

WNIOSEK

o finansowanie projektu badawczego

Tytuł projektu:

**Poszukiwanie szybkozmiennych obiektów astrofizycznych
za pomocą zrobotyzowanego systemu kamer CCD**

6. Słowa kluczowe:

astrofizyka, błyski gamma, gwiazdy zmienne, gwiazdy kataklizmiczne, gwiazdy rozbłyskowe, gwiazdy nowe, supernowe, fotometria, kamery CCD

7. Streszczenie projektu

(streszczenie może być upowszechnione przez Komitet po zakwalifikowaniu projektu do finansowania)

Celem projektu jest poszukiwanie i badanie szybkozmiennych obiektów astrofizycznych. Dotychczasowe przeglądy nieba umożliwiały poszukiwanie obiektów o tempie zmienności rzędu co najmniej kilku godzin. Jedynie pojedyncze obiekty badano w krótszych skalach. Budowany obecnie system wykrywania i obserwacji szybkozmiennych zjawisk kosmicznych „Pi of the Sky” będący przedmiotem grantu inwestycyjnego KBN (decyzja 5230/IA/621/2005 z dnia 4.02.2005) stwarza unikalną możliwość poszukiwania obiektów o skali zmienności rzędu od sekund do roku. Aparaturę zaprojektowano w sposób możliwie uniwersalny tak, aby umożliwić realizację różnorodnych programów badawczych. Niniejszy wniosek przedstawia pierwszy projekt badawczy realizowany w oparciu o tę aparaturę.

System 16 kamer CCD pokrywający łącznie 1 steradian sfery niebieskiej umożliwi jednoczesny pomiar jasności ok. 100 000 gwiazd z częstością ok 6 pomiarów na minutę. Specjalnie zaprojektowane algorytmy umożliwią wykrywanie obiektów o szybko zmieniającej się jasności. Poszukiwane będą obiekty o zmienności zarówno periodycznej jak i kataklizmicznej.

D. OPIS PROJEKTU BADAWCZEGO, METODYKA BADAŃ ORAZ CHARAKTERYSTYKA OCZEKIWANYCH WYNIKÓW

1. Cel naukowy projektu - jaki problem wnioskodawca podejmuje się rozwiązać, co jest jego istotą, co uzasadnia podjęcie tego problemu w Polsce, jakie przesłanki skłaniają wnioskodawcę do podjęcia proponowanego tematu?

Celem projektu jest poszukiwanie szybkozmiennych obiektów astrofizycznych i ich badanie w świetle widzialnym. Ponadto prowadzone będą poszukiwania korelacji z obserwacjami dokonanymi w innych zakresach widma elektromagnetycznego i za pomocą innych nośników (np. neutron). Planuje się dokonanie przeglądu całego nieba dostępnego w ciągu roku z jednego miejsca obserwacji. Dotychczasowe przeglądy nieba umożliwiły poszukiwanie obiektów o tempie zmienności rzędu co najmniej kilku godzin. Jedynie pojedyncze obiekty badano w krótszych skalach. Budowany obecnie system wykrywania i obserwacji szybkozmiennych zjawisk kosmicznych „Pi of the Sky” będący przedmiotem grantu inwestycyjnego KBN (decyzja 5230/IA/621/2005 z dnia 4.02.2005) stwarza unikalną możliwość poszukiwania obiektów o skali zmienności rzędu od sekund do roku.

Poszukiwane będą obiekty o zmienności zarówno okresowej jak i kataklizmicznej. Systematyczny przegląd nieba pozwoli na uzupełnienie katalogów gwiazd zmiennych okresowych i rozszerzenie ich na okresy rzędu jednej minuty do kilku godzin. Daje to szansę na odkrycie nowych typów gwiazd zmiennych i wykrycie nieznanych mechanizmów szybkiej zmienności.

System będzie miał też duży potencjał odkrywczy w zakresie obiektów kataklizmicznych jak gwiazdy rozbłyskowe, nowe i nowe karłowate. Szczególny nacisk położony będzie na poszukiwanie optycznych odpowiedników błysków gamma (GRB), zwłaszcza w czasie samego błysku gamma i przed jego rozpoczęciem.

