

"Pi of the Sky": teleskopy-roboty w poszukiwaniu kosmicznych błysków

Lech Wiktor Piotrowski
Eksperyment "Pi of the Sky"

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

IFJ PAN, 26.V.2011

- 1 Błyski gamma
 - Najważniejsze instrumenty
 - Dane i modele
- 2 Eksperyment "Pi of the Sky"
 - Konstrukcja
 - Wyniki
- 3 "Pi of the Sky" a fizyka cząstek elementarnych
 - Analogie
 - Analiza detektora "Pi of the Sky"
- 4 Podsumowanie

Błyski gamma

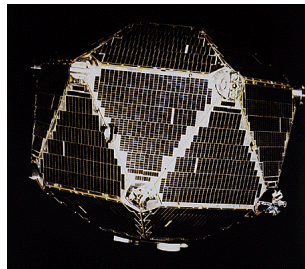
Błyski gamma – Gamma Ray Bursts

Jedne z najbardziej energetycznych eksplozji we Wszechświecie, emitujące głównie promieniowanie γ .

Odkryte w czerwcu 1967 roku przez satelity Vela 3 i 4:

- ▶ przeznaczone do monitorowania traktatu o częściowym zakazie prób jądrowych
- ▶ wyposażone w 12 detektorów X i 18 detektorów neutronów i γ
- ▶ umieszczone na orbicie ~ 120000 km

Publikacja dopiero w 1973 (Astrophysical Journal), z powodu tajności.



Integral

- ▶ Wystrzelony w 2002 roku
- ▶ Współpraca ESA, NASA i Russian Space Agency
- ▶ Cele obserwacyjne: kosmiczne źródła wysokich energii, GRB

Imager on-Board the Integral Satellite (IBIS)

- ▶ detektor: wolframowa maska, płytki CdTe, płytki CsI
- ▶ FOV: $8.3^\circ \times 8^\circ$ (fully coded)
- ▶ zakres energii: 15 keV - 10 MeV
- ▶ dokładność pozycji: $\sim 1'$

Spectrometer for Integral (SPI)

- ▶ detektor: wolframowa maska, kryształy Ge
- ▶ FOV: $14^\circ \times 14^\circ$ (fully coded)
- ▶ zakres energii: 18 keV - 8 MeV
- ▶ dokładność pozycji: $< 1.3^\circ$

Dodatkowo:

- ▶ X-ray monitor JEM-X
- ▶ Optical Monitoring Camera (OMC)



Tryb operacji – obserwacja wybranych pól i źródeł. Rejestracja silnych błysków z całego nieba, bez pozycji.

SWIFT

- ▶ Wystrzelony 20 listopada 2004
- ▶ Zbudowany przez amerykańsko-angielsko-włoską współpracę
- ▶ Cel obserwacyjny: GRB, "target of opportunity"

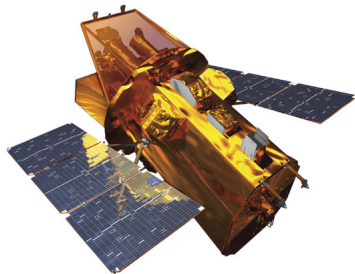
Burst Alert Telescope (BAT)

- ▶ detektor: CdZnTe licznik fotonów
- ▶ FOV: ~ 1.4 sr (half-coded)
- ▶ zakres energii: 15-150 keV
- ▶ rozdzielczość kątowa: $4'$

X-Ray Telescope (XRT)

- ▶ detektor: EEV CCD-22, 600×600 pikseli
- ▶ FOV: $23.6' \times 23.6'$
- ▶ zakres energii: 0.2-10 keV
- ▶ rozdzielczość kątowa: $18''$

Tryb operacji – monitorowanie nieba za pomocą detektora BAT; obracanie detektorami XRT i UVOT do wyznaczenia współrzędnych w przypadku wykrycia błysku.



Ultraviolet/Optical Telescope (UVOT)

- ▶ detektor: CCD, 2048×2048 pikseli
- ▶ FOV: $17' \times 17'$
- ▶ zakres energii: 170-650 nm
- ▶ rozdzielczość kątowa: $0.9''$

Fermi (GLAST)

- ▶ Wystrzelony 11 czerwca 2008
- ▶ Współpraca USA, Francji, Niemiec, Włoch, Japonii i Szwecji
- ▶ Cele obserwacyjne: AGN, pulsary, inne źródła gamma, ciemna materia, GRB

Large Area Telescope (LAT)

- ▶ detektory: produkcja par w warstwach absorbera (metal) + traker mikropaskowy (Si) + kalorymetr (scyntylator CsI)
- ▶ FOV: ~ 2 sr (half-coded)
- ▶ zakres energii: 20 MeV - 300 GeV
- ▶ rozdzielczość kątowa: $<3.5^\circ$ (100 MeV), $<0.15^\circ$ (>10 GeV)

Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

- ▶ detektor: 12 scyntylatorów NaI, dwa scyntylatory BGO
- ▶ FOV: całe niebo niezastłonięte przez Ziemię
- ▶ zakres energii: 10 keV - 25 MeV
- ▶ dokładność pozycji online, nominalnie: 15° ; w praktyce nawet do 90°



Tryb operacji – monitorowanie wybranych pól przez LAT, całego nieba przez GBM.

Obserwacje naziemne

Wszystkie naziemne eksperymenty reagują na alerty z Galactic Coordinates Network (GCN)

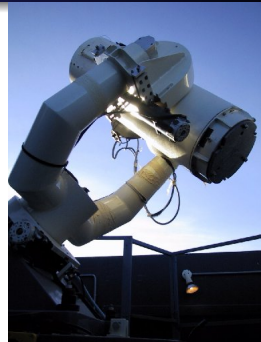
- ▶ Radiowe – duże teleskopy radiowe, obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach.



Obserwacje naziemne

Wszystkie naziemne eksperymenty reagują na alerty z Galactic Coordinates Network (GCN)

- ▶ Radiowe – duże teleskopy radiowe, obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach.
- ▶ Optyczne:
 - ▶ duże teleskopy optyczne – obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach, pomiar widma – przesunięcie ku czerwieni
 - ▶ małe teleskopy robotyczne – obserwacje od dziesiątek sekund do minut po trygerze



Obserwacje naziemne

Wszystkie naziemne eksperymenty reagują na alerty z Galactic Coordinates Network (GCN)

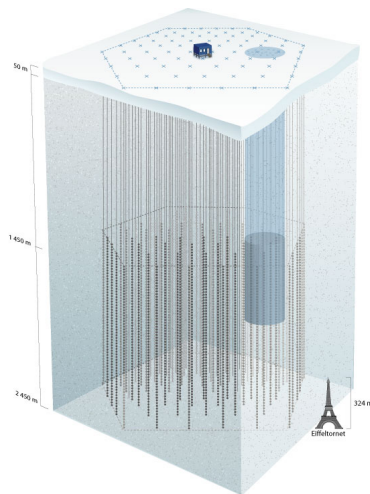
- ▶ Radiowe – duże teleskopy radiowe, obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach.
- ▶ Optyczne:
 - ▶ duże teleskopy optyczne – obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach, pomiar widma – przesunięcie ku czerwieni
 - ▶ małe teleskopy robotyczne – obserwacje od dziesiątek sekund do minut po trygerze
- ▶ Wysokie energie:
 - ▶ atmosferyczne teleskopy cherenkovowskie (jak Magic, Hess, Veritas) – nie zaobserwowano
 - ▶ inne teleskopy cherenkovowskie, np. Milagro – również nie zaobserwowano



