

# Modelowanie aparatury pomiarowej eksperymentu "Pi of the Sky"

Lech Wiktor Piotrowski  
Eksperyment "Pi of the Sky"

ZCiOF, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Warszawa, 3.XII.2010

- 1 Projekt "Pi of the Sky"
- 2 Kształt obrazu gwiazdy
- 3 Pomiary laboratoryjne
- 4 Parametryzacja odpowiedzi detektora
- 5 Zastosowania

## "Pi of the Sky" – motywacja

### Błyski gamma – Gamma Ray Bursts

Jedne z najbardziej energetycznych eksplozji we Wszechświecie znanych człowiekowi. Prawdopodobnie powstające w skutek zapaści Hipernowej (długie błyski) lub zderzenia dwóch gwiazd neutronowych (krótkie błyski), prowadzących do powstania czarnej dziury.

## "Pi of the Sky" – motywacja

### Błyski gamma – Gamma Ray Bursts

Jedne z najbardziej energetycznych eksplozji we Wszechświecie znanych człowiekowi. Prawdopodobnie powstające w skutek zapaści Hipernowej (długie błyski) lub zderzenia dwóch gwiazd neutronowych (krótkie błyski), prowadzących do powstania czarnej dziury.

(bardzo krótka) Charakterystyka:

- ▶ Odległości: kosmologiczne (max:  $z = 8.2 \simeq 13$  Gly)
- ▶ Promieniowanie: głównie  $\gamma$ , dodatkowo X, optyczne i radiowe
- ▶ Szacunkowa energia (emisja strumieniowa):  $\sim 10^{51}$  erg

## "Pi of the Sky" – motywacja

### Błyski gamma – Gamma Ray Bursts

Jedne z najbardziej energetycznych eksplozji we Wszechświecie znanych człowiekowi. Prawdopodobnie powstające w skutek zapaści Hipernowej (długie błyski) lub zderzenia dwóch gwiazd neutronowych (krótkie błyski), prowadzących do powstania czarnej dziury.

(bardzo krótka) Charakterystyka:

- ▶ Odległości: kosmologiczne (max:  $z = 8.2 \simeq 13$  Gly)
- ▶ Promieniowanie: głównie  $\gamma$ , dodatkowo X, optyczne i radiowe
- ▶ Szacunkowa energia (emisja strumieniowa):  $\sim 10^{51}$  erg

Obserwacje:

- ▶  $\gamma$ : ciągły satelitarny monitoring nieba
- ▶ X, optyczne, radiowe: obserwacje "follow-up" (opóźnione)

## "Pi of the Sky" – motywacja

### Błyski gamma – Gamma Ray Bursts

Jedne z najbardziej energetycznych eksplozji we Wszechświecie znanych człowiekowi. Prawdopodobnie powstające w skutek zapaści Hipernowej (długie błyski) lub zderzenia dwóch gwiazd neutronowych (krótkie błyski), prowadzących do powstania czarnej dziury.

(bardzo krótka) Charakterystyka:

- ▶ Odległości: kosmologiczne (max:  $z = 8.2 \simeq 13$  Gly)
- ▶ Promieniowanie: głównie  $\gamma$ , dodatkowo X, optyczne i radiowe
- ▶ Szacunkowa energia (emisja strumieniowa):  $\sim 10^{51}$  erg

Obserwacje:

- ▶  $\gamma$ : ciągły satelitarny monitoring nieba
- ▶ X, optyczne, radiowe: obserwacje "follow-up" (opóźnione)

**Wyzwanie:** optyczne obserwacje od samego początku  
Kluczowe dla zrozumienia zjawiska błysków gamma.

## "Pi of the Sky" – motywacja

- ▶ Dotychczas zaobserwowano optycznie 3 GRB – **przez przypadek** – w momencie ich powstawania
- ▶ Tylko GRB080319B – rozdzielczość czasowa wystarczająca do badania równoczesności emisji  $\gamma$  i optycznej

## "Pi of the Sky" – motywacja

- ▶ Dotychczas zaobserwowano optycznie 3 GRB – **przez przypadek** – w momencie ich powstawania
- ▶ Tylko GRB080319B – rozdzielczość czasowa wystarczająca do badania równoczesności emisji  $\gamma$  i optycznej

### Problem

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



## "Pi of the Sky" – motywacja

- ▶ Dotychczas zaobserwowano optycznie 3 GRB – **przez przypadek** – w momencie ich powstawania
- ▶ Tylko GRB080319B – rozdzielczość czasowa wystarczająca do badania równoczesności emisji  $\gamma$  i optycznej

### Problem

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



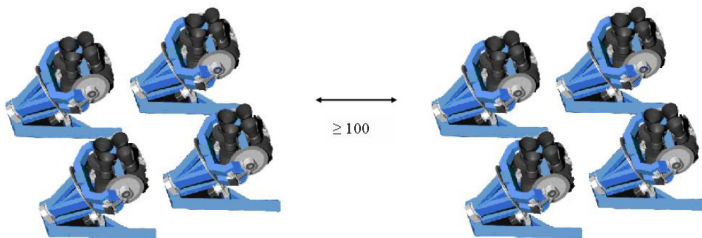
### Rozwiązanie

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

## "Pi of the Sky" – koncepcja projektu

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

- ▶ Pole widzenia:  $1.5 \text{ sr}$  (=SWIFT)
- ▶ Rozdzielczość czasowa:  $10 \text{ s}$
- ▶  $\sim 2000\text{-}3000$  klatek/noc/kamerę
- ▶ Duży strumień danych:  $\sim 1 \text{ TB/noc}$
- ▶ Wykrywanie błysków w czasie rzeczywistym
- ▶ Koincydencja zestawów kamer – odrzucanie błysków satelitów
- ▶ W pełni autonomiczna praca
- ▶ Zasięg  $12^m - 14^m$



## "Pi of the Sky" – status projektu

- 1 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:  $2048 \times 2062$  pikseli, 16 bit ADC, niskoszumowe
  - ▶ Optyka: obiektyw Canon,  $f=85$  mm,  $f/d=1.2$ ,  $\simeq 20^\circ \times 20^\circ$



## "Pi of the Sky" – status projektu

- 1 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:  $2048 \times 2062$  pikseli, 16 bit ADC, niskoszumowe
  - ▶ Optyka: obiektyw Canon,  $f=85$  mm,  $f/d=1.2$ ,  $\simeq 20^\circ \times 20^\circ$

Trwa poprawianie ustawień systemu i dostosowywanie oprogramowania do nowych warunków.



## "Pi of the Sky" – status projektu

- 1 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:  $2048 \times 2062$  pikseli, 16 bit ADC, niskoszumowe
  - ▶ Optyka: obiektyw Canon,  $f=85$  mm,  $f/d=1.2$ ,  $\simeq 20^\circ \times 20^\circ$

Trwa poprawianie ustawień systemu i dostosowywanie oprogramowania do nowych warunków.

- 2 Prototyp w Chile - zbiera dane od lipca 2004



# Prototyp

## ▶ Dwie kamery na paralaktycznym montażu

- ▶ Starszy model aktualnych kamer
- ▶ CCD, elektronika:  $2048 \times 2062$  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 wiosny 2010: buda ASAS, Las Campanas Observatory – Carnegie Institution of Washington, pustynia Atacama, Chile
- ▶ od wiosny 2011: San Pedro de Atacama Observatory, Chile



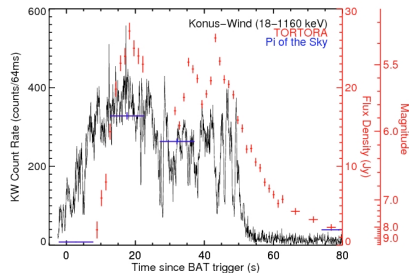
# Prototyp

- ▶ Dwie kamery na paralaktycznym montażu
  - ▶ Starszy model aktualnych kamer
  - ▶ CCD, elektronika:  $2048 \times 2062$  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 wiosny 2010: buda ASAS, Las Campanas Observatory – Carnegie Institution of Washington, pustynia Atacama, Chile
  - ▶ od wiosny 2011: San Pedro de Atacama Observatory, Chile
- ▶ Wyniki: odkrycia gwiazd nowych, rozbłyskowych, analiza innych gwiazd zmiennych, obserwacja blazaru, limity na błyski gamma, odkrycie najjaśniejszego GRB w historii...



