dwie klasy błysków gamma: dłuższe, o czasie trwania od 2 do kilkuset sekund i krótsze, trwające od 0.01 s do ok. 2 s (rys. 2) Krótsze błyski mają jednocześnie nieco twardsze widmo. Zaobserwowano kilka przypadków koincydencji długiego GRB z wybuchem supernowej. Przemawia to za hipotezą, że błysk gamma jest wynikiem zapaści masywnej gwiazdy, zwanej w zależności od szczegółów modelu kolapsarem lub hipernową. Zapaść taka kończyłaby się nie jak w przypadku zwykłej supernowej powstaniem gwiazdy neutronowej, ale czarną dziurą. Dobry przegląd teorii na ten temat podaje praca [4]. Nie brak też bardziej egzotycznych hipotez, jak choćby powstanie gwiazdy kwarkowej [5].



Rysunek 2: Rozkład czasu trwania GRB obserwowanych przez BATSE [2].

Znacznie mniej wiadomo o błyskach krótkich, gdyż jak dotąd nie udało się zaobserwować optycznej poświaty towarzyszącej żadnemu z nich. Najpopularniejszą hipotezą jest połączenie się dwóch gwiazd neutronowych w wyniku którego powstaje czarna dziura. Spekuluje się też, że krótkie błyski mogą być gigantycznymi wybuchami SGR z innych galaktyk na tyle odległych, że widzimy tylko te największe wybuchy, zdarzające się raz na tysiące lat. Taką możliwość zasugerował potężny wybuch SGR 1806-20, który zaobserwowano 27 grudnia 2004 r.

3 Wielkie odkrycia małych teleskopów

Dotychczas na ponad 3000 zaobserwowanych błysków gamma zaledwie kilkadziesiąt udało się dostrzec w świetle widzialnym. Przyczyną jest szybki spadek jasności poświaty. Pierwsze z nich zaobserwowano największymi teleskopami o kilkumetrowej średnicy jak Keck [3] w kilka dni po błysku gamma, kiedy to poświata była już znacznie słabsza niż 20 magnitudo. Tyle czasu zajęło przeanalizowanie danych w celu określenia pozycji i odszukanie obiektu. Przełomem było urochomienie sieci GCN, która rozsyłała alerty o błyskach w czasie sekund. Jednak ograniczona precyzja określania położenia i duża bezwładność wielkich teleskopów nie pozwalały na wykorzystanie w pełni szybkości dostarczanej informacji. Stało się oczywiste, że poszukiwanie optycznych odpowiedników błysków gamma to zadanie dla małych, automatycznych teleskopów o stosunkowo dużym polu widzenia.

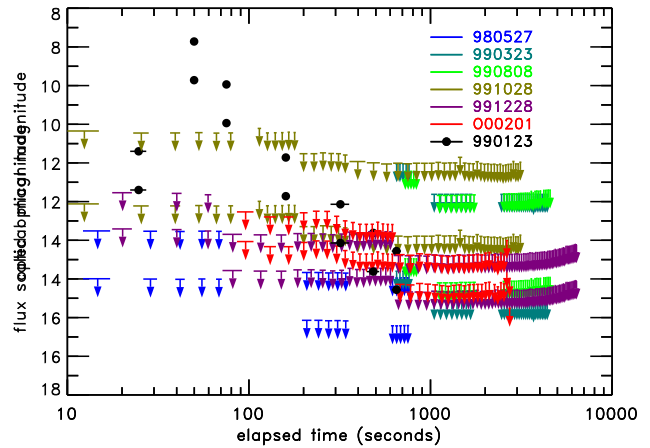
Projekty takich urządzeń powstały już w 1974 r., ale nie doczekały się realizacji. Pierwszymi urządzeniami, które udało się zbudować były Explosive Transient Camera (ETC) i towarzyszący jej Rapidly Moving Telescope (RMT) uruchomione w 1984 r na MIT. ETC był zespołem 16 kamer CCD wyposażonych w obiektywy o średnicy $d=25$ mm pokrywające łącznie 45% nieba. Błyski rozpoznane przez ETC miały być dalej obserwowane przez RMT o aperturze $d=180$ mm. Niestety, projekt zakończył się fiaskiem, gdyż nie udało się stworzyć oprogramowania odrzucającego skutecznie błyski powodowane przez szumy elektroniki, promienie kosmiczne, samoloty, itp.