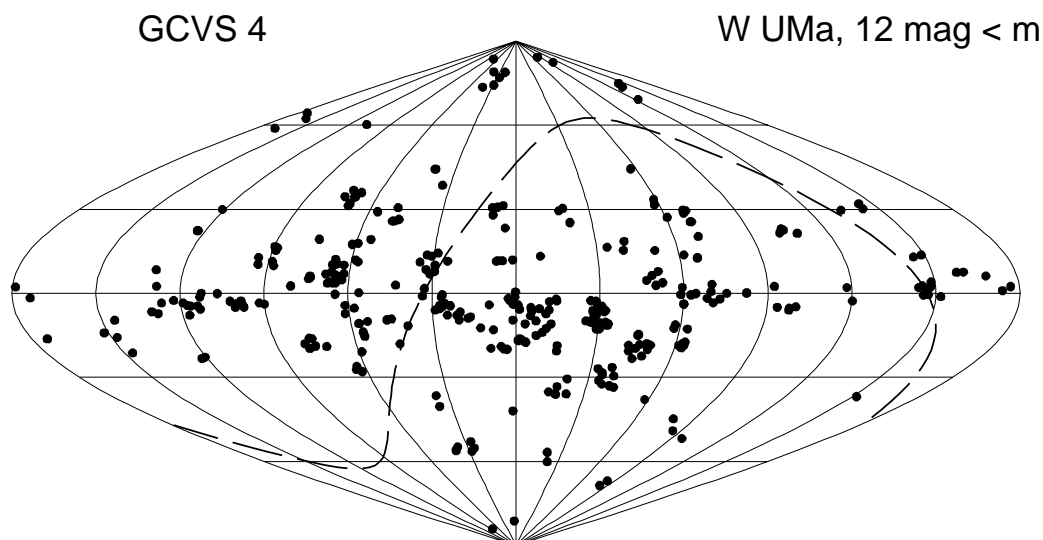
Jednoczesne pokrycie dużego obszaru nieba (1 steradian) stwarza możliwość poszukiwania zjawisk rzadkich, które umykają obserwacjom prowadzonym przez duże teleskopy o dalekim zasięgu, ale małym polu widzenia. Systematyczne przebadanie wielu obiektów umożliwi ich analizę statystyczną, co daje szansę na uchwycenie różnorodnych zależności. Jak ważne są takie poszukiwania niech zaświadczy przykład zależności okresu i jasności cefeid, który stanowi podstawę wyznaczania odległości we Wszechświecie.

Przedstawiany projekt jest rozwinięciem koncepcji systematycznych przeglądów nieba propagowanej przez prof. B. Paczyńskiego [1],[2]. Pierwszą udaną jej realizacją jest projekt ASAS [3] prowadzony przez Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Warszawskiego. Dorobek naukowy ASAS jest imponujący: ponad 20 000 odkrytych gwiazd zmiennych. Opracowując niniejszy projekt badawczy, autorzy obficie korzystali z doświadczeń projektu ASAS. Wykorzystano też pewne doświadczenia toruńskiego przeglądu nieba SAVS [4]. Rysuje się szansa, że tego typu przeglądy staną się polską specjalnością. Stosunkowo niewielkie koszty i duży wkład intelektualny, to cechy, które dobrze przystają do specyficznej sytuacji nauki polskiej. Jednocześnie specjalność ta jest obecnie na świecie wysoko ceniona i dobrze wpisuje się w najnowsze trendy badawcze.

Postęp w dziedzinie elektroniki zarówno detekcyjnej, jak i obliczeniowej sprawia, że możliwe stały się jednoczesne obserwacje wielu obiektów. Wymaga to dużej automatyzacji pomiarów oraz wykonywania istotnej części analizy w czasie rzeczywistym. Opisany projekt jest największym z istniejących robotycznym obserwatorium (w sensie liczby detektorów i wielkości strumienia danych).