## "The naked-eye burst" – GRB080319B

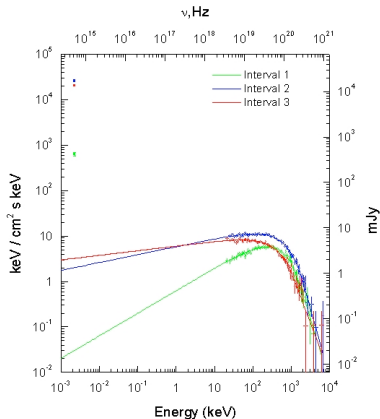
- ▶ Najjaśniejszy optycznie i rentgenowsko GRB
- ▶ Odległość:  $z=0.97$  ( $\approx 7.5$  Gly)
- ▶ Korelacja pików optycznych i  $\gamma$





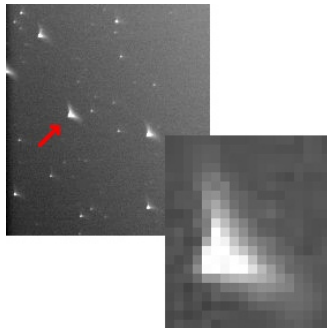
## "The naked-eye burst" – GRB080319B

- ▶ Najjaśniejszy optycznie i rentgenowo GRB
- ▶ Odległość:  $z=0.97$  ( $\approx 7.5$  Gly)
- ▶ Korelacja pików optycznych i  $\gamma$
- ▶ Różnica strumieni – inne mechanizmy produkcji prom. widzialnego i  $\gamma$



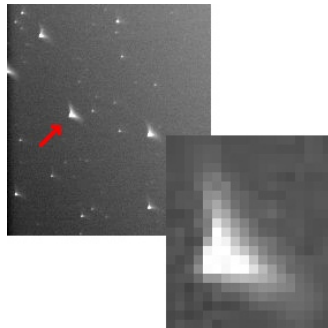
## "The naked-eye burst" – GRB080319B

- ▶ Najjaśniejszy optycznie i rentgenowsko GRB
- ▶ Odległość:  $z=0.97$  ( $\approx 7.5$  Gly)
- ▶ Korelacja pików optycznych i  $\gamma$
- ▶ Różnica strumieni – inne mechanizmy produkcji prom. widzialnego i  $\gamma$
- ▶ Pierwsza ekspozycja "Pi" z błyskiem – 2.25 s przed trygerem



## "The naked-eye burst" – GRB080319B

- ▶ Najjaśniejszy optycznie i rentgenowsko GRB
- ▶ Odległość:  $z=0.97$  ( $\approx 7.5$  Gly)
- ▶ Korelacja pików optycznych i  $\gamma$
- ▶ Różnica strumieni – inne mechanizmy produkcji prom. widzialnego i  $\gamma$
- ▶ Pierwsza ekspozycja "Pi" z błyskiem – 2.25 s przed trygerem



Bardzo duże pole widzenia

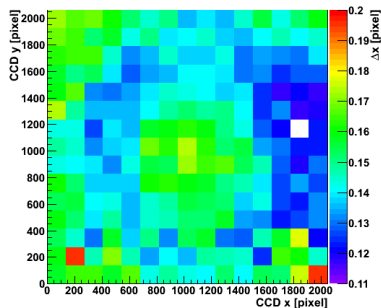
⇒

Bardzo duże zniekształcenia obrazu przy krawędziach klatki

## Skutki zniekształceń obrazu

Dla zniekształconych gwiazd:

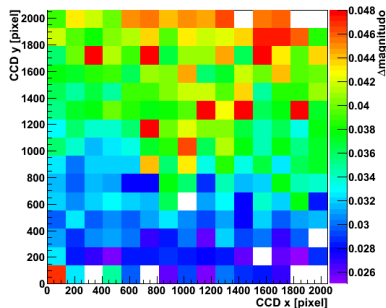
- ▶ duża niepewność pomiaru pozycji gwiazdy – astrometrii



## Skutki zniekształceń obrazu

Dla zniekształconych gwiazd:

- ▶ duża niepewność pomiaru pozycji gwiazdy – astrometrii
- ▶ duża niepewność pomiaru jasności gwiazdy – fotometrii



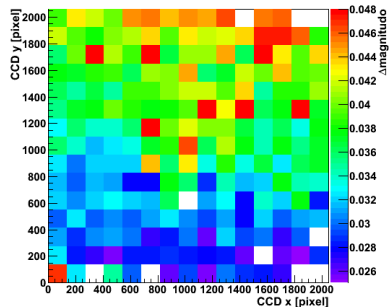
## Skutki zniekształceń obrazu

Dla zniekształconych gwiazd:

- ▶ duża niepewność pomiaru pozycji gwiazdy – astrometrii
- ▶ duża niepewność pomiaru jasności gwiazdy – fotometrii

Jak rozwiązać ten problem:

- ▶ odrzucać zniekształcone gwiazdy (stosowalne tylko do obiektów o dużej statystyce)
- ▶ **sparametryzować zniekształcenia**



## PSF – funkcja rozmycia punktu

Obraz obiektu na ekranie/klatce – funkcja rozmycia punktu (ang. point spread function – PSF)

- ▶ Powstawanie obrazu (ogólnie): teoria dyfrakcji światła
- ▶ Uproszczenia do analizy PSF:
  - ▶ wektorowa teoria dyfrakcji
  - ▶ skalarna teoria dyfrakcji  
→ wyrażenie Rayleigha-Sommerfelda

$$PSF(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) \frac{ze^{ikr}}{r^2} dx dy \right|^2$$

$U(x, y, 0)$  - amplituda fali na aperturze,  $x, y$  - współrzędne na aperturze,  $x_0, y_0$  - współrzędne na ekranie,  $z$  - odległość apertura-ekran,  $r$  - odległość  $(x, y, 0)$  od  $(x_0, y_0, z)$ ,  $\lambda$  - długość fali

## PSF – funkcja rozmycia punktu

Obraz obiektu na ekranie/klatce – funkcja rozmycia punktu (ang. point spread function – PSF)

- ▶ Powstawanie obrazu (ogólnie): teoria dyfrakcji światła
- ▶ Uproszczenia do analizy PSF:
  - ▶ wektorowa teoria dyfrakcji
  - ▶ skalarna teoria dyfrakcji  
→ wyrażenie Rayleigha-Sommerfelda
  - ▶ przybliżenie Kirchhoffa

$\pm\infty \rightarrow$  apertura

$$PSF(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikr}}{r^2} dx dy \right|^2$$

$U(x, y, 0)$  - amplituda fali na aperturze,  $x, y$  - współrzędne na aperturze,  $x_0, y_0$  - współrzędne na ekranie,  $z$  - odległość apertura-ekran,  $r$  - odległość  $(x, y, 0)$  od  $(x_0, y_0, z)$ ,  $\lambda$  - długość fali



## PSF – funkcja rozmycia punktu

Obraz obiektu na ekranie/klatce – funkcja rozmycia punktu (ang. point spread function – PSF)

- ▶ Powstawanie obrazu (ogólnie): teoria dyfrakcji światła
- ▶ Uproszczenia do analizy PSF:
  - ▶ wektorowa teoria dyfrakcji
  - ▶ skalarna teoria dyfrakcji  
→ wyrażenie Rayleigha-Sommerfelda
  - ▶ przybliżenie Kirchhoffa
  - ▶ przybliżenie Fresnela

$$|z| \gg L_1 + L_2$$

$L_1$  – rozmiar apertury,  
 $L_2$  – rozmiar ekranu

$$PSF(x_0, y_0, z) = \left| \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_A U(x, y, 0) e^{\frac{i\pi}{\lambda z}((x_0-x)^2 + (y_0-y)^2)} dx dy \right|^2$$

$U(x, y, 0)$  - amplituda fali na aperturze,  $x, y$  - współrzędne na aperturze,  $x_0, y_0$  - współrzędne na ekranie,  $z$  – odległość apertura-ekran,  $r$  - odległość  $(x, y, 0)$  od  $(x_0, y_0, z)$ ,  $\lambda$  - długość fali

