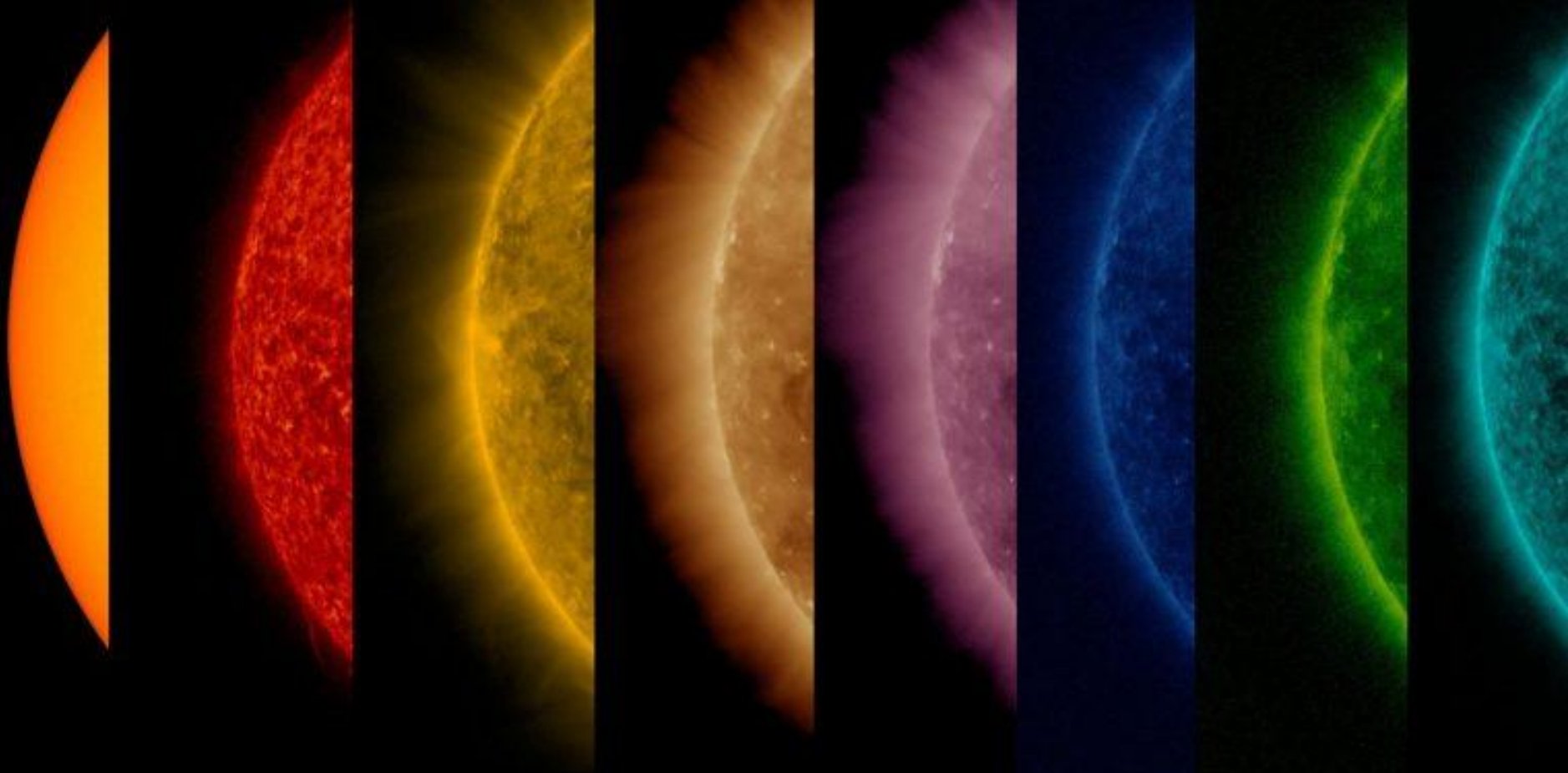