Obserwacje naziemne

Wszystkie naziemne eksperymenty reagują na alerty z Galactic Coordinates Network (GCN)

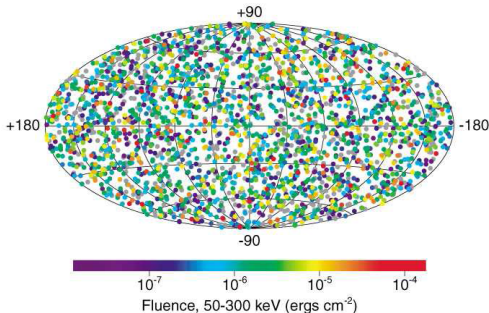
- ▶ Radiowe – duże teleskopy radiowe, obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach.
- ▶ Optyczne:
 - ▶ duże teleskopy optyczne – obserwacje późnych poświat po godzinach/dniach, pomiar widma – przesunięcie ku czerwieni
 - ▶ małe teleskopy robotyczne – obserwacje od dziesiątek sekund do minut po trygerze
- ▶ Wysokie energie:
 - ▶ atmosferyczne teleskopy cherenkovowskie (jak Magic, Hess, Veritas) – nie zaobserwowano
 - ▶ inne teleskopy cherenkovowskie, np. Milagro – również nie zaobserwowano
- ▶ Neutrino – Amanda, IceCube itp. Nie zaobserwowano.



Dane obserwacyjne

- ▶ Izotropowy rozkład na niebie

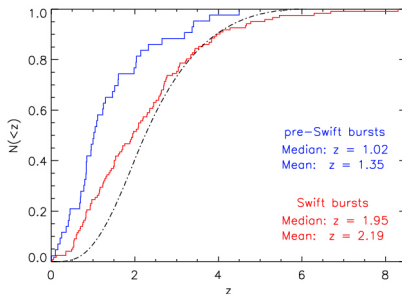
2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Dane obserwacyjne

► Izotropowy rozkład na niebie

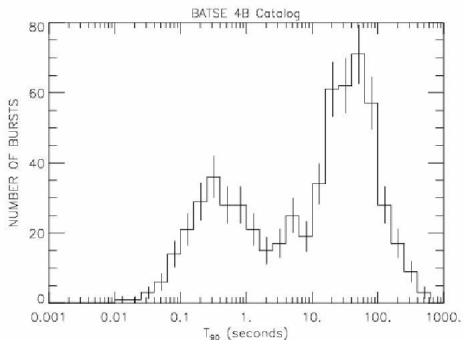
► Odległości kosmologiczne



Rekordzista: GRB090423 ($z=8.2$, $d=13.1$ Gly)

Dane obserwacyjne

- ▶ Izotropowy rozkład na niebie
- ▶ Dwie grupy wg. czasów trwania
- ▶ Odległości kosmologiczne



Dane obserwacyjne

- ▶ Izotropowy rozkład na niebie
- ▶ Dwie grupy wg. czasów trwania
- ▶ Odległości kosmologiczne
- ▶ ...i twardości

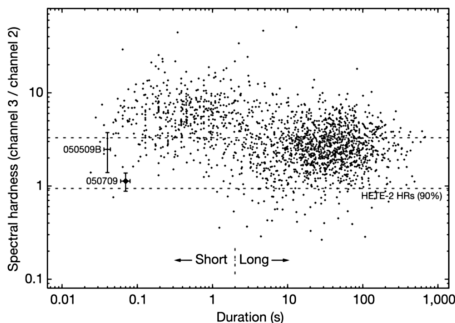


Figure 1 | The classic BATSE duration-spectral hardness diagram¹.

Dane obserwacyjne

- ▶ Izotropowy rozkład na niebie
- ▶ Dwie grupy wg. czasów trwania
- ▶ emisja energii na poziomie 10^{51} erg (w strugach)
- ▶ Odległości kosmologiczne
- ▶ ...i twardości

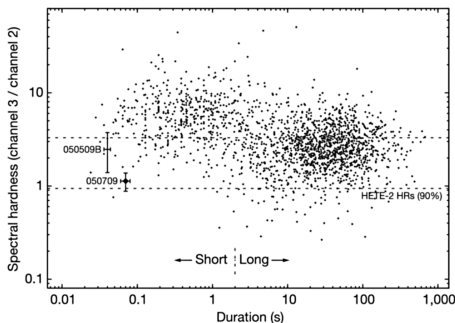


Figure 1 | The classic BATSE duration-spectral hardness diagram¹.

Dane obserwacyjne

- ▶ Izotropowy rozkład na niebie
- ▶ Dwie grupy wg. czasów trwania
- ▶ emisja energii na poziomie 10^{51} erg (w strugach)
- ▶ Odległości kosmologiczne
- ▶ ...i twardości
- ▶ (zaobserwowany) zakres widma od długości radiowych do GeV

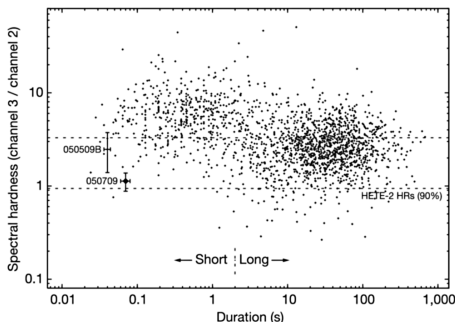


Figure 1 | The classic BATSE duration-spectral hardness diagram¹.

Centralny "silnik"

Dwie klasy błysków – dwie grupy czasów trwania i twardości:

krótkie błyski, < 2 s, twarde widmo

"Merger" – zderzenie dwóch zwartych obiektów: gwiazd neutronowych, gwiazdy neutronowej i czarnej dziury, ew. białych karłów.



Centralny "silnik"

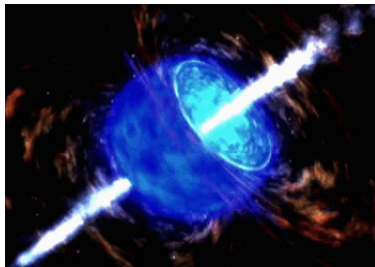
Dwie klasy błysków – dwie grupy czasów trwania i twardości:

krótkie błyski, < 2 s, twarde widmo

"Merger" – zderzenie dwóch zwartych obiektów: gwiazd neutronowych, gwiazdy neutronowej i czarnej dziury, ew. białych karłów.

długie błyski, > 2 s, miękkie widmo

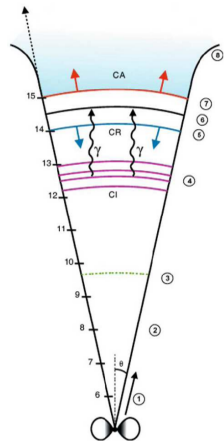
"Collapsar" – zapaść Hipernowej, supernowej cięższej niż 20 mas Słońca, do czarnej dziury.