## PSF – funkcja rozmycia punktu

Obraz obiektu na ekranie/klatce – funkcja rozmycia punktu (ang. point spread function – PSF)

- ▶ Powstawanie obrazu (ogólnie): teoria dyfrakcji światła
- ▶ Uproszczenia do analizy PSF:
  - ▶ wektorowa teoria dyfrakcji
  - ▶ skalarna teoria dyfrakcji  
→ wyrażenie Rayleigha-Sommerfelda
  - ▶ przybliżenie Kirchhoffa
  - ▶ przybliżenie Fresnela
  - ▶ przybliżenie Fraunhofera

$$z \gg \frac{kL_1^2}{2}$$

$L_1$  – rozmiar apertury

$$PSF(x_0, y_0, z) = \left| \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{\frac{ik}{2z}(x_0^2 + y_0^2)} \iint_A U(x, y, 0) e^{\frac{i2\pi}{\lambda z}(x_0x + y_0y)} dx dy \right|^2$$

$U(x, y, 0)$  - amplituda fali na aperturze,  $x, y$  - współrzędne na aperturze,  $x_0, y_0$  - współrzędne na ekranie,  $z$  - odległość apertura-ekran,  $r$  - odległość  $(x, y, 0)$  od  $(x_0, y_0, z)$ ,  $\lambda$  - długość fali

## PSF – funkcja rozmycia punktu

Obraz obiektu na ekranie/klatce – funkcja rozmycia punktu (ang. point spread function – PSF)

- ▶ Powstawanie obrazu (ogólnie): teoria dyfrakcji światła
- ▶ Uproszczenia do analizy PSF:
  - ▶ wektorowa teoria dyfrakcji
  - ▶ skalarna teoria dyfrakcji  
→ wyrażenie Rayleigha-Sommerfelda
  - ▶ przybliżenie Kirchhoffa
  - ▶ przybliżenie Fresnela
  - ▶ przybliżenie Fraunhofera

$$z \sim L_1, L_2$$

w "Pi of the Sky"

$$PSF(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikr}}{r^2} dx dy \right|^2$$

$U(x, y, 0)$  - amplituda fali na aperturze,  $x, y$  - współrzędne na aperturze,  $x_0, y_0$  - współrzędne na ekranie,  $z$  - odległość apertura-ekran,  $r$  - odległość  $(x, y, 0)$  od  $(x_0, y_0, z)$ ,  $\lambda$  - długość fali

## PSF – funkcja rozmycia punktu (2)

Rzeczywisty układ optyczny – aberracje optyczne frontu falowego

$$PSF_L(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikrW(x,y)}}{r^2} dx dy \right|^2$$

Podział Seidla:

- ▶ rozogniskowanie



## PSF – funkcja rozmycia punktu (2)

Rzeczywisty układ optyczny – aberracje optyczne frontu falowego

$$PSF_L(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikrW(x,y)}}{r^2} dx dy \right|^2$$

Podział Seidla:

- ▶ rozogniskowanie
- ▶ coma



$$W_C(\rho, \phi) = C\rho^3 \cos(\theta)$$

## PSF – funkcja rozmycia punktu (2)

Rzeczywisty układ optyczny – aberracje optyczne frontu falowego

$$PSF_L(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikrW(x,y)}}{r^2} dx dy \right|^2$$

Podział Seidla:

- ▶ rozogniskowanie
- ▶ coma
- ▶ astygmatyzm



$$W_A(\rho, \phi) = A\rho^2 \cos(2\theta)$$

## PSF – funkcja rozmycia punktu (2)

Rzeczywisty układ optyczny – aberracje optyczne frontu falowego

$$PSF_L(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikrW(x,y)}}{r^2} dx dy \right|^2$$

Podział Seidla:

- ▶ rozogniskowanie
- ▶ coma
- ▶ astygmatyzm
- ▶ aberracja sferyczna (rozogniskowanie wyższych rzędów)



$$W_S(\rho, \phi) = S\rho^4$$

## PSF – funkcja rozmycia punktu (2)

Rzeczywisty układ optyczny – aberracje optyczne frontu falowego

$$PSF_L(x_0, y_0, z) = \left| \frac{1}{i\lambda} \iint_A U(x, y, 0) \frac{ze^{ikrW(x,y)}}{r^2} dx dy \right|^2$$

Podział Seidla:

- ▶ rozogniskowanie
- ▶ coma
- ▶ astygmatyzm
- ▶ aberracja sferyczna (rozogniskowanie wyższych rzędów)
- ▶ wyższe rzędy, inne aberracje i superpozycja



$$W = W_C + W_A + W_S + \dots$$



## PSF – funkcja rozmycia punktu (3)

Zazwyczaj stosowana parametryzacja wielomianami Zernike'a (ortogonalne, dobre do dopasowań):

$$Z(\rho, \phi) = \sum_{n \geq m} Z_n^m(\rho, \phi) + \sum_{n \geq m} Z_n^{-m}(\rho, \phi)$$

$$Z_n^m(\rho, \phi) = R_n^m(\rho) \cos(m\phi), \quad Z_n^{-m}(\rho, \phi) = R_n^m(\rho) \sin(m\phi)$$

$$R_n^m = \sum_{k=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! ((n+m)/2 - k)! ((n-m)/2 - k)!} \rho^{n-2k}$$

$$n, m > 0, \quad n \geq m, \quad 0 \leq \rho \leq 1$$

## PSF na sensorze CCD

Obraz powstający na klatce: konwolucja PSF ( $PSF_L$ ) i funkcji odpowiedzi matrycy CCD ( $PRF$ ):

$$PSF(x_0, y_0) = \iint_{CCD} PSF_L(x'_0, y'_0) PRF(x'_0, y'_0) dx'_0 dy'_0$$

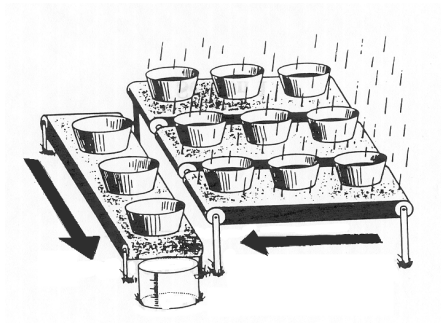
## PSF na sensorze CCD

Obraz powstający na klatce: konwolucja PSF ( $PSF_L$ ) i funkcji odpowiedzi matrycy CCD ( $PRF$ ):

$$PSF(x_0, y_0) = \iint_{CCD} PSF_L(x'_0, y'_0) PRF(x'_0, y'_0) dx'_0 dy'_0$$

Funkcja odpowiedzi matrycy:

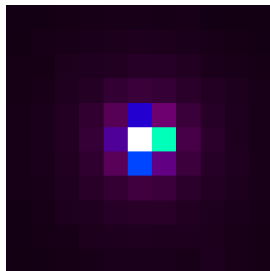
- ▶ ograniczenia geometryczne
- ▶ funkcja odpowiedzi piksela
  - ▶ przestrzenna
  - ▶ energetyczna
- ▶ szumy elektroniki



## Metoda parametryzacji PSF

Standardowa metoda wyznaczania kształtu PSF:

- ▶ stworzenie profilu wysokiej rozdzielczości  
← nałożenie wielu obrazów gwiazd(y)
- ▶ dopasowanie parametrów kształtu (profil Gaussa, Voigta, Moffata itp.)



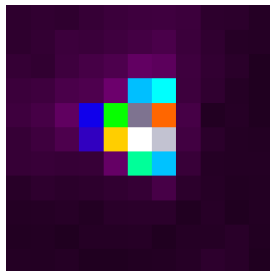
## Metoda parametryzacji PSF

Standardowa metoda wyznaczania kształtu PSF:

- ▶ stworzenie profilu wysokiej rozdzielczości  
← nałożenie wielu obrazów gwiazd(y)
- ▶ dopasowanie parametrów kształtu (profil Gaussa, Voigta, Moffata itp.)

Problemy tej metody w "Pi of the Sky":

- ▶ szukanie kształtu, a nie dopasowanie parametrów znanego
- ▶ słabe nakładanie gwiazd – trudne wyznaczenie środka dla zniekształconych obrazów
- ▶ wpływ niemonochromatyczności gwiazd
- ▶ rozmycie obrazu - ruch montażu, fluktuacje itp.



