

Badanie zjawisk kosmicznych o kilkusekundowym okresie zmienności

Lech Mankiewicz^a, Grzegorz Wrochna^b, Rafał Sałański^c

^aInstytut Fizyki Teoretycznej, Warszawa; ^bInstytut Problemów Jądrowych, Warszawa;

^cInstytut Systemów Elektronicznych, Politechnika Warszawska

Streszczenie

Tradycyjnie astronomia zajmowała się badaniem procesów o bardzo długich skalach czasowych – od wielu miesięcy do miliardów lat. Niedawne odkrycie tzw. błysków gamma (impulsów promieniowania γ) ujawniło, że we Wszechświecie z dużą częstością występują kataklizmy o nieobserwowanej dotąd sile i skali czasowej rzędu sekund. Ich systematyczne badanie wymaga zupełnie nowego podejścia. W niniejszej pracy opisano projekt rozwiązania czerpiącego z doświadczeń fizyki cząstek elementarnych. Aparatura nazwana „ π of the sky” pokrywa większą część widocznej półsfery nieba aż do około 20 stopni ponad horyzontem. Składa się z 16 obiektywów fotograficznych o ogniskowej 50 mm, każdy wyposażony w kamerę CCD o rozmiarze 2000 × 2000 pikseli. Znacząca część analizy danych jest przeprowadzana w czasie rzeczywistym.

Motywacja naukowa

Krótkie błyski optyczne

Tradycyjna astronomia zajmuje się raczej obiektami stałymi. Charakterystyczna skala czasowa dla ewolucji gwiazd to miliony lat. Część z nich ulega wprawdzie mniej lub bardziej okresowym zmianom w skali czasowej liczonej w dniach lub godzinach. Jednakże takie zmienne gwiazdy mają znaną, stałą pozycję i obserwacje mogą być starannie przygotowane.

Kilka razy w roku można zaobserwować pojawienie się tzw. „nowej” gwiazdy w naszej Galaktyce. Przed eksplozją gwiazda taka jest raczej słabo widoczna, i może być dostrzeżona tylko przez duży teleskop. W momencie wybuchu blask gwiazdy gwałtownie rośnie, a potem powoli słabnie, w skali czasowej liczonej w tygodniach. Tak długi czas, kiedy gwiazda pozostaje jasna ułatwia odkrycie i obserwacje.

Istnieje wiele raportów o punktowych, krótkich błyskach zaobserwowanych na niebie. Większość z nich może być wytłumaczona przez światła samolotów, odbicia satelitów, meteory i inne. Kilka z nich jest jak dotąd trudno wytłumaczyć przez jakiegokolwiek zjawisko w atmosferze. Niestety, były to tylko wizualne obserwacje, bardzo trudne do zweryfikowania i bez możliwości późniejszych badań. Systematyczne poszukiwanie zjawiska przy użyciu typowych przyrządów astronomicznych wydaje się bezsensowne. Profesjonalne teleskopy z dużą ogniskową są zaprojektowane do obserwowania słabych obiektów, oraz posiadają niezmiernie wąskie pole widzenia (rzędu 30×30 arcsec²). Krótkie błyski, jeżeli istnieją, są zbyt rzadkie, aby była szansa, że pojawią się w aktualnym polu widzenia ogromnego teleskopu. Aby systematycznie badać takie zjawiska konieczne jest zupełnie inne podejście.

Rozbłyski gamma

Rozbłyski gamma (ang. Gamma Ray Burst, GRB) [1] pochodzenia pozagalaktycznego są jedną z najtrudniejszych i zarazem najciekawszych zagadek współczesnej astrofizyki. Są to krótkie (0.1 – 100 s) impulsy promieniowania gamma pochodzące z punktowych źródeł na niebie. Energię typowego impulsu ocenia się na 10^{51} ergów. Intensywność impulsu jest zwykle większa niż całkowite tło promieniowania gamma pochodzące od pozostałych źródeł

na niebie. Odkrycie GRB potwierdza konieczność poszukiwania silnych impulsów promieniowania w optycznym zakresie widma.

Do tej pory nie zidentyfikowano jednoznacznie zjawiska (lub zjawisk) odpowiedzialnego za rozbłyski gamma. Istnieją przesłanki świadczące o tym, że źródłem energii rozbłysków są wybuchy supernowych. Lista zjawisk podejrzanych o produkcję GRB zawiera także zderzenia gwiazd neutronowych prowadzące do powstania czarnej dziury i kolaps gwiazdy kwarkowej. Nie da się wykluczyć, że za rozbłyski gamma odpowiedzialna jest nieznana jeszcze fizyka.