Model kuli ognistej

Wczesna emisja:

- ▶ ultrarelatywistyczny wpływ z centralnego "silnika" (czynniki Lorentza $\Gamma \gg 100$)
- ▶ różne prędkości pakietów
- ▶ zderzenia pakietów – emisja γ i optyczna



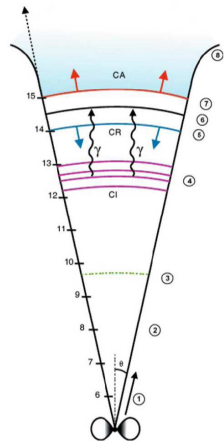
Model kuli ognistej

Wczesna emisja:

- ▶ ultrarelatywistyczny wypływ z centralnego "silnika" (czynniki Lorentza $\Gamma \gg 100$)
- ▶ różne prędkości pakietów
- ▶ zderzenia pakietów – emisja γ i optyczna

Późna emisja, poświata:

- ▶ wpływ uderza w materię międzygwiazdową lub "wiatr gwiazdny"
- ▶ w zderzeniu produkowane jest promieniowanie X
- ▶ odbita fala wsteczna produkuje promieniowanie optyczne i radiowe



Model kuli ognistej

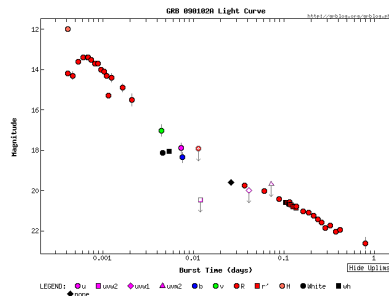
Wczesna emisja:

- ▶ ultrarelatywistyczny wypływ z centralnego "silnika" (czynniki Lorentza $\Gamma \gg 100$)
- ▶ różne prędkości pakietów
- ▶ zderzenia pakietów – emisja γ i optyczna

Późna emisja, poświata:

- ▶ wypływ uderza w materię międzygwiazdową lub "wiatr gwiazdny"
- ▶ w zderzeniu produkowane jest promieniowanie X
- ▶ odbita fala wsteczna produkuje promieniowanie optyczne i radiowe

Wpływ zwalnia – załamanie krzywej blasku



Koncepcja projektu

Cel projektu – umożliwić obserwacje optyczne od początku (a nawet przed) błysku gamma

Problem

Reakcja na tryger z satelity – propagacja sygnału, obrót aparatury – (prawie) zawsze opóźnione obserwacje

Koncepcja projektu

Cel projektu – umożliwić obserwacje optyczne od początku (a nawet przed) błysku gamma

Problem

Reakcja na tryger z satelity – propagacja sygnału, obrót aparatury – (prawie) zawsze opóźnione obserwacje



Rozwiązanie

Uniezależnienie od zew. trygera – monitoring dużego obszaru nieba + własny układ wyzwalania

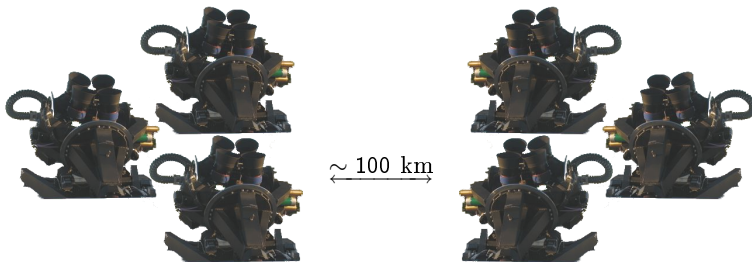
Dodatkowe możliwości:

- ▶ autonomiczna detekcja błysków światła (nie necessarily GRB)
- ▶ obserwacja innych szybkozmiennych zjawisk – gwiazdy nowe, rozbłyskowe, okresowe, blazary, itp.

Konstrukcja projektu

Pełny system (w budowie) to 24 kamery w dwóch znacznie oddalonych zestawach (~ 100 km) obserwujących ten sam wycinek nieba.

- ▶ Pole widzenia: 1.5 sr (=SWIFT)
- ▶ Rozdzielczość czasowa: ~ 10 s
- ▶ ~ 2000 - 3000 klatek/noc/kamerę
- ▶ Duży strumień danych: ~ 0.5 TB/noc
- ▶ Wykrywanie błysków w czasie rzeczywistym
- ▶ Koincydencja zestawów kamer – odrzucanie błysków satelitów (paralaksa)
- ▶ W pełni autonomiczna praca
- ▶ Zasięg 12^m - 14^m



Prototyp

▶ Dwie kamery na paralaktycznym montażu

- ▶ Starszy model aktualnych kamer
- ▶ CCD, elektronika: 2048×2062 pikseli, 16-bit, niskoszumowe
- ▶ Optyka: obiektyw Canon, $f=85$ mm, $f/d=1.2$
- ▶ Pole widzenia: $\simeq 20^\circ \times 20^\circ$
- ▶ Rozmiar piksela: $36''$
- ▶ Koincydencja: obserwują ten sam wycinek nieba



▶ Lokalizacja

- ▶ do grudnia 2009: Las Campanas Observatory – Carnegie Institution of Washington, pustynia Atacama, Chile (przy eksperymencie ASAS)
- ▶ od wiosny 2011: San Pedro de Atacama Observatory, Chile (ok. 750 km na północ od LCO)

Pełny system

Pierwszy montaż docelowego systemu "Pi of the Sky" – uruchomiony w październiku 2010

- ▶ Lokalizacja: Hiszpania, niedaleko Huelvy, ośrodek INTA
- ▶ 4 kamery na paralaktycznym montażu
- ▶ 2 tryby pracy:
 - ▶ Wide - obserwacja sąsiednich obszarów nieba
 - ▶ Deep - obserwacja tego samego obszaru nieba
- ▶ CCD, elektronika: 2048×2062 pikseli, 16 bit ADC, niskoszumowe
- ▶ Optyka: obiektyw Canon, $f=85$ mm, $f/d=1.2$, $\simeq 20^\circ \times 20^\circ$



Wyniki – pełny system

Statystyka GRB od zainstalowania systemu:

daytime	app. off	S hemisph.	below horizon	clouds	outside FOV	inside FOV
18	9	2	4	0	6	1

Jeden GRB w polu widzenia – brak detekcji, limit 11^m

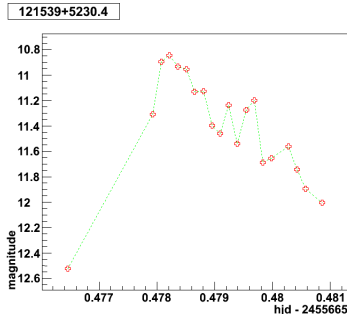
Wyniki – pełny system

Statystyka GRB od zainstalowania systemu:

daytime	app. off	S hemisph.	below horizon	clouds	outside FOV	inside FOV
18	9	2	4	0	6	1

Jeden GRB w polu widzenia – brak detekcji, limit 11^m

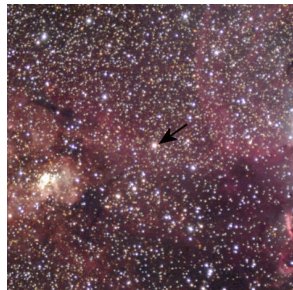
Odkrycie rozbłysku gwiazdy EG UMa, 13 kwietnia 2011, za pomocą algorytmu wykrywania błysków. Pojaśnienie od 12.5^m do 10.84^m (filtr V).



Wyniki – prototyp

Zaobserwowano:

- ▶ eksplozje 3 gwiazd nowych
- ▶ eksplozje 3 gwiazd rozbłyskowych
- ▶ pojaśnienie blazara 3C 454.3
- ▶ 250 niezidentyfikowanych błysków, w tym 7 na więcej niż 1 klatce



Wyniki – prototyp

Zaobserwowano:

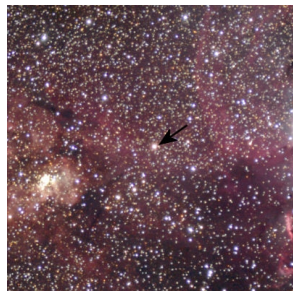
- ▶ eksplozje 3 gwiazd nowych
- ▶ eksplozje 3 gwiazd rozbłyskowych
- ▶ pojaśnienie blazara 3C 454.3
- ▶ 250 niezidentyfikowanych błysków, w tym 7 na więcej niż 1 klatce

Statystyka GRB w SPdA:

daytime 7	app. off 2	N hemisph. 0	below horizon 0
clouds 0	outside FOV 1	inside FOV 0	

Statystyka GRB w LCO (07.2004 do 10.2010):

daytime 401	app. off 138	N hemisph. 49	below horizon 82
clouds 19	outside FOV 92	inside FOV 5	



Na 5 GRB w polu widzenia, dla 4 wyznaczono limity. Dla jednego...