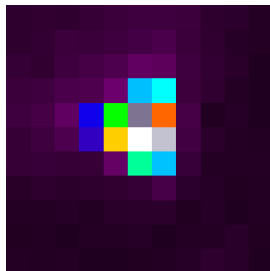
## Metoda parametryzacji PSF

Standardowa metoda wyznaczania kształtu PSF:

- ▶ stworzenie profilu wysokiej rozdzielczości  
← nałożenie wielu obrazów gwiazd(y)
- ▶ dopasowanie parametrów kształtu (profil Gaussa, Voigta, Moffata itp.)

Problemy tej metody w "Pi of the Sky":

- ▶ szukanie kształtu, a nie dopasowanie parametrów znanego
- ▶ słabe nakładanie gwiazd – trudne wyznaczenie środka dla zniekształconych obrazów
- ▶ wpływ niemonochromatyczności gwiazd
- ▶ rozmycie obrazu - ruch montażu, fluktuacje itp.



**Rozwiązanie:** pomiary laboratoryjne

## Układ laboratoryjny

### Gwiazda

z Ziemi (oprócz Słońca) – źródło punktowe

### Źródło punktowe

obraz źródła znacznie mniejszy niż rozdzielczość  
kątowna wynikająca z rozmiarów piksela

## Układ laboratoryjny

### Gwiazda

z Ziemi (oprócz Słońca) – źródło punktowe



Light source,  
 $\phi=0.4$  mm

### Źródło punktowe

obraz źródła znacznie mniejszy niż rozdzielczość  
kątowna wynikająca z rozmiarów piksela

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
  - ▶ przykryta aperturą 0.1-0.4 mm
  - ▶ zasilana generatorem impulsów
  - ▶ umieszczona na ruchomym montażu



## Układ laboratoryjny

### Gwiazda

z Ziemi (oprócz Słońca) – źródło punktowe

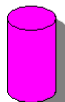


Light source,  
 $\phi=0.4$  mm

### Źródło punktowe

obraz źródła znacznie mniejszy niż rozdzielczość  
kątowna wynikająca z rozmiarów piksela

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
  - ▶ przykryta aperturą 0.1-0.4 mm
  - ▶ zasilana generatorem impulsów
  - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera



Lenses,  
 $f=85$  mm



CCD,  
pixel: 15x15  $\mu\text{m}$

## Układ laboratoryjny

### Gwiazda

z Ziemi (oprócz Słońca) – źródło punktowe

### Źródło punktowe

obraz źródła znacznie mniejszy niż rozdzielczość kątowna wynikająca z rozmiarów piksela

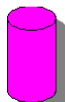
- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
  - ▶ przykryta aperturą 0.1-0.4 mm
  - ▶ zasilana generatorem impulsów
  - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera
- ▶ odległość 22 m



Light source,  
 $\phi=0.4$  mm



d=22 m



Lenses,  
f=85 mm



CCD,  
pixel: 15x15  $\mu$ m

## Układ laboratoryjny

### Gwiazda

z Ziemi (oprócz Słońca) – źródło punktowe

### Źródło punktowe

obraz źródła znacznie mniejszy niż rozdzielczość kątowna wynikająca z rozmiarów piksela

- ▶ źródło światła: dioda LED (kolorowa lub biała)
  - ▶ przykryta aperturą 0.1-0.4 mm
  - ▶ zasilana generatorem impulsów
  - ▶ umieszczona na ruchomym montażu
- ▶ kamera
- ▶ odległość 22 m

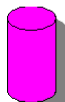
Spełnia warunki źródła punktowego.



Light source,  
 $\phi=0.4$  mm



d=22 m



Lenses,  
f=85 mm



CCD,  
pixel: 15x15  $\mu$ m

## Układ laboratoryjny (2)

Geometryczny rozmiar plamki:  $< 0.1$  rozmiaru piksela...

## Układ laboratoryjny (2)

**Geometryczny rozmiar plamki:**  $< 0.1$  rozmiaru piksela...

...PSF – znacznie większy od piksela

- ▶ Układ odpowiedni do badania PSF
- ▶ PSF zbyt duży do wyznaczenia profilu odpowiedzi pojedynczego piksela

Jak zmniejszyć PSF?

## Układ laboratoryjny (2)

**Geometryczny rozmiar plamki:**  $< 0.1$  rozmiaru piksela...

...PSF – znacznie większy od piksela

- ▶ Układ odpowiedni do badania PSF
- ▶ PSF zbyt duży do wyznaczenia profilu odpowiedzi pojedynczego piksela

Jak zmniejszyć PSF?

- ▶ zastosować przesłonę  $\rightarrow$  rozmiar plamki ograniczony dyfrakcyjnie

Rozmiar przesłony [mm]	Światło czerwone $\Delta_{CCD}$	Światło niebieskie $\Delta_{CCD}$
40	0.1	0.07
20	0.2	0.14
10	0.4	0.27

Kompromis rozmiaru PSF i rozmiaru dyfrakcyjnego: przesłona 20 mm.

## Przestrzenna funkcja odpowiedzi piksela

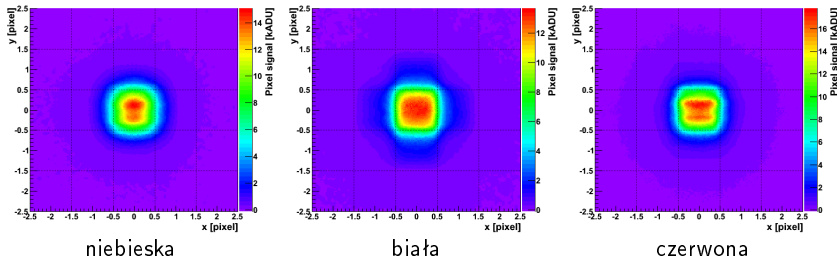
Sygnał wywołany przez źródło w pojedynczym badanym pikselu w zależności od położenia względem krawędzi piksela.

**Idealny przypadek:** stała w pikselu, zerowa poza pikselem.

## Przestrzenna funkcja odpowiedzi piksela

Sygnal wywołany przez źródło w pojedynczym badanym pikselu w zależności od położenia względem krawędzi piksela.

**Idealny przypadek:** stała w pikselu, zerowa poza pikselem.



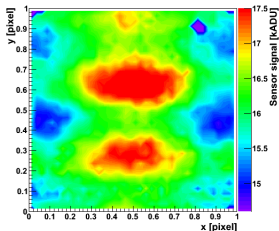
**Rzeczywisty przypadek:**

- ▶ niejednorodna w pikselu – czułość piksela zależna od jego “budowy”
- ▶ opadająca przy krawędziach piksela – wpływ skończonych rozmiarów plamki
- ▶ niezerowa poza pikselem – wpływ rozmiarów PSF lub dyfuzja ładunku między pikselami

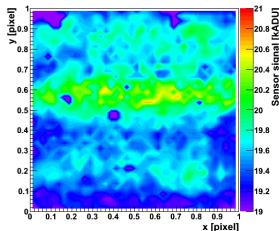


## Przestrzenna funkcja czułości piksela

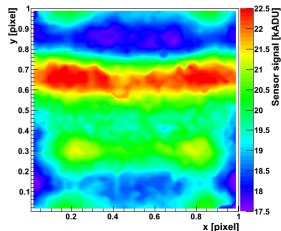
Sumaryczny sygnał wywołany przez źródło w zależności od położenia względem krawędzi piksela.



niebieska



biała



czerwona

Widoczna struktura elektrod:

- ▶ odpowiedź zależy od koloru – różne głębokości penetracji fotonów
- ▶ powoduje zmianę sygnału przy ruchu obrazu względem piksela

## Energetyczna funkcja odpowiedzi piksela

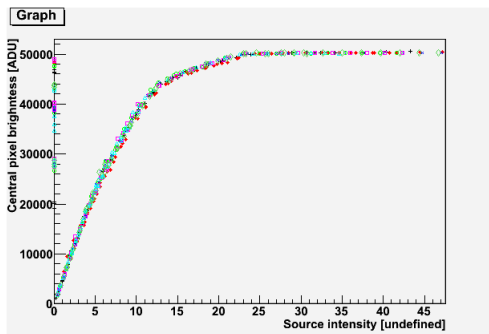
**Idealny przypadek:** odpowiedź piksela liniowo zależy od intensywności padającego światła