Aby zbadać mechanizm GRB należy obserwować to zjawisko w innych niż ultra-
rentgenowskie obszarach widma. Można oczekiwać, że gwałtownej eksplozji, będącej źródłem energii dla rozbłysku gamma towarzyszy także błysk optyczny [2]. Do tej pory doświadczalne potwierdzenie tej hipotezy napotykało na trudności z powodów opisanych powyżej. Tylko około 30 rozbłysków gamma udało się skorelować z obiektami aktywnymi w optycznym zakresie widma. Prawie wszystkie zaobserwowano z pomocą dużych teleskopów po upływie wielu godzin od rozbłysku gamma. W tych skalach czasowych zaobserwowana *poświata* optyczna o jasności¹ rzędu 20^m słabnie w tempie 1^m na kilka godzin.

Tylko raz udało się zaobserwować silny błysk optyczny w ciągu kilku sekund po rejestracji rozbłysku gamma. Odkrycia dokonała grupa ROTSE przy pomocy małego, automatycznego teleskopu [3]. Zarejestrowano silny błysk optyczny o jasności w maksimum wynoszącej 8.6^m.

Idea eksperymentu

Wybór właściwej strategii ma szczególne znaczenie w przypadku poszukiwania stosunkowo rzadkich zjawisk, takich jak np. rozbłyski optyczne towarzyszące błyskom gamma. Do tej pory błysków poszukiwały teleskopy skomunikowane – za pomocą internetu – z satelitami rentgenowskimi obserwującymi niebo w widmie promieniowania gamma. W teorii, współrzędne błysku gamma znalezionej przez satelitę miały być przesłane na Ziemi i optyczny teleskop automatycznie miał orientować się w kierunku błysku. W praktyce niska dokładność z jaką mierzone są współrzędne błysków gamma na sferze niebieskiej i bezwładność systemu wynikająca z opóźnienia z jakim informacja z satelity dociera do obserwatorium na Ziemi a także z mechanicznej bezwładności dużych teleskopów powoduje że program ten jest bardzo trudny w realizacji. Efektem działania całego zestawu dedykowanych urządzeń [4] jest do tej pory tylko jedna, wspomniana wyżej obserwacja optycznego błysku bezpośrednio skorelowanego z rozbłyskiem gamma.

W niniejszej pracy proponujemy zupełnie inne podejście, wykorzystujące doświadczenia fizyki cząstek elementarnych. Przełomem w tej dziedzinie było wynalezienie pierwszego detektora elektronicznego (tzw. komory wielodrutowej), które zostało uhonorowane przez komitet noblowski poprzez przyznanie nagrody dla G. Charpaka. To rzadki przypadek, gdy nagroda jest przyznawana nie za odkrycie naukowe, lecz za skonstruowanie urządzenia elektronicznego. W astronomii podobną rolę odegrało wprowadzenie kamer CCD. Nie było to jednak przejście gwałtowne, lecz raczej ciągły proces. Początkowo sensory CCD używane były jako substytut kliszy fotograficznej. Znacznie większa efektywność kwantowa umożliwiła fotografowanie słabszych obiektów przy tym samym czasie ekspozycji. Bezpośrednia dostępność pomiarów fotometrycznych oraz wygoda przetwarzania komputerowego została dosyć szybko doceniona. W ten sposób *fotografowanie* przeszło w *mierzenie*. Proces pomiarowy stawał się coraz bardziej zautomatyzowany, a liczba obiektów obserwowanych w pojedynczym projekcie wzrosła z tysięcy do milionów.

¹ Jasności gwiazd wyraża się w tzw. wielkościach gwiazdowych (*magnitudo*). $m = -2.5 \log_{10} E + b$, gdzie E jest oświetleniem danym przez gwiazdę w luksach a $b = -14.05$

To jaki będzie następny krok można przewidzieć na podstawie analogii do rozwoju eksperymentalnej fizyki cząstek elementarnych. W fizyce cząstek większa szybkość i większe upakowanie elementów elektronicznych umożliwiły zbieranie coraz większej ilości danych. Magazynowanie danych szybko stało się wąskim gardłem. Konieczne stało się znaczące zredukowanie liczby danych on-line, poprzez częściową analizę w czasie rzeczywistym. Nowoczesne detektory cząstek odbierają dane z milionów zdarzeń (zderzeń cząstek) na sekundę, a tylko niewielki ułamek zdarzeń może być magazynowany na dyskach lub taśmach. Mechanizm selekcyjny, zwany *trygerem* (ang. *trigger*) rozpoznaje potencjalnie interesujące zdarzenie i odrzuca pozostałe. Zwykle tryger jest zorganizowany w kilku poziomach, z których każdy redukuje ilość danych o określony czynnik przy użyciu coraz to bardziej skomplikowanych algorytmów.