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu
- ▶ $t_0 + 2s$ – teleskop RAPTOR robi pierwsze zdjęcie

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu
- ▶ $t_0 + 2s$ – teleskop RAPTOR robi pierwsze zdjęcie
- ▶ $t_0 + 8s$ – obiekt staje się widoczny dla TORTORA

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu
- ▶ $t_0 + 2s$ – teleskop RAPTOR robi pierwsze zdjęcie
- ▶ $t_0 + 8s$ – obiekt staje się widoczny dla TORTORA
- ▶ $t_0 + 15s$ – błysk przekracza 6 magnitudo!

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu
- ▶ $t_0 + 2s$ – teleskop RAPTOR robi pierwsze zdjęcie
- ▶ $t_0 + 8s$ – obiekt staje się widoczny dla TORTORA
- ▶ $t_0 + 15s$ – błysk przekracza 6 magnitudo!
- ▶ $t_0 + 17s$ – Swift wysyła alert GCN o GRB080319B

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu
- ▶ $t_0 + 2s$ – teleskop RAPTOR robi pierwsze zdjęcie
- ▶ $t_0 + 8s$ – obiekt staje się widoczny dla TORTORA
- ▶ $t_0 + 15s$ – błysk przekracza 6 magnitudo!
- ▶ $t_0 + 17s$ – Swift wysyła alert GCN o GRB080319B
- ▶ prototyp Pi of the Sky kończy drugie zdjęcie błysku (!)

"The naked-eye burst" – odkrycie

...dokonano odkrycia w nocy 18/19 marca 2008:

- ▶ O 5:45 UT satelita Swift wykrywa GRB080319A
- ▶ kamera Pi kieruje się do źródła błysku, ale nic nie widzi
- ▶ o 6:12:47 UT w rogu FOV pojawia się nowy obiekt
- ▶ $t_0 = 6:12:49$ UT Swift rejestruje pierwsze γ powyżej progu
- ▶ $t_0 + 2s$ – teleskop RAPTOR robi pierwsze zdjęcie
- ▶ $t_0 + 8s$ – obiekt staje się widoczny dla TORTORA
- ▶ $t_0 + 15s$ – błysk przekracza 6 magnitudo!
- ▶ $t_0 + 17s$ – Swift wysyła alert GCN o GRB080319B
- ▶ prototyp Pi of the Sky kończy drugie zdjęcie błysku (!)

Odkrycie dzięki superpozycji dwóch czynników:

Szczęścia

Błysk B krótko po i dość "blisko" błysku A



Koncepcji "Pi of the Sky"

"Blisko" dla kamery "Pi of the Sky" o bardzo dużym polu widzenia. Bardzo daleko dla większości aparatury astronomicznej.

"The naked-eye burst" – rekordzista

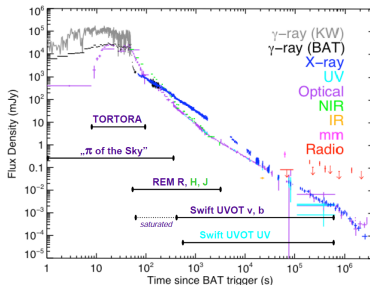
Najjaśniejszy optycznie (i rentgenowo) zaobserwowany GRB: Odległość: $z = 0.937$ (7.5 mld lat św.):

► Szczytowa jasność optyczna 5.3m – 5.7m

► Widoczny gołym okiem przez 40 s!

► Najjaśniejszy obserwowany obiekt w kosmosie, $2.5 \cdot 10^6$ jaśniejszy niż poprzedni rekordzista SN2005ap

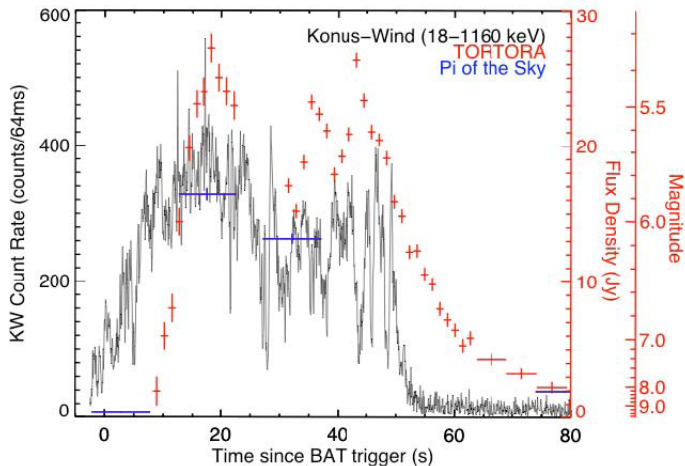
Pierwszy pomiar optyczny, wykazujący równoczesność emisji z γ – "Pi of the Sky"



Wrzesień 2008: publikacja w Nature (vol 455).

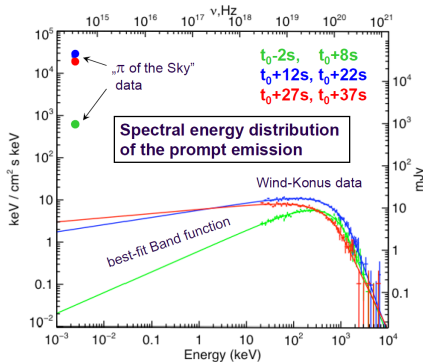
"The naked-eye burst" – modyfikacja modeli (1)

Wyraźny dowód: emisja optyczna zachodzi równocześnie z γ :



"The naked-eye burst" – modyfikacja modeli (2)

Strumień optyczny $\sim 10^4$ powyżej oczekiwanego z ekstrapolacji strumienia γ :



⇒ dwa różne mechanizmy generacji promieniowania optycznego i γ , prawdopodobnie:

- ▶ synchrotron self-Compton dla γ
- ▶ synchrotronowe dla optycznych

"Pi of the Sky" a fizyka cząstek elementarnych

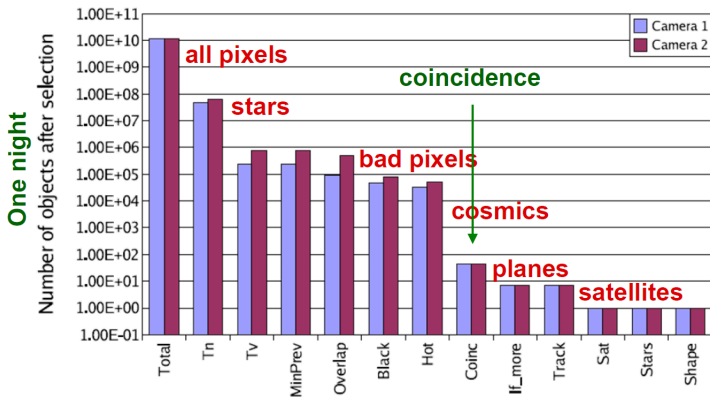
Co łączy "Pi of the Sky" i fizykę cząstek elementarnych?