2. Istniejący stan wiedzy w zakresie tematu badań - jaki oryginalny wkład wniesie rozwiązanie postawionego problemu do dorobku danej dyscypliny naukowej w świecie i w Polsce, czy w kraju i w świecie jest to problem nowy czy kontynuowany i w jakim zakresie weryfikuje utarte poglądy i dotychczasowy stan wiedzy?

Potrzeba systematycznych przeglądów nieba w celu poszukiwania obiektów zmiennych była wielokrotnie dobitnie podkreślana przez prof. B. Paczyńskiego. Dotychczasowe obserwacje takich obiektów miały raczej sporadyczny charakter co najlepiej pokazują mapy rozmieszczenia znanych obiektów (Rys. 1). Są one pełne białych plam i jedynie niewielkie obszary nieba były pod tym kątem dokładniej przebadane.



Rys. 1. Rozkład znanych gwiazd podwójnych kontaktowych typu *W UMa* we współrzędnych galaktycznych [1]. Widać zgrupowania gwiazd wynikające z nierównomiernego rozkładu poszukiwań.

Przełomu dokonał projekt ASAS, który systematycznie obserwuje półkulę południową. Jego rezultatem jest katalog zawierający ponad 20 000 gwiazd zmiennych, z czego większość wcześniej nie była znana jako zmienne. Prezentowany projekt „Pi of the Sky” kontynuuje tę linię w kierunku krótszych skal czasu zmienności. ASAS wykonuje średnio jedną obserwację danego obszaru na dobę. „Pi of the Sky” będzie wykonywać ok. 5 obserwacji na minutę.

Szczególnie interesującymi obiektami kataklizmicznymi są źródła błysków gamma. Te niezwykle zjawiska stanowią jedną z największych zagadek astrofizyki ostatnich lat. Są to krótkie (0.01-100 s) 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 [5].

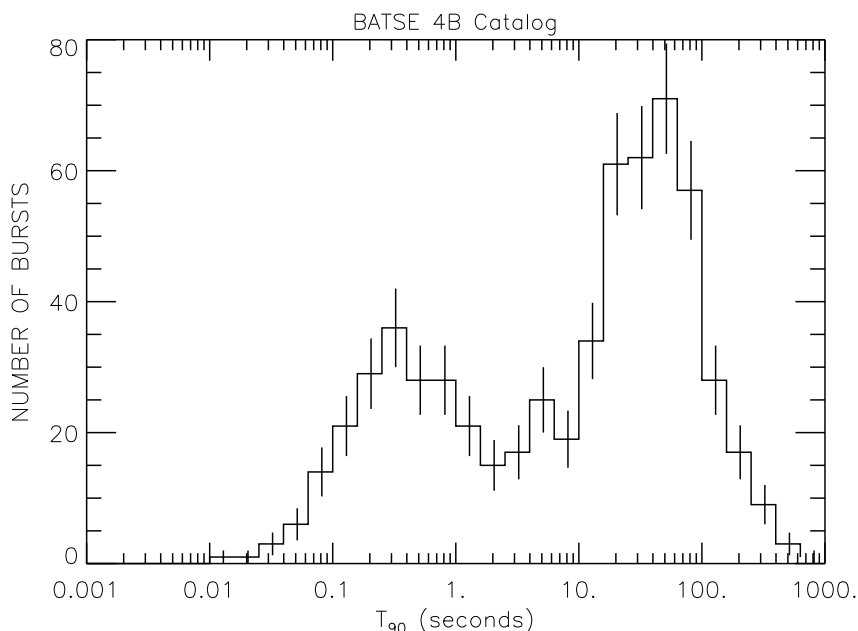
Przez lata spierano się o pochodzenie tych błysków. Proponowano wiele hipotez na temat mechanizmów ich powstawania. Wymieniano źródła zarówno galaktyczne jak i pozagalaktyczne. Przełomu dokonał detektor BATSE na satelicie CGRO. Zaobserwował on niemal 3000 błysków gamma i pokazał, że mają rozkład izotropowy, co stanowiło mocny argument za pochodzeniem pozagalaktycznym [6]. Wniosek ten przypieczętowały obserwacje optycznych poświat, które umożliwiły pomiar przesunięcia ku czerwieni i wyznaczenie odległości [7]. 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) [8]. Dzięki temu zaobserwowano, że błyskom gamma towarzyszą poświaty w całym zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego od fal radiowych, aż do fotonów o energiach rzędu TeV.