W astronomii, magazynowanie danych właśnie w obecnych latach staje się wąskim gardłem. Naturalnym następnym krokiem będzie zaadaptowanie pomysłu trygera do zredukowania objętości danych i magazynowania tylko tych najbardziej obiecujących. Przykładem takiej aparatury jest propozycja opisana w tym artykule.

Opis techniczny projektowanej aparatury

Proponujemy konstrukcję automatycznego systemu do rejestracji rozbłysków optycznych w oparciu o rozwiązania znane z fizyki cząstek elementarnych. Klasyczna konstrukcja automatycznych teleskopów prowadzi do stosunkowo długiej drogi sygnału wyzwalającego obserwację – trygera - od satelity do teleskopu. Opóźnienie rozpoczęcia obserwacji optycznych związane jest także z bezwładnością układu mechanicznego sterującego orientacją teleskopu. Problem opóźnienia sygnału wyzwalającego można rozwiązać poprzez oprogramowanie umożliwiające samowyzwalanie, bez konieczności korzystania z informacji pochodzącej od satelity. Problem bezwładności można wyeliminować przez konstrukcję układu statycznego – o dostatecznie dużym polu obserwacji, pokrywającym praktycznie cały obszar nieba. Ceną jaką trzeba zapłacić za to rozwiązanie jest duża ilość zbieranych danych, z których większość nie zawiera informacji o rozbłyskach. Z powodów ograniczeń dostępnej pamięci trwałej obróbka danych musi być dokonywana w trybie on-line. W ten sposób proces odnajdywania błysków odbywa się nie poprzez komunikację z satelitą a poprzez analizę on-line danych uzyskanych przez teleskop. Tylko te dane, w których analiza on-line wykryje potencjalnych kandydatów na rozbłyski, będą pozostawiane w pamięci do dalszej analizy

Urządzenie składa z 16 sprzężonych kamer CCD, każda po 2048×2048 pikseli. Kamery zostaną wykonane w oparciu o komercyjne chipy CCD. Układ elektroniczny składa się z części sterującej CCD, 14-bitowego przetwornika ADC oraz części odpowiedzialnej za odczyt danych. Każda z kamer jest wyposażona w obiektyw o ogniskowej 50 mm. Rozmiar piksela wynosi ok. 15 μm. Jeden piksel pokrywa 1 minutę kątową nieba, zaś cała kamera wycinek sfery 35°×35°. Układ 16 kamer CCD pozwala na obserwację całej półsfery do ok. 20° powyżej horyzontu.

Krytycznym elementem projektowania tego typu aparatury jest dobór czasów ekspozycji i odczytu. Krótki czas ekspozycji ogranicza efektywny zasięg aparatury, długi – zmniejsza

czułość na krótkie błyski. Szybki odczyt powoduje wzrost szumów, powolny – zwiększa czas martwy układu. Wydaje się, że sensownym kompromisem jest czas ekspozycji rzędu 5s, pozwalający sięgnąć do gwiazd o jasności do 10^m-11^m , oraz czas odczytu rzędu 1s, dający czas martwy ok. 20%.

Ponieważ konstrukcja układu optycznego umożliwi pokrycie niemal całego nieba, ruchomy montaż umożliwiający dowolne orientowanie teleskopu jest zbędny. Przy typowym, planowanym czasie ekspozycji rzędu 5 sekund obraz nieba przesunie się o szerokość 1 piksela (na równiku). Oznacza to, że konstrukcja montażu kompensującego obrót Ziemi nie jest konieczna. Z drugiej strony śledzenie odkrytego błysku optycznego oznacza konieczność dłuższych czasów ekspozycji a zatem prosty, jednoosiowy montaż będzie w przyszłości potrzebny. Samo poszukiwanie błysków optycznych można rozpocząć w oparciu o konstrukcję statyczną.

Modułowa konstrukcja układu pozwala na skonstruowanie prototypu w oparciu o jedną kamerę. Prototyp taki, znacznie prostszy niż docelowe urządzenie, umożliwi testowanie newralgicznych składowych całego systemu, tzn. oprogramowania układu akwizycji danych, analizy on-line i wyszukiwania błysków w danych gromadzonych na dysku.