W latach dziewięćdziesiątych powstają dwa projekty: LOTIS w Livermore i ROTSE w Los Alamos. Oba są wyposażone w zestawy 4 kamer CCD z obiektywami o średnicy 10 cm (rys. 3). ROTSE przypadła w udziale najsłynniejsza w historii badań GRB obserwacja. 23 stycznia 1999 r zarejestrował on optyczny błysk towarzyszący GRB 990123 (rys. 4) o jasności sięgającej 8.6 magnitudo! [6] Było to możliwe dzięki temu, że obserwacje rozpoczęto zaledwie kilkadziesiąt sekund po samym błysku gamma.

Równie ważnym odkryciem było zaobserwowanie GRB 030329 w koincydencji z supernową SN 2003 dh. Pierwszych obserwacji poświaty GRB 030329 dokonały dwa japońskie teleskopy w 1 h 15 min po GRB, kiedy miała



Rysunek 3: Aparatura ROTSE.



Rysunek 4: Krzywa blasku GRB 990123.

ona jasność 13 magnitudo. Teleskop w Riken o średnicy 25 cm należał do grupy współpracującej z satelitą HETE. Teleskop w Kyoto, o średnicy 30 cm, to typowy szkolny teleskop edukacyjny.

Drugiej w historii obserwacji optycznej błysku jeszcze w czasie trwania emisji gamma dokonał teleskop RAPTOR o średnicy 40 cm. Zaobserwował on obiekt w widmie optycznym na kilkadziesiąt sekund **przed** zasadniczym błyskiem gamma GRB 041219. Było to możliwe, gdyż błysk gamma był poprzedzony wyjątkowo silnym prekursorem, który wyzwolił tryger satelity Swift. Obserwacja ta jest szczególnie ważna, gdyż stanowi argument na rzecz niektórych modeli przewidujących emisję optyczną jeszcze przed emisją gamma [8]. Istnienie prekursora może wskazywać na dwufazowy charakter zjawiska [5]. Tym większego znaczenia nabiera więc możliwość jak najwcześniejszych obserwacji optycznych GRB jeszcze w czasie, a nawet przed rozpoczęciem emisji gamma.

4 Eksperyment " π of the Sky"

4.1 Koncepcja eksperymentu

W ostatnich latach powstało cały szereg niewielkich ($d \leq 40$ cm) teleskopów przeznaczonych do poszukiwania optycznych odpowiedników błysków gamma [7]. Umieszczone na sterowanych automatycznie montażach w ciągu kilkunastu sekund po alercie GCN mogą rozpocząć obserwacje wskazanego miejsca. Takie rozwiązanie ma jednak poważną wadę. Nie umożliwia ono obserwacji w momencie rozpoczęcia błysku gamma, ani tym bardziej w chwilach poprzedzających.

Błyski zachodzą jednak w zupełnie przypadkowych miejscach i nie sposób przewidzieć gdzie wystąpi następny. Aby móc zarejestrować błysk optyczny jeszcze przed błyskiem gamma należy bez przerwy monitorować możliwie duży obszar nieba. Jest to koncepcja zupełnie różna od tradycyjnej i wymaga innego sprzętu i oprogramowania. Próbę jej praktycznej realizacji stanowi eksperyment " π of the Sky".

Aparatura " π of the Sky" ma się składać z dwóch modułów po 16 kamer każdy, umieszczonych w odległości rzędu 100 km. Jednoczesna obserwacja tego samego fragmentu nieba z dwóch miejsc umożliwi pomiar paralaksy błysku i odrzucenie błysków powodowanych np. przez refleksy światła słonecznego od sztucznych satelitów. Kamery wyposażone będą w profesjonalne obiektywy Canon EF o ogniskowej $f = 85$ mm i aperturze $d = 71$ mm ($f/d = 1.2$). Sensor CCD o rozdzielczości 2000×2000 pikseli przy rozmiarze piksela $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ pokryje obszar $20^\circ \times 20^\circ$. Cały system pokryje więc 2 steradiany sfery niebieskiej, co odpowiada polu widzenia detektora gamma satelity Swift. Planowany czas ekspozycji 10 s umożliwi zasięg do 12 magnitudo na pojedynczych klatkach i do 14^m na sumach 20 klatek.