Udało się wyodrębnić klasę błysków powtarzalnych, zwanych Soft Gamma Repeaters (SGR). Stwierdzono, że ich źródłem są magnetary - 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 modelem 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 [9]. Nie brak też bardziej egzotycznych hipotez, jak choćby powstanie gwiazdy kwarkowej [10].



Rys. 2. Rozkład czasu trwania GRB obserwowanych przez BATSE [6].

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.

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 [7] 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 [8], 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. ROTSE przypadła w udziale nasławniejsza w historii badań GRB obserwacja. 23 stycznia 1999 r zarejestrował on optyczny błysk towarzyszący GRB 990123 o jasności sięgającej 8.6 magnitudo! [11] 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 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 [12]. Istnienie prekursora może wskazywać na dwufazowy charakter zjawiska [10]. Tym większego znaczenia nabiera więc możliwość jak najwcześniejszych obserwacji optycznych GRB jeszcze w czasie, a nawet przed rozpoczęciem emisji gamma.

Właśnie takie wczesne obserwacje to unikalny wkład jaki do badań GRB może wnieść opisywany projekt. Metodą jest tu jednoczesna obserwacja dużego obszaru nieba. Ceną, jaką trzeba za to zapłacić jest zasięg ograniczony do 12 magnitudo na pojedynczych zdjęciach i 14 magnitudo na sumach 10 zdjęć. Zasięg taki nie gwarantuje, że wszystkie optyczne odpowiedniki GRB zostaną zaobserwowane. Kilka GRB zarejestrowanych przez detektor gamma satelity *Swift* nie udało się zaobserwować pokładowym teleskopem UVOT o zasięgu 17^m. Z drugiej jednak strony, niektóre optyczne poświaty były stosunkowo jasne. Z ostatnio zaobserwowanych:

- GRB041219: 14.9^m (w podczerwieni) po 0.8 h przez 5-metrowy Palomar Hale Telescope
- GRB050502: 14.3^m po 23 s przez ROTSE
- GRB050525: 14.7^m po 6 min przez ROTSE
- GRB050721: 15^m (w podczerwieni) po 6 min przez teleskop w New Mexico Skies (0.3 m)

Ekstrapolacja do pierwszej minuty sugeruje, że co najmniej trzy z nich byłyby widoczne przez "Pi of the Sky". W przeszłości, rekordowo jasne były

- GRB990123: 8.6^m po 20 s zaobserwowany przez ROTSE
- GRB030329: 13^m po 1 h przez teleskopy w Riken i Kyoto

Te z pewnością byłyby widoczne nawet przez aparaturę prototypową "Pi of the Sky".

3. *Metodyka badań - co stanowi podstawę naukowego warsztatu wnioskodawcy i jak zamierza rozwiązać postawiony problem, na czym będzie polegać analiza i opracowanie wyników badań, jakie urządzenia (aparatura) zostaną wykorzystane w badaniach, czy wnioskodawca ma do nich bezpośredni dostęp i umiejętność obsługi?*

Koncepcja projektu

Obecnie obserwuje się coraz silniejsze przekrywanie astronomii (zwłaszcza kosmologii i astrofizyki) z fizyką cząstek elementarnych. Powstała nowa dziedzina – atroparticle physics – nie mająca jeszcze ustalonej polskiej nazwy. Także metody badawcze obu dziedzin zbliżają się do siebie. Wprowadzenie kamer CCD do obserwacji kosmosu spowodowało podobny przełom jak wprowadzenie detektorów elektronicznych w fizyce cząstek. Z pojedynczych obserwacji poszczególnych obiektów czy zdarzeń udało się przejść do tysięcy i milionów pomiarów na wielkiej liczbie obiektów. Właśnie wyniesione przez autorów doświadczenia z eksperymentów fizyki cząstek elementarnych stały się podstawą koncepcji niniejszego projektu.