## Energetyczna funkcja odpowiedzi piksela

**Idealny przypadek:** odpowiedź piksela liniowo zależy od intensywności padającego światła

Rzeczywisty przypadek:

- ▶ nasycenie piksela dla dużych intensywności – głębokość studni potencjału



## Energetyczna funkcja odpowiedzi piksela

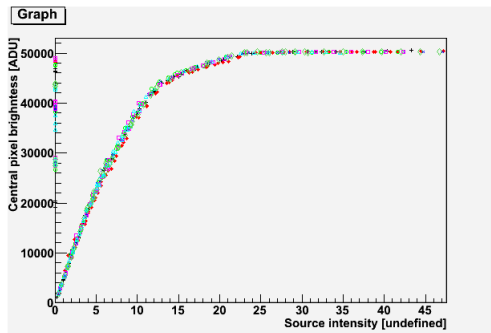
**Idealny przypadek:** odpowiedź piksela liniowo zależy od intensywności padającego światła

Rzeczywisty przypadek:

- ▶ nasycenie piksela dla dużych intensywności – głębokość studni potencjału
- ▶ nieliniowość funkcji powyżej  $\sim 18000$  ADU<sup>a</sup> – nieliniowość wzmacniacza

---

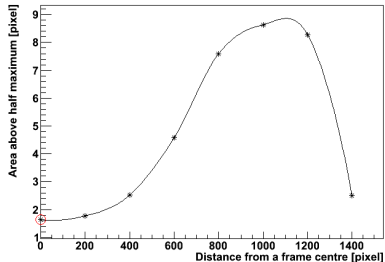
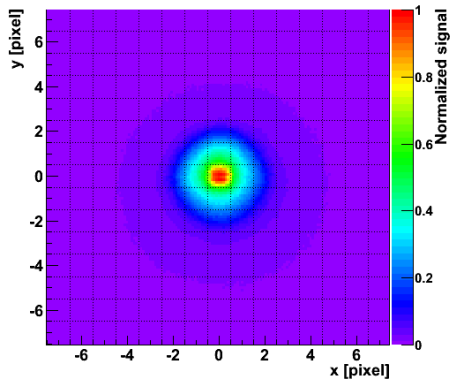
<sup>a</sup>1 ADU  $\sim 2$  e



Nieliniowość komplikuje obliczenia, ale zwiększa zakres czułości CCD.

# Rekonstrukcja PSF

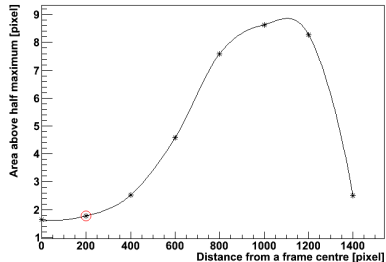
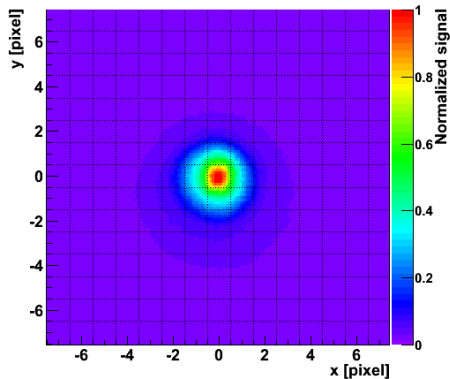
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

# Rekonstrukcja PSF

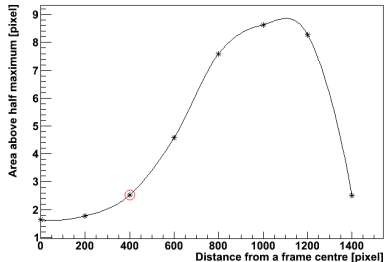
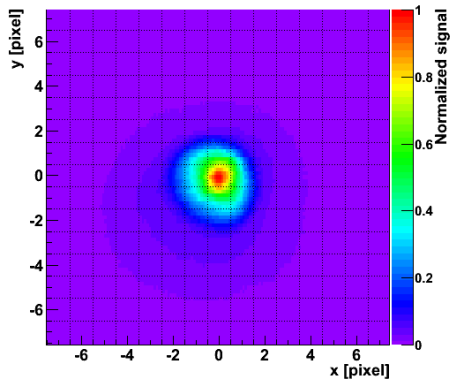
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

# Rekonstrukcja PSF

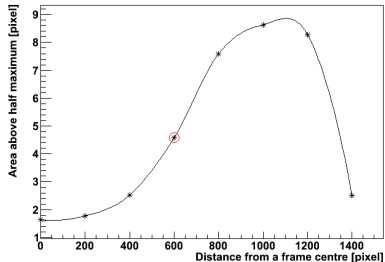
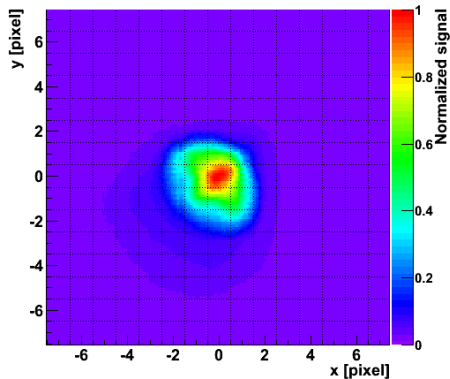
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

# Rekonstrukcja PSF

PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.

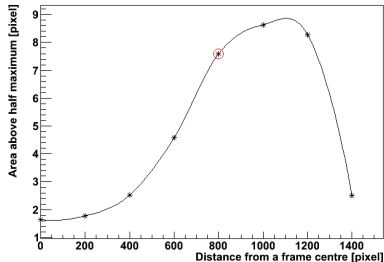
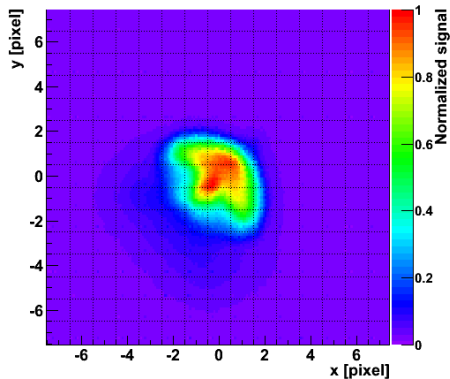


Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.



# Rekonstrukcja PSF

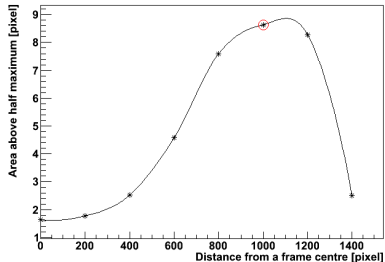
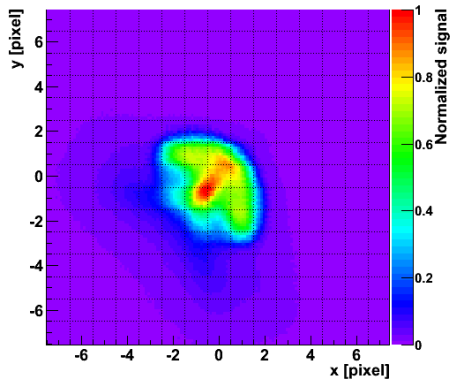
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

# Rekonstrukcja PSF

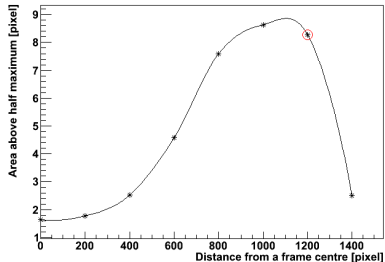
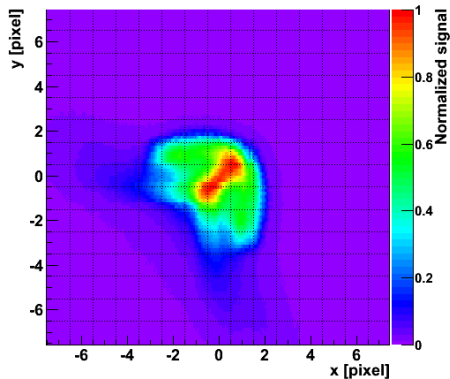
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

# Rekonstrukcja PSF

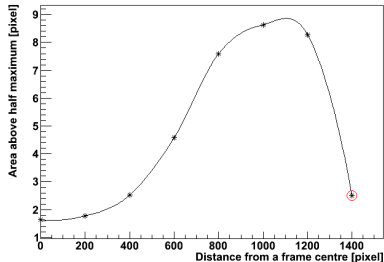
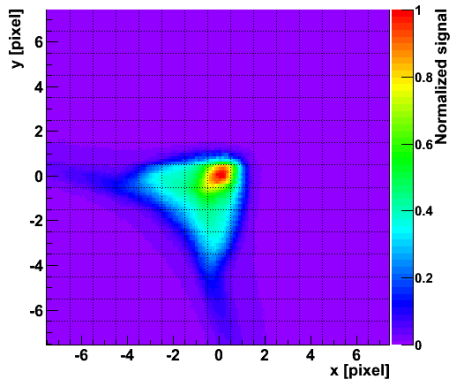
PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

# Rekonstrukcja PSF

PSF wysokiej rozdzielczości – złożenie zdjęć wykonanych na siatce  $20 \times 20$  położeń na pikselu.