Projekt realizowany jest przez Instytut Problemów Jądrowych im. A. Sołtana Centrum Fizyki Teoretycznej PAN i Instytut Fizyki Doświadczalnej UW z dużym udziałem studentów i doktorantów z tych instytucji oraz Politechniki Warszawskiej i Uniwersytetu Kard. St. Wyszyńskiego. Dużego wsparcia udzielił zespołowi prof. Bohdan Paczyński. Przy realizacji projektu obficie korzystano też z pomocy i doświadczeń dr hab. Grzegorza Pojmańskiego zdobytych w projekcie ASAS [9].

4.2 Prototyp na Las Campanas

Od lipca 2004r w Las Campanas Observatory w Chile działa prototyp " π of the Sky"(rys. 5). Składa się on z dwóch kamer CCD obserwujących wspólny fragment nieba. Kamery o parametrach zbliżonych do docelowych wyposażone są obiektywy Carl Zeiss Planar T* o ogniskowej $f = 50$ mm i światłosił $f/d = 1.4$. Dają one pole widzenia $33^\circ \times 33^\circ$, a zasięg $10^m - 11^m$ na pojedynczych klatkach i $12^m - 13^m$ na sumach 20 klatek przy ekspozycji 10s. Kamery zaprojektowano we własnym zakresie, ze względu na specyficzne wymagania projektu. Szczególnym wyzwaniem była konstrukcja migawek wytrzymujących 10^7 otwarć. Kamery umieszczone są na wspólnym montażu paralaktycznym sterowanym komputerowo. Jest to ulepszona konstrukcja montażu typu ASAS [9].



Rysunek 5: Kamery " π of the Sky" i instalacja ASAS / " π of the Sky" na Las Campanas.

Cały system działa autonomicznie, według generowanego automatycznie programu. Przez całą noc kamery śledzą pole widzenia satelity HETE lub Integral. Jeżeli nadejdzie alert GCN poza aktualnym polem widzenia, kamery natychmiast nakierowywane są na cel. Wieczorem i nad ranem dokonywany jest przegląd całego nieba (po 3 klatki na pole). Praca systemu kontrolowana jest z Warszawy przez Internet. System sam monitoruje różne parametry pracy jak częstość odświeżania plików statusu czy liczba rozpoznawanych gwiazd. W przypadku stwierdzenia odchyłek od normy operatorzy powiadamiani są przez e-mail i SMS.