W ostatnich latach powstało cały szereg niewielkich ($d < 40$ cm) teleskopów przeznaczonych do poszukiwania optycznych odpowiedników błysków gamma [13]. 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 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 system "Pi of the Sky".

Aparatura "Pi of the Sky"

Aparatura "Pi of the Sky" ma się składać z dwóch modułów po 8 kamer każdy, umieszczonych w odległości rzędu 100 km. Jednoczesna obserwacja tego samego fragmentu nieba z dwóch miejsc umożliwia 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 1 steradian sfery niebieskiej, co stanowi obszar porównywalny z polem widzenia detektora gamma satelity Swift. Planowany czas ekspozycji 10 s umożliwi zasięg do 12 magnitudo na pojedynczych klatkach i do 14 magnitudo na sumach 20 klatek.

Aparaturę zaprojektowano w sposób możliwie uniwersalny tak, aby umożliwić realizację różnorodnych programów badawczych. Niniejszy wniosek przedstawia pierwszy projekt badawczy realizowany w oparciu o tę aparaturę.

System 16 kamer CCD pokrywający łącznie 1 steradian sfery niebieskiej umożliwi jednoczesny pomiar jasności ok. 100 000 gwiazd z częstością ok 5 pomiarów na minutę. Specjalnie zaprojektowane algorytmy umożliwią wykrywanie obiektów o szybko zmieniającej się jasności. Poszukiwane będą obiekty o zmienności zarówno periodycznej jak i kataklizmicznej.

Koncepcja eksperymentu została już przetestowana na prototypowej aparaturze [14] działającej od lata 2004 w Las Campanas Observatory w Chile. Przejście do pełnego systemu wymagać będzie rozwiązania problemów związanych z synchronizacją pracy całej aparatury. Konieczne będzie opracowanie nowego oprogramowania sterującego systemem i zarządzającego danymi. Jednak wyniki osiągnięte za pomocą prototypu pokazują, że podstawowe problemy automatyzacji pracy systemu i wyszukiwania interesujących zjawisk są do rozwiązania.

Prototyp na Las Campanas

Działający od 2004r. na Las Campanas prototyp "Pi of the Sky" (Rys. 4) składa się 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 światłosile $f/d = 1.4$. 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 10 s. Kamery zaprojektowano we własnym zakresie, ze względu na specyficzne wymagania

projektu. Szczególnym wyzwaniem była konstrukcja migawek wytrzymałych 10^7 otwarć. Kamery umieszczone są na wspólnym montażu paralaktycznym (Rys. 3) sterowanym komputerowo. Jest to ulepszona konstrukcja montażu typu ASAS [3].



Rys. 3. Prototypowe kamery "π of the Sky" podczas testów w Polsce.



Rys. 4. Obserwatorium Las Campanas. Od lewej: kopuła ASAS mieszcząca aparaturę "π of the Sky", 25-cm teleskop ASAS, budynek komputerowy.

Cały system działa autonomicznie, według generowanego automatycznie programu. Przez całą noc kamery śledzą pole widzenia satelity HETE lub Integral. Jeżeli nadejdzie alert GCN [8] 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.