- ❶ Koncepcja:
 - ▶ monitoring dużego obszaru nieba w poszukiwaniu pojedynczych przypadków
 - ▶ bardzo duży strumień danych (~ 200 MB/s, ~ 0.5 TB/noc)
- ❷ Analiza online:
 - ▶ redukcja strumienia do kilkadziesiątu przypadków na noc
- ❸ Zastosowanie krzemowych detektorów pikselowych:
 - ▶ metody analizy obrazów z kamer CCD
- ❹ Testy "na wiązce"
- ❺ Modelowanie działania detektora

Algorytmy analizy danych

Wielopoziomowy algorytm wykrywania błysków on-line:

- ▶ koincydencja
- ▶ potwierdzenie na następnej klatce



Algorytmy analizy danych

Wielopoziomowy algorytm wykrywania błysków on-line:

- ▶ koincydencja
- ▶ potwierdzenie na następnej klatce

Algorytmy off-line:

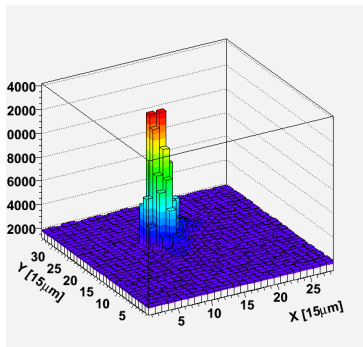
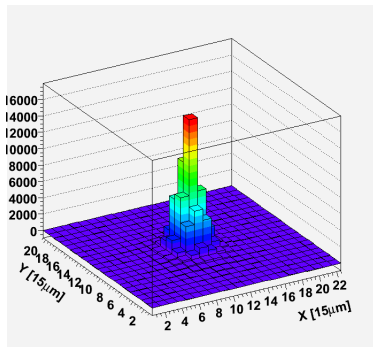
- ▶ katalogowanie gwiazd (pomiar jasności i pozycji)
- ▶ algorytm wykrywania pojaśnień (gwiazdy rozbłyskowe)
- ▶ algorytm wykrywania nowych obiektów (gwiazdy nowe)
- ▶ wyszukiwanie innych gwiazd zmiennych

Odpowiedź detektora "Pi of the Sky"

Problemy w analizie danych CCD podobne do znanych z krzemowych detektorów pikselowych.

Kształt obrazu gwiazdy (Point Spread Function – PSF):

- ▶ wąski i symetryczny w środku pola widzenia
- ▶ szeroki, z wyraźnymi "wąsami" przy brzegach



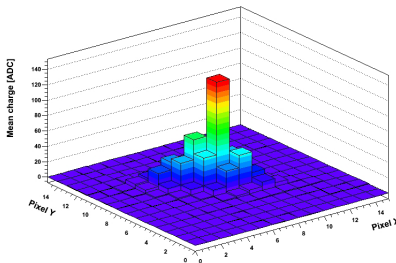
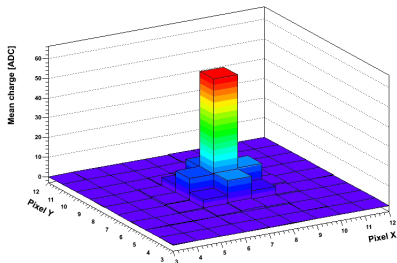
Odpowiedź detektora "Pi of the Sky"

Problemy w analizie danych CCD podobne do znanych z krzemowych detektorów pikselowych.

Kształt obrazu gwiazdy (Point Spread Function – PSF):

- ▶ wąski i symetryczny w środku pola widzenia
- ▶ szeroki, z wyraźnymi "wąsami" przy brzegach

Podobnie jak w przypadku przejścia cząstki pod dużym kątem przez detektor pikselowy:



⇒ można próbować podobnych rozwiązań.

Testy "na wiązce" (1)

Gwiazda

widziana z Ziemi – źródło punktowe

Źródło punktowe

obraz źródła dużo mniejszy od rozmiarów piksla

Testy "na wiązce" (1)

Gwiazda

widziana z Ziemi – źródło punktowe



Light source,
 $\phi=0.4$ mm

Źródło punktowe

obraz źródła dużo mniejszy od rozmiarów piksla

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
 - ▶ przesłonięta otworem o średnicy 0.4 mm
 - ▶ zasilana generatorem impulsów
 - ▶ umieszczona na ruchomym montażu

Testy "na wiązce" (1)

Gwiazda

widziana z Ziemi – źródło punktowe

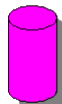


Light source,
 $\phi=0.4$ mm

Źródło punktowe

obraz źródła dużo mniejszy od rozmiarów piksla

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
 - ▶ przesłonięta otworem o średnicy 0.4 mm
 - ▶ zasilana generatorem impulsów
 - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera



Lenses,
 $f=85$ mm



CCD,
pixel: 15×15 μm

Testy "na wiązce" (1)

Gwiazda

widziana z Ziemi – źródło punktowe

Źródło punktowe

obraz źródła dużo mniejszy od rozmiarów piksla

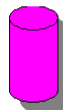
- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
 - ▶ przesłonięta otworem o średnicy 0.4 mm
 - ▶ zasilana generatorem impulsów
 - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera
- ▶ odległość: 22 m (długość korytarza)



Light source,
 $\phi=0.4$ mm



$d=22$ m



Lenses,
 $f=85$ mm



CCD,
pixel: 15×15 μm

Testy "na wiązce" (1)

Gwiazda

widziana z Ziemi – źródło punktowe

Źródło punktowe

obraz źródła dużo mniejszy od rozmiarów piksla

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
 - ▶ przesłonięta otworem o średnicy 0.4 mm
 - ▶ zasilana generatorem impulsów
 - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera
- ▶ odległość: 22 m (długość korytarza)

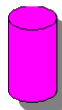
Spełnia wymogi źródła punktowego



Light source,
 $\phi=0.4$ mm



d=22 m



Lenses,
f=85 mm



CCD,
pixel: 15x15 μ m

Testy "na wiązce" (1)

Gwiazda

widziana z Ziemi – źródło punktowe

Źródło punktowe

obraz źródła dużo mniejszy od rozmiarów piksla

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
 - ▶ przesłonięta otworem o średnicy 0.4 mm
 - ▶ zasilana generatorem impulsów
 - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera
- ▶ odległość: 22 m (długość korytarza)

Spełnia wymogi źródła punktowego

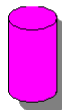
Testy "na wiązce" – nowatorskie podejście w astrofizyce.