Powierzchnia na klatce ponad połowę maksimum sygnału.

## Model dyfrakcyjny

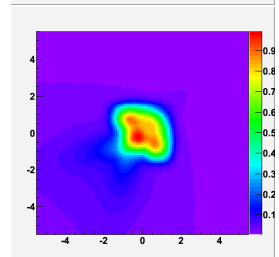
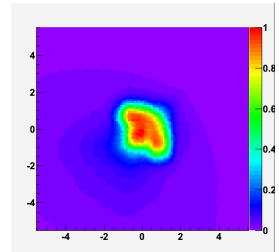
Dopasowanie parametrów do wzoru Rayleigha-Sommerfelda z aberracjami.

Wady:

- ▶ bardzo obciążające obliczenia
- ▶ uproszczenie rzeczywistego obrazu

Dopasowanie przeprowadzono przy użyciu 11 wolnych parametrów:

- ▶ **aberracji:** coma, coma', astygmatyzm, ab. sfer, ab. sfer', trefoil
- ▶ **współrzędnych obrazu:**  $(x_0, y_0, z)$
- ▶ tła i współczynnika skalowania



## Model wielomianowy – definicja

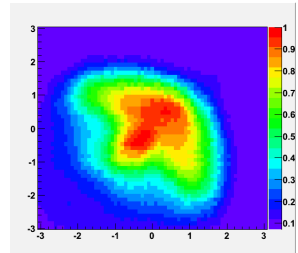
Efektywny model skupiający się na kształcie PSF a nie na "fizyce" jej powstawania.

Parametryzacja w przestrzeni obrazu (nie apertury):

- ▶ Mniej skomplikowany opis
- ▶ Dużo szybsze obliczenia

Wybrana baza – zmodyfikowane wielomiany Zernike'go:

- ▶ skończona apertura → nieskończony obraz



$$Z(r, \phi) \rightarrow Z(u, \phi), \quad u = 1 - e^{-\lambda}$$

## Model wielomianowy – definicja

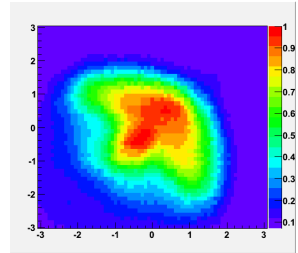
Efektywny model skupiający się na kształcie PSF a nie na "fizyce" jej powstawania.

Parametryzacja w przestrzeni obrazu (nie apertury):

- ▶ Mniej skomplikowany opis
- ▶ Dużo szybsze obliczenia

Wybrana baza – zmodyfikowane wielomiany Zernike'go:

- ▶ skończona apertura → nieskończony obraz
- ▶ asymptotyczne dążenie do zera w nieskończoności



$$PSF_L(r, \phi) = e^{-\frac{0.5}{\lambda} \cdot Z(u, \phi) \cdot r^P}$$

## Model wielomianowy – definicja

Efektywny model skupiający się na kształcie PSF a nie na "fizyce" jej powstawania.

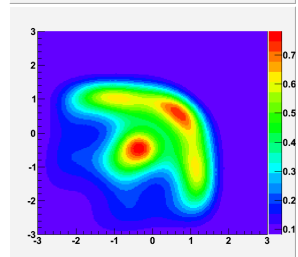
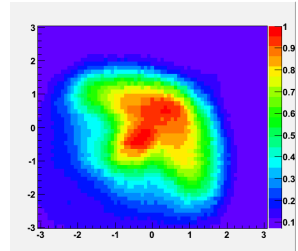
Parametryzacja w przestrzeni obrazu (nie apertury):

- ▶ Mniej skomplikowany opis
- ▶ Dużo szybsze obliczenia

Wybrana baza – zmodyfikowane wielomiany Zernike'go:

- ▶ skończona apertura → nieskończony obraz
- ▶ asymptotyczne dążenie do zera w nieskończoności
- ▶ tylko symetryczne wyrazy

$$PSF_L(r, \phi) = e^{-\frac{0.5}{\lambda}} \cdot Z(u, \phi) \cdot r^P$$





## Model wielomianowy – definicja

Efektywny model skupiający się na kształcie PSF a nie na "fizyce" jej powstawania.

Parametryzacja w przestrzeni obrazu (nie apertury):

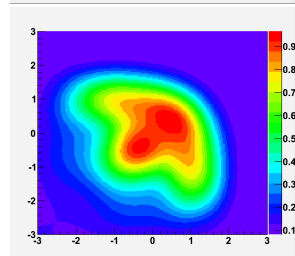
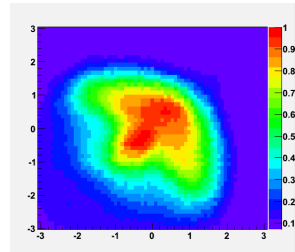
- ▶ Mniej skomplikowany opis
- ▶ Dużo szybsze obliczenia

Wybrana baza – zmodyfikowane wielomiany Zernike'go:

- ▶ skończona apertura → nieskończony obraz
- ▶ asymptotyczne dążenie do zera w nieskończoności
- ▶ tylko symetryczne wyrazy

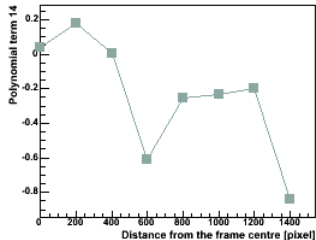
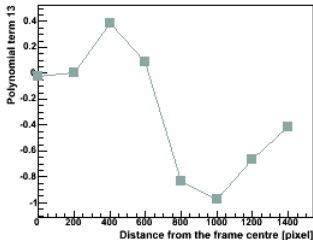
+ konwolucja z CCD

$$PSF(r, \phi) = \iint_{CCD} PRF(r', \phi') \cdot PSF_L(r', \phi') dr' d\phi'$$



## Model wielomianowy – interpolacja parametrów

Zależności wartości parametrów (współczynników wielomianu) od odległości od środka klatki:



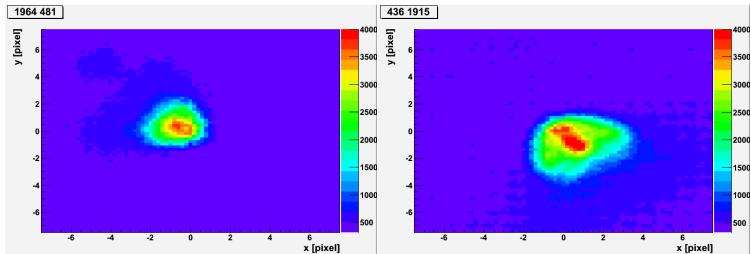
Niestety, mimo rozmaitych prób nie udało się znaleźć analitycznej interpolacji.