Przetwarzanie danych w systemie prototypowym

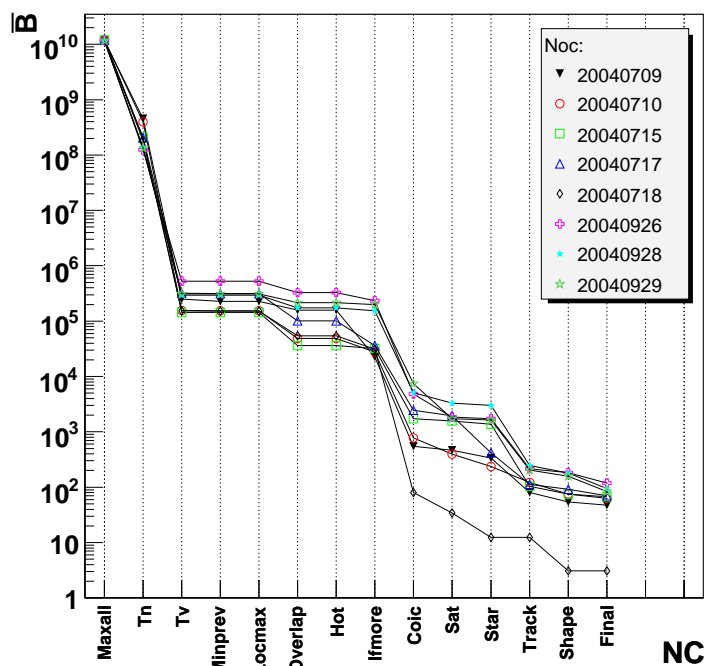
System obsługują dwa komputery działające pod kontrolą systemu operacyjnego Linux. Oprogramowanie zostało w większości napisane w C++. Składa się ono z szeregu modułów odpowiadających za poszczególne urządzenia: montaż, kamery, zbieranie i analiza danych, komunikacja z GCN, itd. Działanie modułów jest 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 została zaadoptowana 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 przyjścia 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.

Rozpoznawanie błysków

UWAGA! Kolejne strony należy przygotować według formularza wniosku o realizację projektu badawczego

Kluczowym elementem systemu jest algorytm rozpoznawania błysków. W prototypowym algorytmie zastosowano 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. 5, na którym przedstawiono strumień danych po kolejnych stopniach.



Rys. 5. Liczba przypadków N 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.

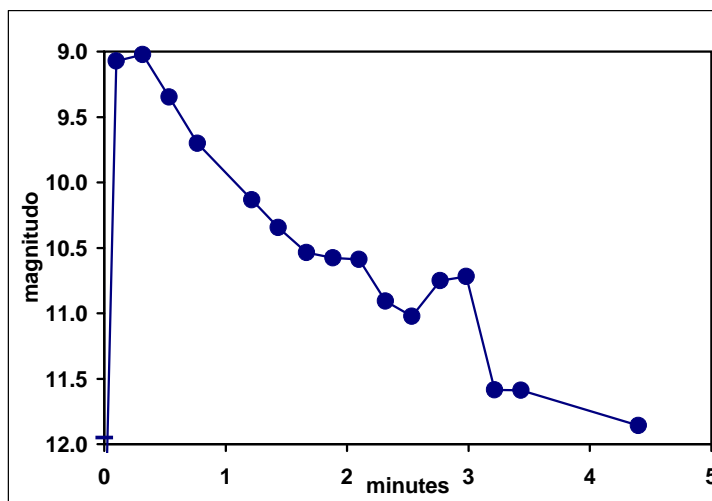
Dotychczasowe wyniki

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 byłby 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 rozbłyskowej CN Leo. W ciągu sekund gwiazda pojaśniała od 14^m (dane ASAS) do 9^m, a następnie stopniowo przygasła w ciągu

kilku minut (Rys. 6). Obserwacja ta potwierdza, że system zdolny jest do automatycznego rozpoznawania nagłych błysków.



Rys. 6. Rozbłysk CN *Leo* zaobserwowany 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 "Pi of the Sky" podsumowuje tabela 1.

Tabela 1. GRB wykryte przez satelity w czasie pracy "Pi of the Sky"

1	aparatura wyłączona
14	poza zasięgiem (półkula północna)
30	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.