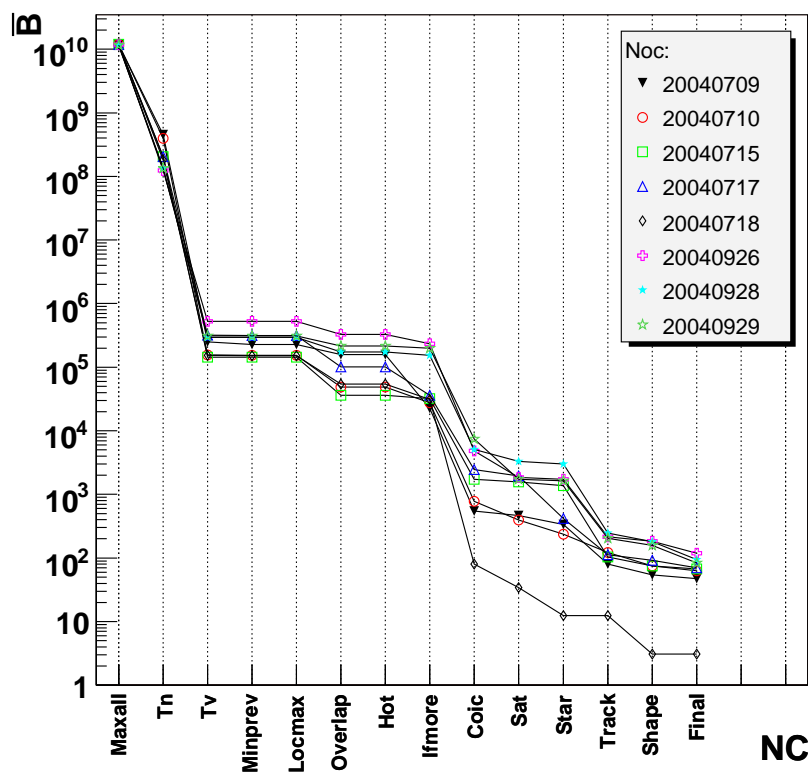
4.3 Przetwarzanie danych

Oba komputery działają pod kontrolą systemu operacyjnego Linux. Oprogramowanie zostało w większości napisane w C++. Składa się ono z szeregu modułów odpowiadających za poszczególne urządzenia: montaż, kamery, zbieranie i analiza danych, komunikacja z GCN, itd. Działanie modułów jest koordynowane przez moduł zarządzający piman, który rozdziela zadania i kontroluje przepływ informacji między modułami. Komunikacja między modułami została rozwiązana przy użyciu technologii CORBA. Programy analizujące zdjęcia używają bibliotek cfitsio i fitsio. Algorytmy do poszukiwania błysków i szybka fotometria zostały stworzone samodzielnie na potrzeby projektu, natomiast dokładna fotometria i astrometria zostały zaadoptowane z eksperymentu ASAS.

Każdej nocy kamery wykonują 2000-3000 ekspozycji każda. Na każdej klatce rozpoznawanych jest do 20 000 gwiazd. Łącznie daje to 10^8 pomiarów fotometrycznych na noc. Strumień przetwarzanych danych wynosi 80 MB/minutę, czyli prawie 50 GB na dobę. Zdjęcia są natychmiast analizowane w pamięci komputera pod kątem poszukiwania błysków o czasie narastania rzędu sekund. Następnie są tymczasowo zapisywane na dysku i mogą być ponownie przeanalizowane w przypadku przyścia spóźnionego alertu z sieci GCN. W przypadku wykrycia przez system kandydata na błysk optyczny, wycinki rozmiarze 100×100 pikseli z ± 7 klatek sprzed i po błysku są zapisywane na stałe na dysku. W trakcie prowadzenia obserwacji, zapisane na dysku klatki są kopiowane na drugi komputer, który sumuje kilka kolejnych klatek i poszukuje błysków o czasie narastania rzędu minut. W czasie dnia, tymczasowo zapisane na dysku klatki są analizowane ponownie. Na komputerze pierwszym wykonywana jest szybka fotometria pojedynczych klatek, która może być później użyta do badania szybko zmiennych obiektów. Natomiast na drugim komputerze wykonywana jest dokładna fotometria na sumach 20 klatek, która może być użyta do badania gwiazd zmiennych. Wyniki dziennych analiz są przechowywane na dysku. Z około 50 GB danych (około 30 GB po kompresji LZA) zebranych podczas nocy, na stałe zostaje zapisanych około 2 GB. Po 2-3 miesiącach 200 GB dysk przenośny z wynikami jest zastępowany pustym i zabierany do Warszawy celem dalszej analizy.

4.4 Rozpoznawanie błysków

Kluczowym elementem systemu jest algorytm rozpoznawania błysków. Zastosowano tutaj metodę wielostopniowego trygera zaczerpniętą z eksperymentów fizyki cząstek. Cały algorytm podzielono na szereg coraz to bardziej skomplikowanych kroków. Każdy stopień na za zadanie zredukować strumień danych odrzucając nieinteresujące przypadki. Ilustruje to rys. 6 na którym przedstawiono strumień danych po kolejnych stopniach.



Rysunek 6: Liczba przypadków \bar{B} po kolejnych poziomach selekcji, dla kilku wybranych nocy (znormalizowana do 10 godzin pracy)

Algorytm rozpoczyna działanie na pojedynczych pikselach (Maxall) aplikując filtr wyostrzający i wyszukując gwiazdy (Tn). Następnie porównuje bieżącą klatkę z kilkoma poprzednimi, poszukując obiektów, których nie było na poprzednich klatkach (Tn). Potem następuje szereg cięć "kosmetycznych", odrzucających efekty detektorowe. Następnie odrzuca się duże błyski powodowane przez np. samoloty (Ifmore). Po tym etapie większość fałszywych przypadków to promienie kosmiczne, które są łatwo eliminowane przez żądanie koicydnencji błysków z dwóch kamer (Coic). Jest to najistotniejszy krok redukujący tło o trzy rzędy wielkości.