Light source,
 $\phi=0.4$ mm



d=22 m

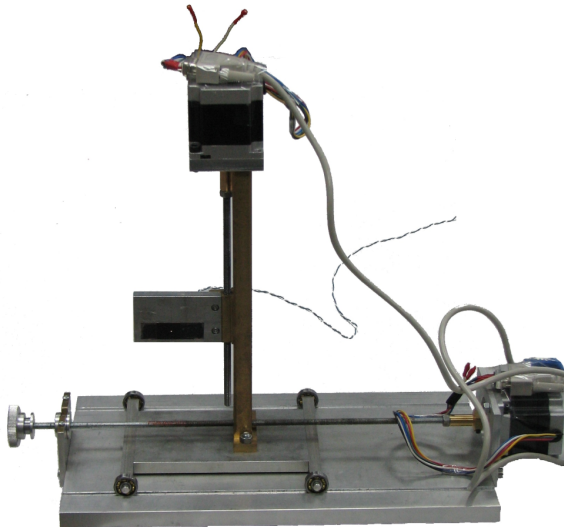


Lenses,
f=85 mm



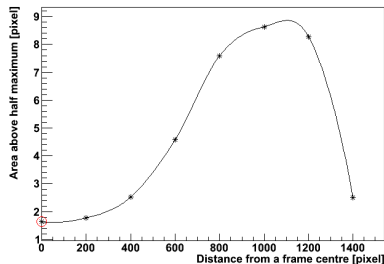
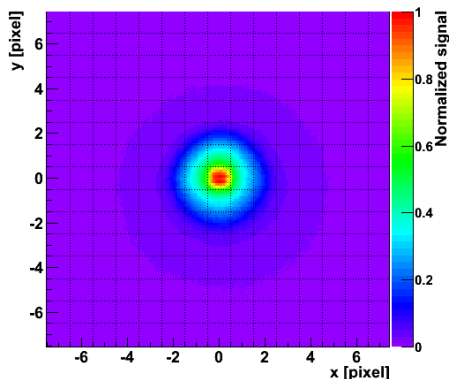
CCD,
pixel: 15x15 μ m

Testy "na wiązce" (2)



Laboratoryjne pomiary PSF

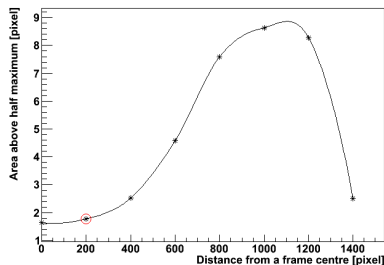
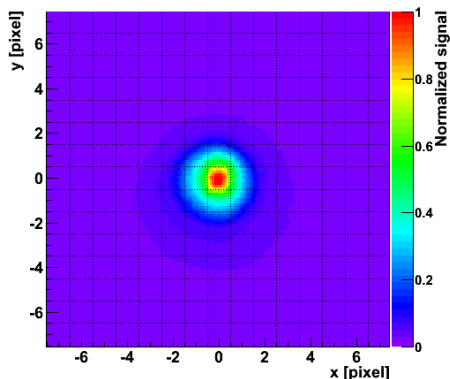
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

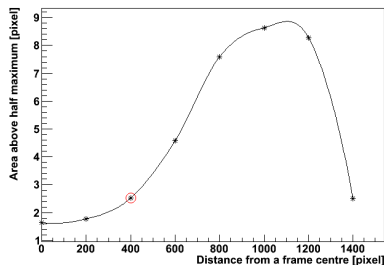
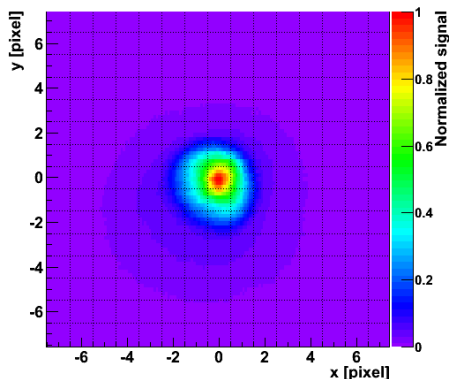
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

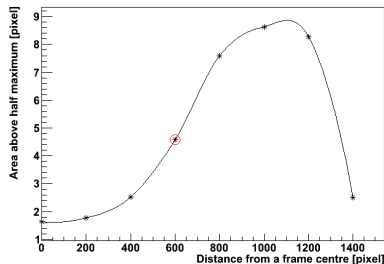
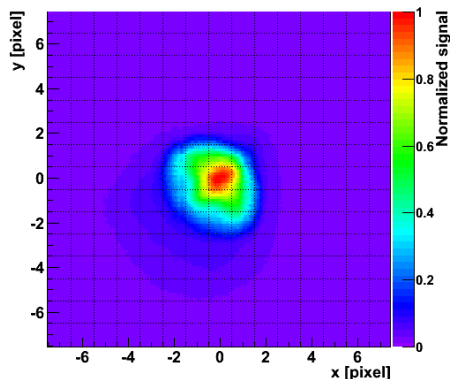
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

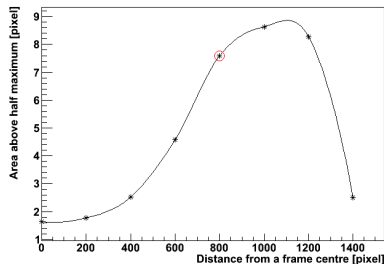
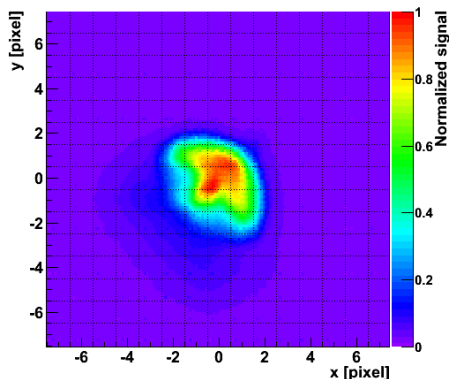
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

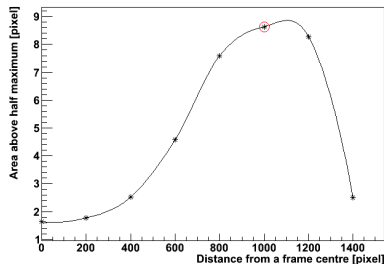
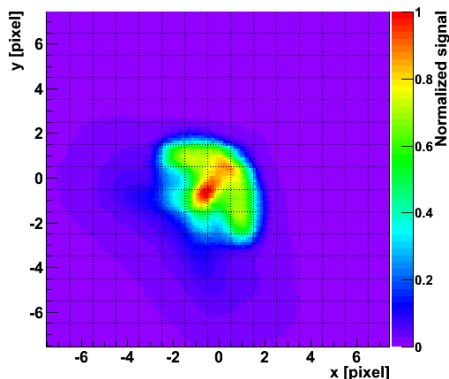
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

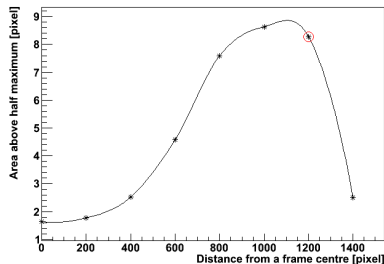
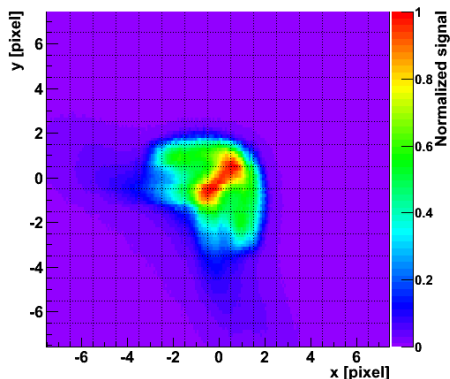
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

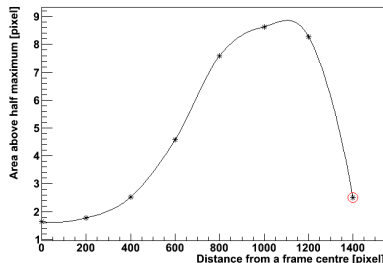
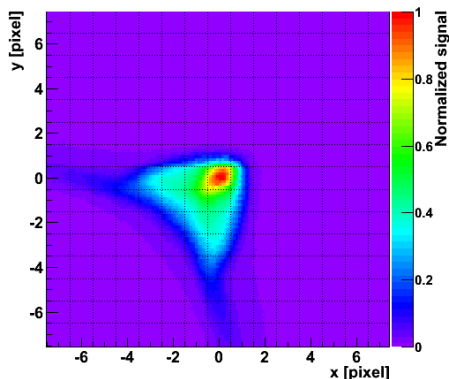
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Laboratoryjne pomiary PSF

PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce 20×20 położeń na pikselu w warunkach laboratoryjnych.