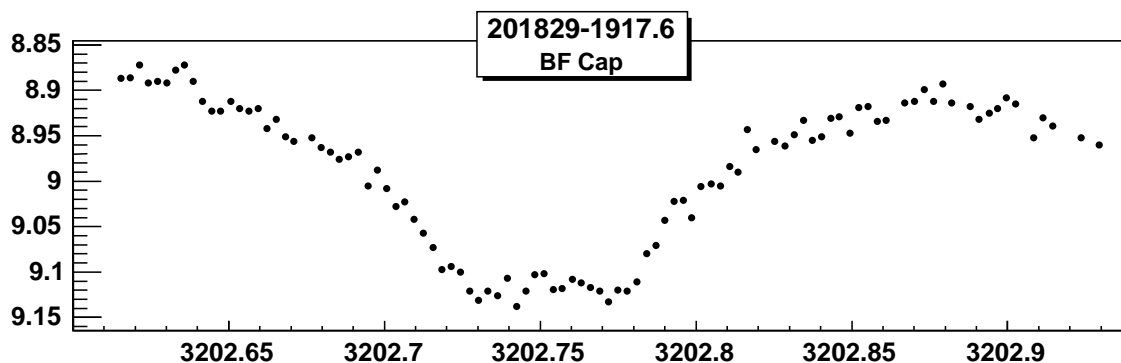
Nie udało się zaobserwować żadnego błysku optycznego towarzyszącego GRB. Wyznaczono limity na jasność ewentualnych błysków. Limity, które były wcześniejsze niż innych obserwatorów opublikowano w cyrkularzach GCN. Podsumowuje je tabela 2. Duże opóźnienia w przypadku GRB 040916B i GRB 041217 wynikają z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

Tabela 2. Limity na optyczne odpowiedniki GRB wyznaczone przez "Pi of the Sky".

rozbłysk	przed	w czasie	po	publikacja
GRB040825A	>10 ^m dla $t < t_0 - 11s$	>12 ^m	>9.5 ^m dla $t > t_0 + 7s$	GCN 2677
GRB040916B			>13.0 ^m dla $t > t_0 + 17min$	GCN 2725
GRB041217			>11.5 ^m dla $t > t_0 + 30min$	GCN 2862
GRB050123	>12 ^m dla $t < t_0 - 108min$			GCN 2970
GRB050326	>11 ^m dla $t < t_0 - 33min$			GCN 3146
GRB050412	>11.5 ^m	>11 ^m	>11.5 ^m	GCN 3240
GRB050607			>12.5 ^m dla $t > t_0 + 60s$	GCN 3526

Poza poszukiwaniem błysków, system "Pi of the Sky" wykonuje standardową fotometrię wszystkich gwiazd w polu widzenia. Przykładową krzywą blasku z jednej nocy pokazuje Rys. 7. Trwają prace nad

umieszczeniem zebranych pomiarów w bazie danych, co umożliwi ich kompleksową analizę. Jest to kluczowy element, niezbędny do efektywnej analizy danych w docelowym systemie.



Rys. 7. Krzywa blasku gwiazdy *BF Cap* zarejestrowana w ciągu jednej nocy. Na osi poziomej HJD (heliocentryczne dni juliańskie).

Przejście od prototypu do systemu docelowego

System „Pi of the Sky” został zaprojektowany tak, aby był możliwie skalowalny. Zwiększenie pokrycia sfery niebieskiej można uzyskać przez proste zwiększenie liczby kamer i proporcjonalne zwiększenie liczby komputerów. Doświadczenia z systemem prototypowym pokazały, że do obsługi dwóch kamer 2000×2000 pikseli fotografujących niebo co 12 s wystarcza dwa PC typu Pentium 3 GHz z pamięcią RAM 2 GB i czterema dyskami po 200 GB. W systemie docelowym z 16 kamerami potrzeba więc będzie 16 takich PC (lub 8 maszyn dwuprocessorowych o zdwojonej objętości RAM i HDD). Jednak w aspekcie systemowym przejście od układu dwóch kamer w jednym miejscu do dwóch odległych układów po 8 kamer stanowi swego rodzaju przejście fazowe. Pojawiają się nowe problemy, które trzeba będzie rozwiązać:

- Synchronizacja obserwacji sąsiednich pól przez różne kamery.
- Synchronizacja naboru danych, analizy i przepływu informacji między komputerami.
- Koincydencja zjawisk zarejestrowanych w odległych miejscach (w prototypie obie kamery są podłączone do tego samego PC).
- Stabilność oprogramowania (system operacyjny, nabór danych, analiza) i synchroniczne odnawianie wersji.
- Niezawodność hardware’u (elementy zapasowe, przestrzeganie zasady „no single point failure”).
- Dostęp i obsługa multiterabajtowej bazy danych z wynikami (dane nie mieszczą się już na jednym komputerze).
- Zarządzanie całością systemu (dedykowane PC?)