- ▶ brak interpretacji fizycznej
- ▶ niedoskonała interpolacja liniowa

## Model wielomianowy – dla rzeczywistych gwiazd

PSFy rzeczywistych gwiazd:

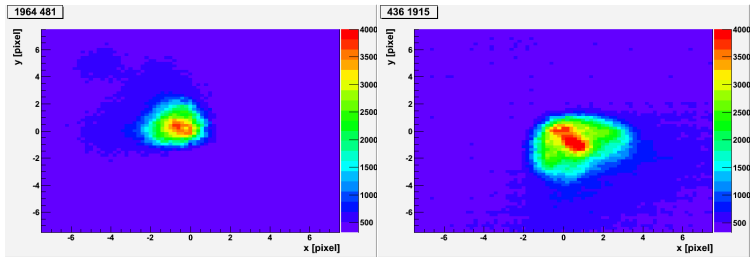
- ▶ różnią się od PSF diody (inne ogniskowanie)
- ▶ wyraźnie zależą od kąta (wada kamery?)



## Model wielomianowy – dla rzeczywistych gwiazd

PSFy rzeczywistych gwiazd:

- ▶ różnią się od PSF diody (inne ogniskowanie)
- ▶ wyraźnie zależą od kąta (wada kamery?)



Procedura:

- 1 rekonstrukcja za pomocą PSF diody
- 2 ponowne dopasowanie parametrów wielomianu

## Możliwe zastosowania modelu

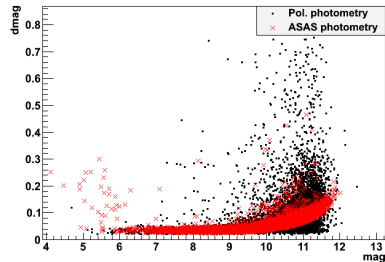
Uzyskany model wielomianowy można (próbować) zastosować m. in. do:

- ▶ fotometrii i astrometrii profilowej
- ▶ poszukiwań źródeł na granicy widzialności
- ▶ wyznaczania dokładniejszych limitów
- ▶ oceny typu widmowego źródeł
- ▶ realistycznej symulacji klatki "Pi of the Sky"

## Fotometria profilowa – model wielomianowy

Porównanie z fotometrią aperturową ASAS:

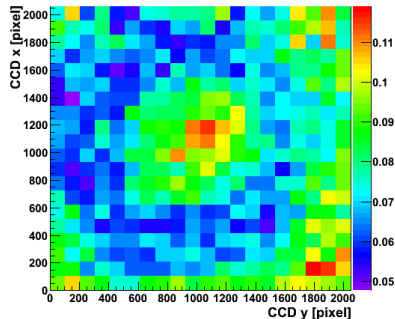
- ▶ ogólne zachowanie podobne
- ▶ większa niestabilność (spodziewane)
- ▶ nieco lepsze wyniki dla b. jasnych gwiazd



## Fotometria profilowa – model wielomianowy

Porównanie z fotometrią aperturową ASAS:

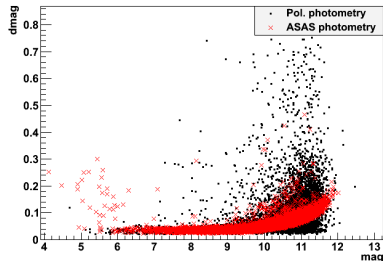
- ▶ ogólne zachowanie podobne
- ▶ większa niestabilność (spodziewane)
- ▶ nieco lepsze wyniki dla b. jasnych gwiazd
- ▶ wyraźniejsza zależność od położenia na klatce



## Fotometria profilowa – model wielomianowy

Porównanie z fotometrią aperturową ASAS:

- ▶ ogólne zachowanie podobne
- ▶ większa niestabilność (spodziewane)
- ▶ nieco lepsze wyniki dla b. jasnych gwiazd
- ▶ wyraźniejsza zależność od położenia na klatce
- ▶ brak ogólnej poprawy





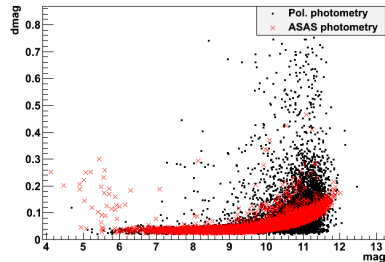
## Fotometria profilowa – model wielomianowy

Porównanie z fotometrią aperturową ASAS:

- ▶ ogólne zachowanie podobne
- ▶ większa niestabilność (spodziewane)
- ▶ nieco lepsze wyniki dla b. jasnych gwiazd
- ▶ wyraźniejsza zależność od położenia na klatce
- ▶ brak ogólnej poprawy

Brak ogólnej poprawy może być spowodowany:

- ▶ innymi gwiazdami zakłócającymi pojedyncze dopasowanie
- ▶ zdominowaniem niepewności przez rzeczywiste fluktuacje (a nie kształt)
- ▶ uniwersalnością kolistej apertury (mało prawdopodobne)



## Poszukiwania prekursora GRB080319B

Najjaśniejszy błysk mógł być poprzedzony jasnym prekursorem optycznym.

"Pi of the Sky" obserwował miejsce błysku przez 20 minut przed eksplozją...

## Poszukiwania prekursora GRB080319B

Najjaśniejszy błysk mógł być poprzedzony jasnym prekursorem optycznym.

"Pi of the Sky" obserwował miejsce błysku przez 20 minut przed eksplozją...  
...w rogu klatki.

Jeżeli kształt **ma** wpływ na ocenę sygnału, to omawianych modeli PSF można użyć do:

- ▶ skuteczniejszego (niż za pomocą apertury i kolistych profili) poszukiwania sygnału od prekursora
- ▶ wyznaczenia dokładniejszego limitu

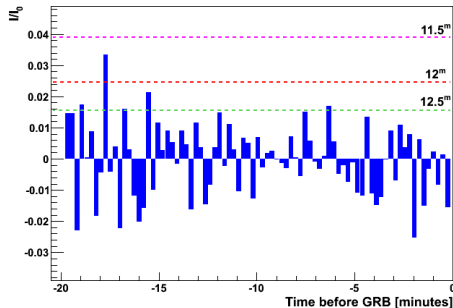
## Poszukiwania prekursora GRB080319B

Najjaśniejszy błysk mógł być poprzedzony jasnym prekursorem optycznym.

"Pi of the Sky" obserwował miejsce błysku przez 20 minut przed eksplozją...  
...w rogu klatki.

Jeżeli kształt **ma** wpływ na ocenę sygnалу, to omawianych modeli PSF można użyć do:

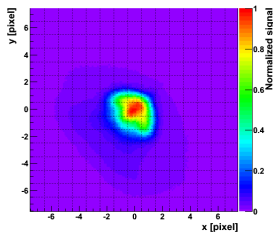
- ▶ skuteczniejszego (niż za pomocą apertury i kolistych profili) poszukiwania sygnалу od prekursora
- ▶ wyznaczenia dokładniejszego limitu



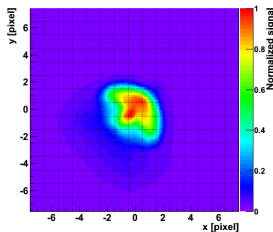
Niestety nie udało się znaleźć równoczesnego sygnалу na obu kamerach.

# Ocena typu widmowego GRB080319B

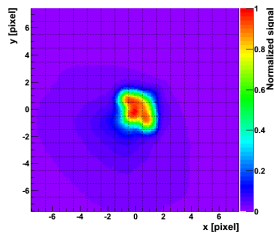
PSF zależy od widma obserwowanego obiektu:



niebieska



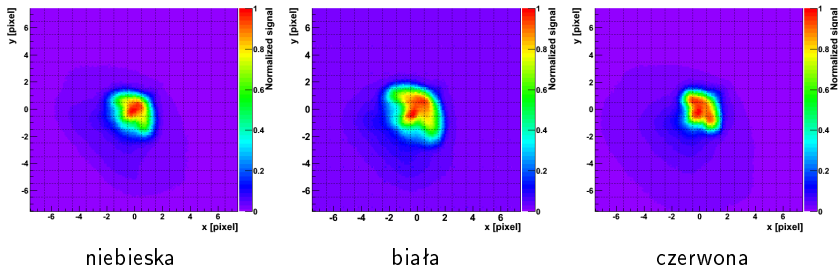
biała



czerwona

# Ocena typu widmowego GRB080319B

PSF zależy od widma obserwowanego obiektu:

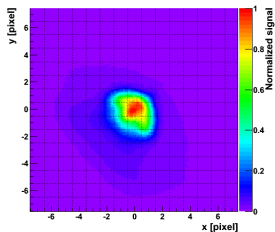


Zależność jest dana:

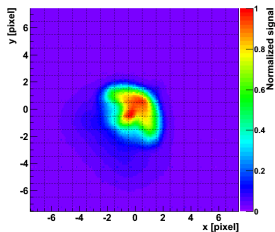
- ▶ explicite w modelu dyfrakcyjnym
- ▶ w sposób parametryczny w modelu wielomianowym

# Ocena typu widmowego GRB080319B

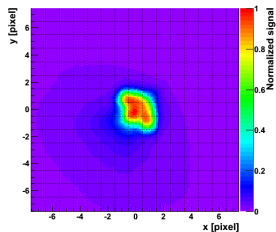
PSF zależy od widma obserwowanego obiektu:



niebieska



biała



czerwona

Zależność jest dana:

- ▶ explicite w modelu dyfrakcyjnym
- ▶ w sposób parametryczny w modelu wielomianowym

Jest pewna, choć bardzo niewielka, szansa na oszacowanie typu widmowego za pomocą opracowanych modeli PSF (badania w toku).