Idealną lokalizacją dla automatycznego obserwatorium byłoby Las Campanas Observatory w Chile gdzie pracują polskie teleskopy projektów OGLE i ASAS. Kolejnym etapem rozwoju byłaby konstrukcja 3 dodatkowych teleskopów i rozmieszczenie ich w Europie, Ameryce Północnej i Australii, co pozwoliłoby na pokrycie obserwacjami *całego* nieba.

System akwizycji i analizy danych

Układ obserwacyjny składa się z 16 kamer o wymiarach 2048x2048 pikseli (2k x 2k). Zakładając digitalizację sygnału do postaci 14-bitowej dla każdego piksela z kamery konieczne są 2 bajty danych. Pojedyncza kamera zawiera 4M pikseli czyli 8MB danych. Cały układ 16 kamer podczas akwizycji jednego obrazu dostarcza 128 MB danych. Ponieważ z założenia odczyt następuje co 5 sekund, prędkość transmisji pomiędzy układem a komputerem przetwarzającym dane powinna wynosić co najmniej 30 MB/s.

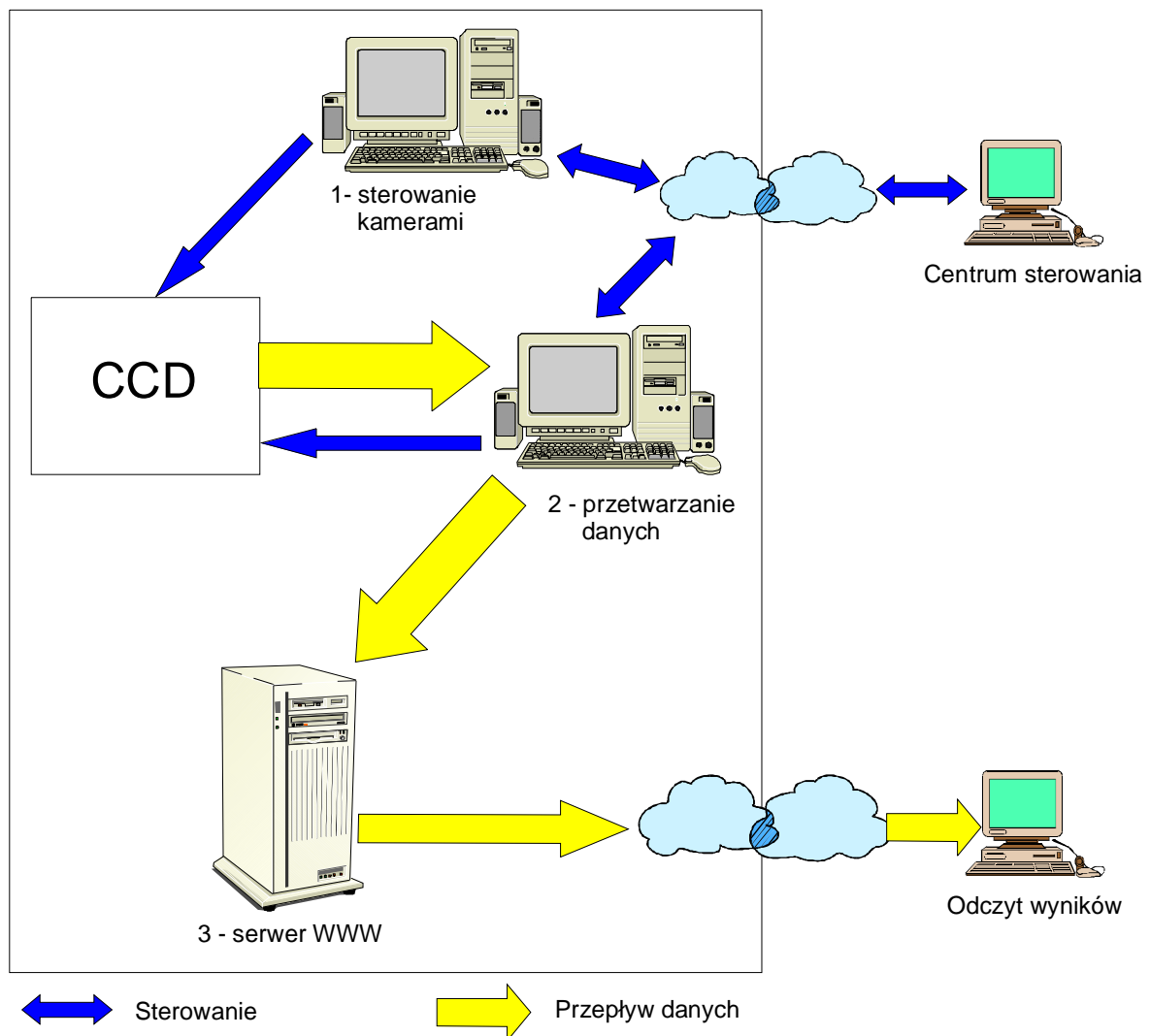
Interfejsy które umożliwiają przesyłanie takiej ilości danych to IEEE 1394 Firewire z maksymalnym transferem 50 MB/s, oraz USB 2.0 z maksymalnym transferem 60 MB/s. Opcjonalnie można zaprojektować własną płytkę PCI do której bezpośrednio dochodzą sygnały LVDS z kamer.