Rozwiązanie tych problemów to ambitne wyzwanie. Warto je jednak podjąć, gdyż otwiera ono drogę do budowy wielodetektorowych systemów obserwacyjnych na wzór wielkich eksperymentów fizyki cząstek. Systemy takie z pewnością odegrają kluczową rolę w przyszłej dekadzie badań astrofizycznych.

4. Co będzie wymiernym, udokumentowanym efektem podjętego problemu - zakładany sposób przekazu i upowszechnienia wyników (publikacje naukowe oraz referaty na konferencjach w kraju i zagranicą, monografie naukowe, rozprawy doktorskie, i habilitacyjne, nowe patenty i "know-how", nowe metody i urządzenia badawcze).

Oprócz upowszechnienia pomiarów w formie bazy danych, dostępnej przez internet, opracowane wyniki pomiarów będą publikowane w recenzowanych czasopismach naukowych oraz przedstawiane na konferencjach międzynarodowych. Część danych zostanie specjalnie opracowana i włączona w formie ćwiczenia do programów kształcenia na Wydziale Fizyki UW i Wydziale Nauk Przyrodniczych UKSW. Wyniki uzyskane w czasie trwania projektu będą podstawą co najmniej dwóch rozpraw doktorskich (Lech Piotrowski i Marcin Sokołowski).

Bibliografia

- [1] B. Paczyński, "The Future of Massive Variability Searches", astro-ph/**9609073**.
- [2] B. Paczyński, "Monitoring All Sky for Variability", astro-ph/**0005284**.
- [3] G. Pojmanski, "The All Sky Automated Survey", *Acta Astronomica* **47**, 467, 1997; **48**, 35 1998; **50**, 177, 2000; **52**, 397, 2002; **53**, 341, 2003; **54**, 153, 2004; astro-ph/**0412645**.
<http://www.astrouw.edu.pl/~gp/asas/>
- [4] A. Niedzielski, G. Maciejewski, K. Czart, "First results of the Semi-Automatic Variability Search", *Acta Astronomica*, vol.**53**, no.3, 2003, pp.281-90.
- [5] R. Klebesadel, I.Strong, and R. Olson, "Observations of Gamma Ray Bursts of Cosmic Origin", *Ap. J. Lett.* **182**:L85}
- [6] W. S. Paciesas *et al.*, "The Fourth BATSE Gamma-Ray Burst Catalog", *Ap. J.* Vol. **122**, No 2, 1999, page 465; astro-ph/**9903205**.
- [7] S. Djorgovski, *et al.*, "The optical counterpart to the gamma-ray burst GRB 970508", *Nature* **387**, 876.
- [8] GRB Coordinate Network (GCN), <http://gcn.gsfc.nasa.gov/>
- [9] B. Zhang and P. Meszaros, "Gamma-Ray Bursts: progress, problems and prospects", astro-ph/**0311321**.
- [10] B. Paczyński, P. Haensel, "Gamma-Ray Bursts from quark stars", astro-ph/**0502297**.
- [11] C. Akerlof, *et al.*, "Observation of contemporaneous optical radiation from a gamma-ray burst", *Nature* **398**, 400.
- [12] B. Paczyński, „Optical Flashes Preceding GRBs”, astro-ph/**0108522**, 2001.
- [13] M. I. Andersen, H. Pedersen, "Gamma-ray burst optical follow ups with robotic telescopes", *Astronomische Nachrichten* **325**:490, 2004.
- [14] A. Burd *et al.*, "Pi of the Sky - all-sky, real-time search for fast optical transients", *New Astronomy*, Volume **10**, Issue 5 (April 2005), pages 409-416.
<http://grb.fuw.edu.pl/>