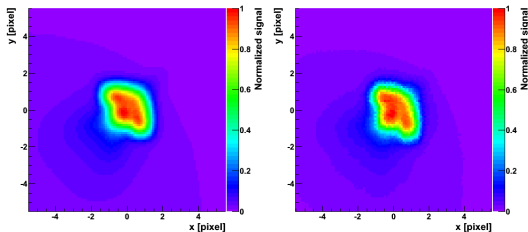


Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

Parametryzacja PSF

Dwa podejścia

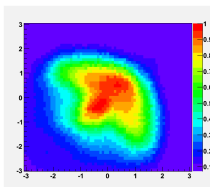
- 1 Dopasowanie parametrów do wzoru Rayleigha-Sommerfelda z aberracjami
⇐ bardzo obciążające obliczenia, bez sukcesu



Parametryzacja PSF

Dwa podejścia

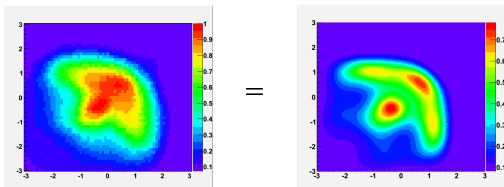
- 1 Dopasowanie parametrów do wzoru Rayleigha-Sommerfelda z aberracjami
⇐ bardzo obciążające obliczenia, bez sukcesu
- 2 Efektywny model wielomianowy skupiający się na kształcie PSF a nie na fizyce jej powstawania



Parametryzacja PSF

Dwa podejścia

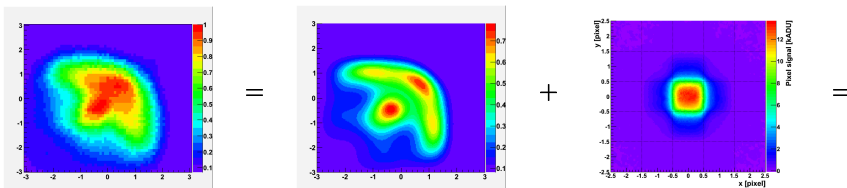
- 1 Dopasowanie parametrów do wzoru Rayleigha-Sommerfelda z aberracjami
⇐ bardzo obciążające obliczenia, bez sukcesu
- 2 Efektywny model wielomianowy skupiający się na kształcie PSF a nie na fizyce jej powstawania



Parametryzacja PSF

Dwa podejścia

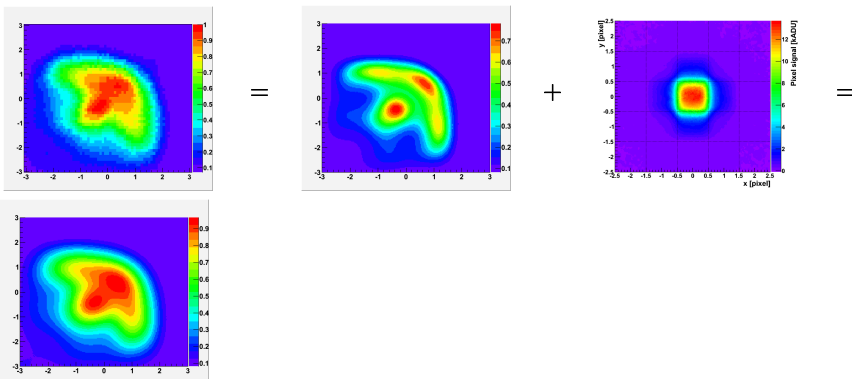
- 1 Dopasowanie parametrów do wzoru Rayleigha-Sommerfelda z aberracjami
⇐ bardzo obciążające obliczenia, bez sukcesu
- 2 Efektywny model wielomianowy skupiający się na kształcie PSF a nie na fizyce jej powstawania



Parametryzacja PSF

Dwa podejścia

- 1 Dopasowanie parametrów do wzoru Rayleigha-Sommerfelda z aberracjami
⇐ bardzo obciążające obliczenia, bez sukcesu
- 2 Efektywny model wielomianowy skupiający się na kształcie PSF a nie na fizyce jej powstawania



Prekursor "the naked-eye burst"

Najjaśniejszy (optycznie) błysk – GRB080319B – mógł mieć jasny prekursor optyczny:

Aparatura "Pi of the Sky" obserwowała miejsce błysku 20 minut przed eksplozją...

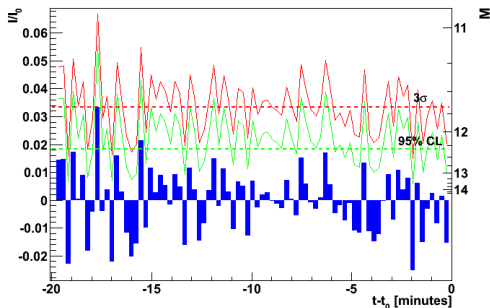
Prekursor "the naked-eye burst"

Najjaśniejszy (optycznie) błysk – GRB080319B – mógł mieć jasny prekursor optyczny:

Aparatura "Pi of the Sky" obserwowała miejsce błysku 20 minut przed eksplozją...
...w rogu klatki – ewentualny prekursor bardzo zniekształcony.

Model wielomianowy został użyty do:

- ▶ poszukiwań prekursora – nie wykryto sygnału powyżej 3σ
- ▶ wyznaczenia bardziej precyzyjnych limitów



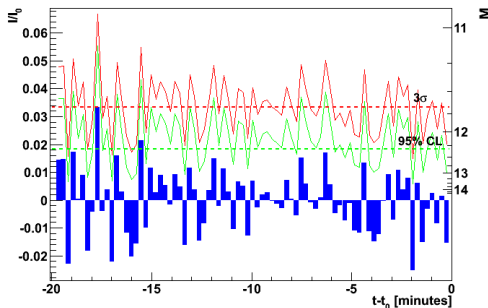
Prekursor "the naked-eye burst"

Najjaśniejszy (optycznie) błysk – GRB080319B – mógł mieć jasny prekursor optyczny:

Aparatura "Pi of the Sky" obserwowała miejsce błysku 20 minut przed eksplozją...
...w rogu klatki – ewentualny prekursor bardzo zniekształcony.