Program przetwarzający dane co 5 sekund wysyła sygnał inicjujący odczyt zawartości CCD. Dane przysyłane są do komputera. Następnie program dokonuje porównania otrzymanego obrazu z obrazami pochodzącymi z kilku poprzednich ujęć. W przypadku wykrycia zmian jest uruchamiana procedura rejestracji obrazów. Procedura rejestracyjna może być także uruchomiana poprzez zewnętrzne źródło, np. przez satelitę. Typowe opóźnienie trygera wynosi 10-15s. Dane będą więc buforowane przez czas 20-30s, aby możliwe było rejestrowanie zdjęć nieba wykonanych 10-15s **przed** tygerem.

Po samodzielnym wykryciu zmian wysyłany jest sygnał do centrum sterowania. Zarejestrowane obrazy poddawane są kompresji bezstratnej i udostępnione na serwerze WWW do dalszych badań.

System złożony jest z trzech komputerów:

- 1- sterujący kamerami. Oprogramowanie komputera zaprojektowane do samodzielnej pracy, wszelkie zmiany parametrów działania programu np. częstotliwość wyzwalania migawki, czas naświetlania są dokonywane przez internet.
- 2 - przetwarzający dane. Program czytuje dane z kamer i analizuje pod kątem wykrycia zmian. Sterowanie programem przez internet
- 3 - serwer WWW prezentujący raporty z pracy systemu oraz obrazy zapisane w czasie zarejestrowanych zmian



Centrum sterowania umożliwia zarządzanie jednym lub kilkoma systemami obserwacyjnymi. Każdy z komputerów ma możliwość wykonywania funkcji przeznaczonych dla pozostałych komputerów. Daje to dodatkową gwarancję stabilności pracy systemu. Przełączanie funkcji może odbywać się zdalnie z centrum sterowania.

Najtrudniejszą częścią projektowanego systemu jest oprogramowanie umożliwiające samowyzwalanie, tzn analizę i selekcję danych w czasie rzeczywistym. Należy pamiętać, że

aparatura zarejestruje prawdopodobnie dużą ilość błysków spowodowanych zjawiskami zachodzącymi w atmosferze ziemskiej lub w bezpośrednim pobliżu Ziemi. Stworzenie oprogramowania umożliwiającego szybką a zarazem skuteczną selekcję tych zjawisk jest prawdziwym wyzwaniem.

Podsumowanie

Opisana aparatura ma umożliwić badanie zjawisk na niebie o czasie trwania rzędu sekund i jasności do 10^m - 12^m . Pokrycie dużego wycinka sfery niebieskiej ($>\pi$ steradianów) powinno zapewnić wysoką efektywność wykrywania. Rejestracja obrazów nieba może być wyzwalana przez tryger, pochodzący np. z detektora satelitarne. Zastosowanie cyklicznego bufora danych da niespotykaną w dotychczasowych projektach możliwość rejestracji zdarzeń, które wystąpiły tuż przed trygerem zewnętrznym.

Przewidziano także możliwość całkowitego uniezależnienia się od trygerów zewnętrznych. Kilkustopniowa selekcja wzorowana na systemach trygera eksperymentów fizyki cząstek umożliwić ma szybką redukcję strumienia danych w czasie rzeczywistym i w konsekwencji detekcję interesujących zjawisk.

Literatura

- [1] R. Klebesadel, I. Strong and R. Olson, *Ap.J.Lett.* **182:L85**, 1973.
- [2] B. Paczyński, „Optical Flashes Preceding GRBs”, *astro-ph/0108522*, 2001.
- [3] K. Akerlof et al., *Nature* **398:400**, 1999.
- [4] T. Feder, *Physics Today*, July 2002, p. 24-25.