## Symulator klatki "Pi of the Sky"

Wielomianowy model PSF posłużył do stworzenia symulatora klatki "Pi of the Sky", który:

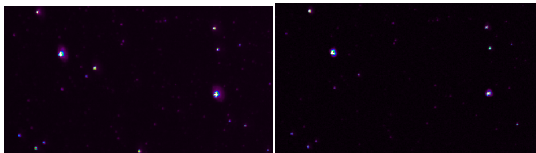
- ▶ generuje klatkę z gwiazdami o PSF zależnym od położenia i sygnale zależnym od katalogowej jasności
- ▶ uwzględnia nieliniowość piksela
- ▶ rozmywa położenia (symulacja drgań montażu) według zadanej funkcji
- ▶ generuje losową lub regularną zmienność gwiazdy na serii klatek
- ▶ itp.



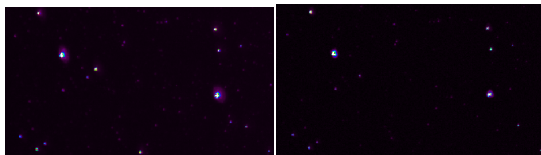
## Symulator klatki "Pi of the Sky"

Wielomianowy model PSF posłużył do stworzenia symulatora klatki "Pi of the Sky", który:

- ▶ generuje klatkę z gwiazdami o PSF zależnym od położenia i sygnale zależnym od katalogowej jasności
- ▶ uwzględnia nieliniowość piksela
- ▶ rozmywa położenia (symulacja drgań montażu) według zadanej funkcji
- ▶ generuje losową lub regularną zmienność gwiazdy na serii klatek
- ▶ itp.



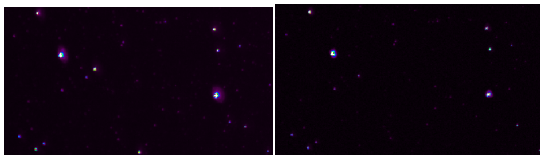
## Symulator klatki "Pi of the Sky" (2)



Wady:

- ▶ niedoskonałe odtworzenie dalekich "skrzydeł" PSF
- ▶ brak parametryzacji typu widmowego
- ▶ brak efektów saturacji i błędów transferu ("**ToDo**")

## Symulator klatki "Pi of the Sky" (2)



Wady:

- ▶ niedoskonałe odtworzenie dalekich "skrzydeł" PSF
- ▶ brak parametryzacji typu widmowego
- ▶ brak efektów saturacji i błędów transferu ("**ToDo**")

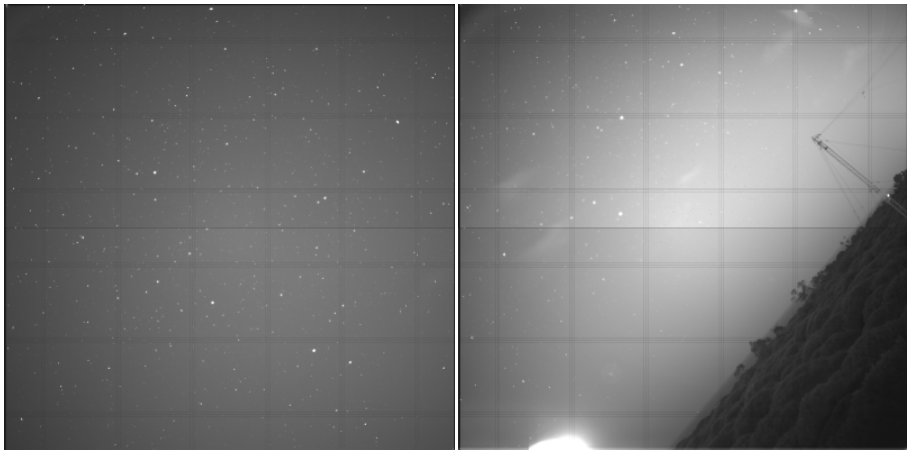
Zastosowania:

- ▶ analiza algorytmów fotometrycznych i astrometrycznych
- ▶ analiza wykorzystania zjawiska paralaksy
- ▶ analiza algorytmów wyznaczania torów satelitów
- ▶ i inne...

## Podsumowanie

- ▶ Trwa opracowywanie modelu dyfrakcyjnego PSF w "Pi of the Sky"
- ▶ Opracowano szczegółowy model wielomianowy
- ▶ Stworzono podwaliny nowej fotometrii i astrometrii
  - ▶ na razie nie lepszej od dotychczasowej
  - ▶ mogącej ulec znacznej poprawie wraz z modyfikacją aparatury
- ▶ Modele mogą posłużyć do:
  - ▶ poszukiwań bardzo słabych sygnałów
  - ▶ wyznaczania dokładnych limitów
  - ▶ (być może) szacowania typu widmowego źródeł
- ▶ Stworzono bardzo realistyczny symulator klatki, który może posłużyć do testowania algorytmów operujących na obrazie w "Pi of the Sky"
- ▶ Opracowane modele mogą być wykorzystane w innych, przyszłych eksperymentach o dużym polu widzenia

# Klatki z systemu "Pi-INTA"







# Całkowanie szybkooscylujących funkcji

Method for numerical integration of rapidly oscillating functions in diffraction theory

Antonin Miks, Jiri Novak and Pavel Novak

$$I = \int_a^b f(x) \exp(ikg(x)) dx$$

Rozwinięcie  $g(x)$  w szereg Taylora do 1 rzędu w okół  $x_n$ :

$$g(x) \simeq g(x_n) + g'(x_n)\Delta x_n$$

$$\Rightarrow I \simeq \sum_n \int_{x_n - \Delta x_n}^{x_n + \Delta x_n} f(x) \exp(ik(g(x_n) + g'(x_n)\Delta x_n)) dx$$

Zakładamy, że  $f(x)$  jest stałe na przedziałach całkowania i może być wyjęte przed całkę razem z  $\exp(ikg(x_n))$ . Wówczas wyrażenie podcałkowe daje się zcałkować analitycznie:

$$\int_{x_n - \Delta x_n}^{x_n + \Delta x_n} \exp(g(x_n)\Delta x_n) dx = 2\Delta x_n \frac{\sin(kg'(x_n)\Delta x_n)}{kg'(x_n)\Delta x_n}$$



## Całkowanie szybkooscylujących funkcji (2)

Cała całka szybkooscylująca przyjmuje rozwiązanie:

$$I = \int_a^b f(x) \exp(ikg(x)) dx \simeq 2 \sum_n f(x_n) \exp(ikg(x_n)) \frac{\sin(kg'(x_n)\Delta x_n)}{kg'(x_n)\Delta x_n} \Delta x_n$$

Łatwo rozszerzalne do 2 wymiarów:

$$I = \iint_S f(x, y) \exp(ikg(x, y)) dx dy$$
$$\simeq 4 \sum_n f(x_n, y_n) \exp(ikg(x_n, y_n)) \text{sinc}(X_n) \text{sinc}(Y_n) \Delta x_n \Delta y_n$$

gdzie:

$$A_n = k \frac{\partial g(x_n, y_n)}{\partial a} \Delta a_n$$

$$\text{sinc}(b) = \frac{\sin(b)}{b}$$