Model wielomianowy został użyty do:

- ▶ poszukiwań prekursora – nie wykryto sygnału powyżej 3σ
- ▶ wyznaczenia bardziej precyzyjnych limitów

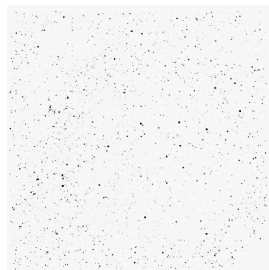
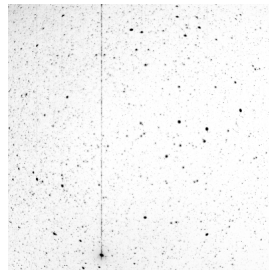


Nowy limit: 12.25^m w porównaniu do 11.5^m . **Poprawa o 0.75^m .**

Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

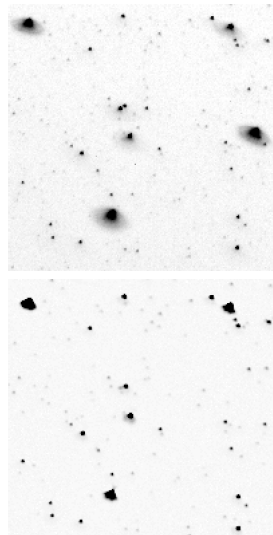
- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd



Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

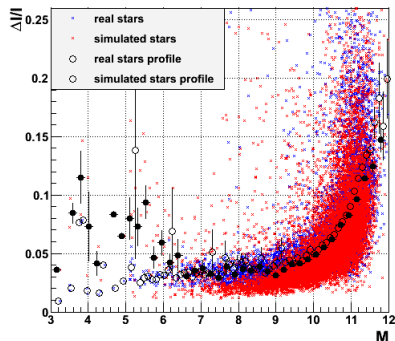
- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy



Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

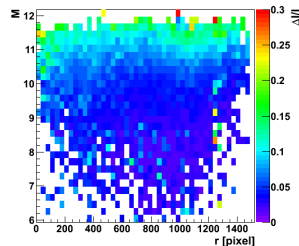
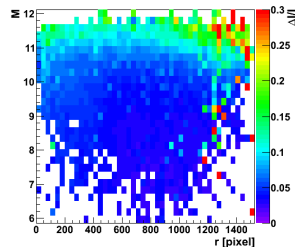
- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy
- ▶ symuluje różne zaburzenia (fluktuacje Poissonowskie, wzmocnienia, odczytu, etc.)
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(M)$



Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

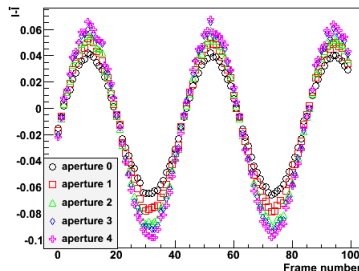
- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy
- ▶ symuluje różne zaburzenia (fluktuacje Poissonowskie, wzmocnienia, odczytu, etc.)
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(M)$
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(r)$



Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy
- ▶ symuluje różne zaburzenia (fluktuacje Poissonowskie, wzmocnienia, odczytu, etc.)
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(M)$
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(r)$
- ▶ symuluje żadaną zmienność gwiazd



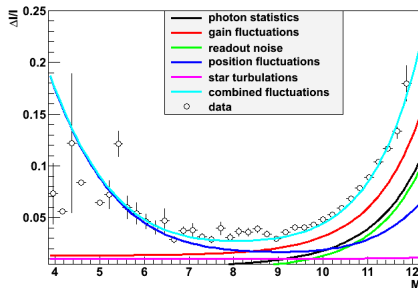
Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy
- ▶ symuluje różne zaburzenia (fluktuacje Poissonowskie, wzmocnienia, odczytu, etc.)
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(M)$
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(r)$
- ▶ symuluje żadaną zmienność gwiazd

Symulatora można użyć do:

- ▶ analizy niepewności pomiaru jasności



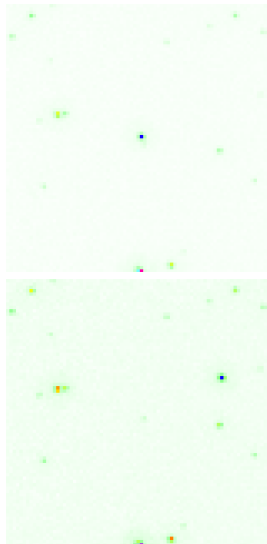
Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy
- ▶ symuluje różne zaburzenia (fluktuacje Poissonowskie, wzmocnienia, odczytu, etc.)
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(M)$
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(r)$
- ▶ symuluje żadaną zmienność gwiazd

Symulatora można użyć do:

- ▶ analizy niepewności pomiaru jasności
- ▶ analizy dokładności określania paralaksy



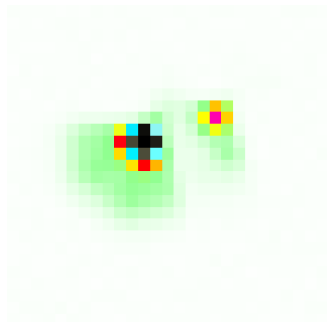
Symulator klatki "Pi of the Sky"

Symulator klatki "Pi of the Sky" oparty na modelu wielomianowym:

- ▶ tworzy klatkę na podstawie katalogowych pozycji i jasności gwiazd
- ▶ uwzględnia PSF gwiazdy
- ▶ symuluje różne zaburzenia (fluktuacje Poissonowskie, wzmocnienia, odczytu, etc.)
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(M)$
 - ▶ poprawnie odtwarza $\frac{\Delta I}{I}(r)$
- ▶ symuluje żadaną zmienność gwiazd

Symulatora można użyć do:

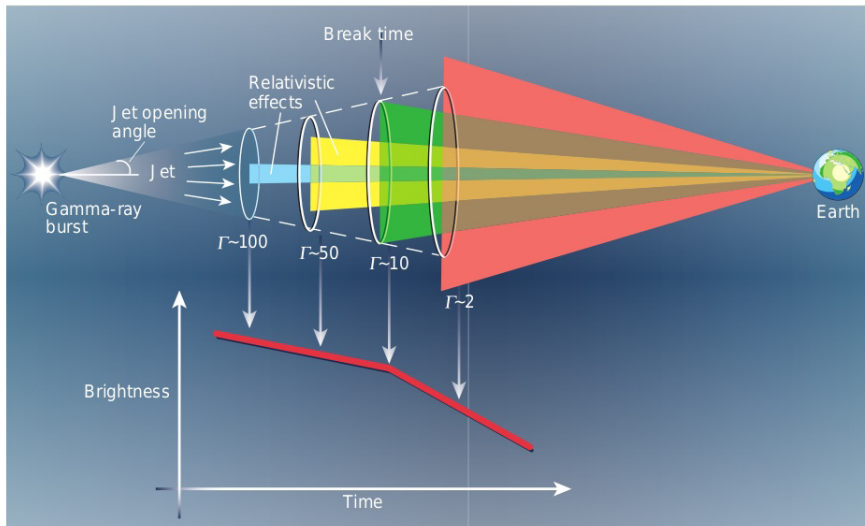
- ▶ analizy niepewności pomiaru jasności
- ▶ analizy dokładności określania paralaksy
- ▶ testowania algorytmów na gęstych polach
- ▶ itp.



Podsumowanie

- ▶ Błyski gamma to jedno z najbardziej energetycznych zjawisk we wszechświecie:
 - ▶ z deficytem (niemalże brakiem) wczesnych pomiarów optycznych
 - ▶ ciągle mało poznanych
- ▶ "Pi of the Sky" to nowe podejście do wczesnych pomiarów optycznych:
 - ▶ eliminacja "czasu martwego"
 - ▶ samodzielne wykrywanie błysków
- ▶ Odkrycie "the naked-eye burst":
 - ▶ potwierdziło słuszność koncepcji oraz dojrzałość zaproponowanych rozwiązań
 - ▶ skłoniło do opracowania modelu odpowiedzi detektora
- ▶ Model odpowiedzi detektora:
 - ▶ dobrze opisuje dane i poprawia niektóre wyniki
 - ▶ poprawia limity jasności niewykrytych źródeł
 - ▶ posłużył do opracowania symulatora klatki – narzędzia z dużymi perspektywami

Załamanie krzywej blasku



Jednostki

▶ $\text{erg} = 10^{-7} \text{ J}$

▶ $m = -2.5 \cdot \log \frac{I}{I_0}$