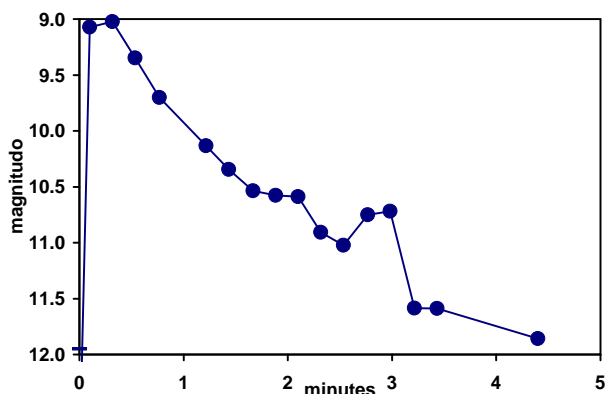
Najbardziej uciążliwym rodzajem tła są odbicia światła słonecznego od sztucznych satelitów. Przypadki takie eliminowane są na dwa sposoby: poprzez dopasowanie torów do błysków z pojedynczej lub z kilku różnych klatek (Track), jak również porównując czas i położenie błysków z wyliczoną pozycją satelitów z bazy danych (Sat). Co wieczór budowana jest automatycznie aktualna baza danych elementów orbitalnych satelitów poprzez połączenie kilku baz danych, dostępnych w internecie.

4.5 Dotychczasowe wyniki

W czasie 11 miesięcy pracy system wykrył ok. 100 błysków nieznanego pochodzenia widocznych przez obie kamery, ale tylko na jednej klatce. Żaden z nich nie został potwierdzony przez niezależne obserwacje. Nie da się wykluczyć, że błyski te spowodowane były refleksami od satelitów nie znalezionych w dostępnych bazach danych.

Zaobserwowano też 4 błyski widoczne na conajmniej dwóch klatkach. Jeśli byłyby spowodowane przez satelity, to musiałyby się one znajdować na orbicie znacznie wyższej niż geostacjonarna. W przeciwnym przypadku byłyby widoczny ich ruch. Jednak tak wysoka orbita jest trudna do pogodzenia z dużą jasnością błysku. Jest więc wysoce prawdopodobne, że są to rozbłyski rzeczywistych obiektów astrofizycznych.

W jednym przypadku jednoznacznie zidentyfikowano pojaśnienie gwiazdy rozbłykowej CN Leo. W ciągu sekund gwiazda pojaśniała od 14^m (dane ASAS) do 9^m, a następnie stopniowo przygasała w ciągu kilku minut (rys. 7). Obserwacja ta potwierdza, że system zdolny jest do automatycznego rozpoznawania nagłych błysków.



Rysunek 7: Rozbłysk CN Leo obserwowany 2.04.2005 o 1:13:42 UT.

Od 1.07.2004 do 7.06.2005 satelity zaobserwowały 68 błysków gamma, których pozycję udało się wyznaczyć. Wyniki obserwacji przez "π of the Sky" podsumowuje tabela 1.

Tablica 1: GRB wykryte przez satelity w czasie pracy "π of the Sky"

1	aparatura wyłączona
14	poza zasięgiem (półkula północna)
30	w ciągu dnia
6	pod horyzontem
3	chmury
14	poza polem widzenia
2	w polu widzenia
70	RAZEM

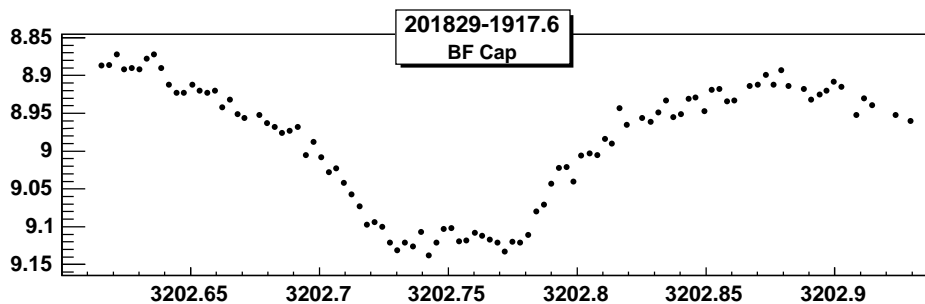
Do błysków poza polem widzenia system podążył po otrzymaniu alertu. Nie udało się zaobserwować żadnego błysku optycznego towarzyszącego GRB. Wyznaczono limity na jasność ewentualnych błysków. Limity, które były wcześniejsze niż innych obserwatorów opublikowano w cyrkularzach GCN. Podsumowuje je tabela 2. Duże opóźnienia w przypadku GRB 040916B i GRB 041217 wynikają z późnego czasu rozesłania alertu przez sieć GCN.

Tablica 2: Limity na optyczne odpowiedniki GRB wyznaczone przez "π of the Sky"

rozbłysk	przed	w czasie	po	publikacja
GRB 040825A	$> 10^m$ dla $t < t_0 - 11$ s	$> 12^m$ dla $t = t_0$	$> 9.5^m$ dla $t > t_0 + 7$ s	GCN 2677
GRB 040916B			$> 13.0^m$ dla $t > t_0 + 17$ min	GCN 2725
GRB 041217			$> 11.5^m$ dla $t > t_0 + 30$ min	GCN 2862
GRB 050123	$> 12^m$ dla $t < t_0 - 108$ min			GCN 2970
GRB 050326	$> 11^m$ dla $t < t_0 - 33$ min			GCN 3146
GRB 050412	$> 11.5^m$	$> 11^m$	$> 11.5^m$	GCN 3240
GRB 050607			$> 12.5^m$ dla $t > t_0 + 60$ s	GCN 3526

Poza poszukiwaniem błysków, system "π of the Sky" wykonuje standardową fotometrię wszystkich gwiazd w polu widzenia. Przykładową krzywą blasku z jednej nocy pokazuje rys. 8. Trwają prace nad umieszczeniem zebranych pomiarów w bazie danych, co umożliwi ich kompleksową analizę.

Ponadto aparatura "π of the Sky" rejestruje szereg innych ciekawych zjawisk, jak na przykład meteory. Zaobserwowano kilka spektakularnych wybuchów meteorów w atmosferze i wiele malowniczych śladów meteorów rozwiewanych przez wiatr. Obejrzeć je można w postaci animacji pod adresem <http://grb.fuw.edu.pl>



Rysunek 8: Krzywa blasku gwiazdy BF Cap zarejestrowana w ciągu jednej nocy. Na osi poziomej HJD.

4.6 Perspektywy

Obecnie trwają prace nad budową systemu pokrywającego 2 steradiany. Kolejnym krokiem może być budowa systemu złożonego z ponad 100 kamer o ogniskowej $f = 175$ mm i światłosile $f/d < 1$. Wymaga to skonstruowania specjalnych kamer ze zintegrowaną optyką i elektroniką. Najbardziej optymalny wydaje się system Schmidta ze zwierciadłem sferycznym i płytą korekcyjną. Rozpoczęto już prace projektowe nad systemem.

Literatura

- [1] R. Klebesadel, I.Strong, and R. Olson, *Observations of Gamma Ray Bursts of Cosmic Origin*, **Ap. J. Lett.** **182:L85**
- [2] W. S. Paciesas et al., *The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog*, **Ap. J. Vol. 122, No 2, 1999, page 465; astro-ph/9903205**
- [3] S. Djorgovski, et al., *The optical counterpart to the gamma-ray burst GRB 970508*, **Nature 387, 876**
- [4] B. Zhang and P. Meszaros, *Gamma-Ray Bursts: progress, problems and prospects*, **astro-ph/0311321**
- [5] B. Paczyński, P. Haensel, *Gamma-Ray Bursts from quark stars*, **astro-ph/0502297**
- [6] C. Akerlof, et al., *Observation of contemporaneous optical radiation from a gamma-ray burst*, **Nature 398, 400**
- [7] M. I. Andersen, H. Pedersen, *Gamma-ray burst optical follow ups with robotic telescopes*, **Astronomische Nachrichten, 325:490, 2004**
- [8] B. Paczyński, *Optical flashes preceding GRBs*, **astro-ph/0108522**
- [9] G. Pojmański, *The All Sky Automated Survey*, **<http://www.astrouw.edu.pl/~gp/asas/>**