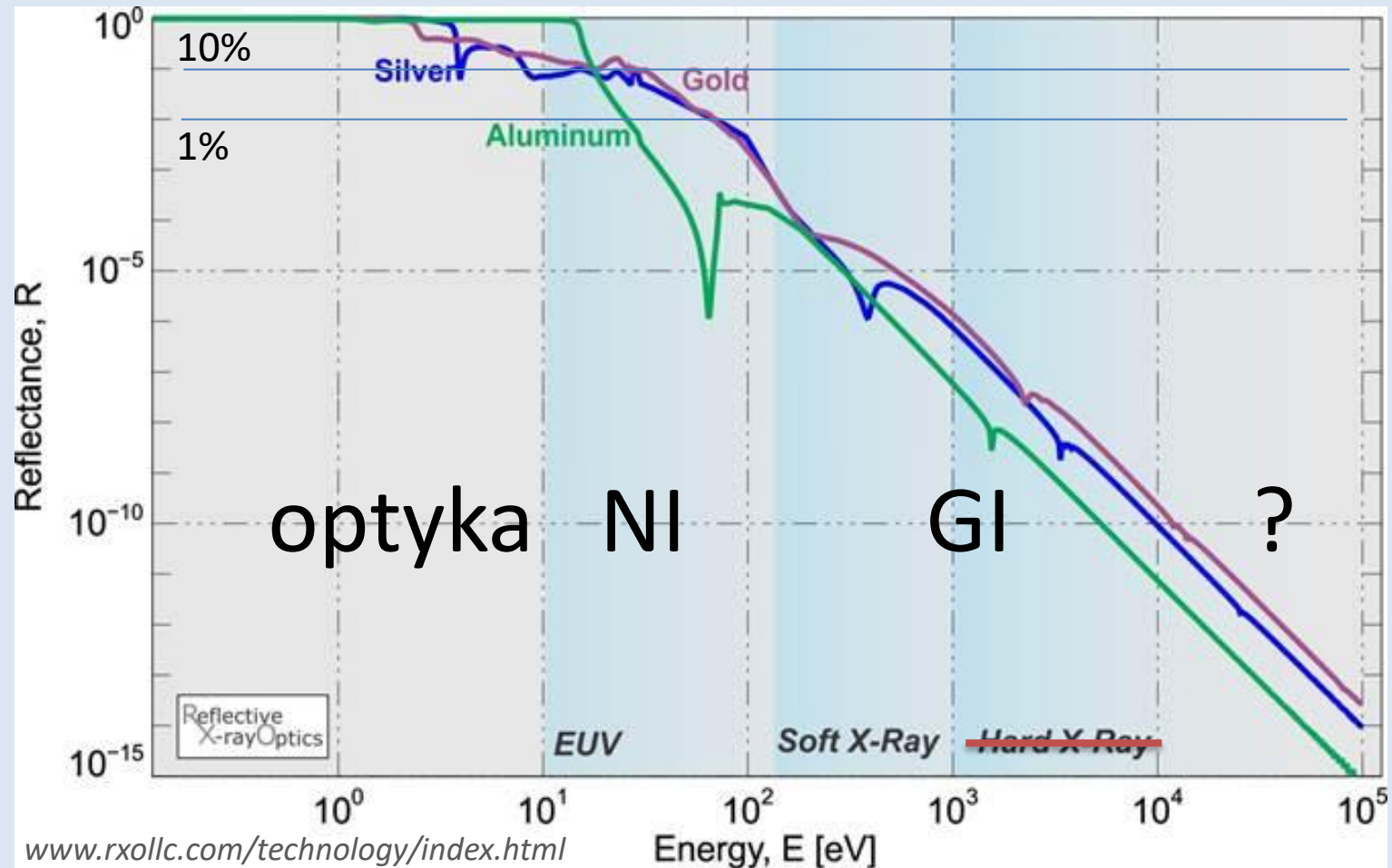
instrumenty obserwacyjne

cz. 2



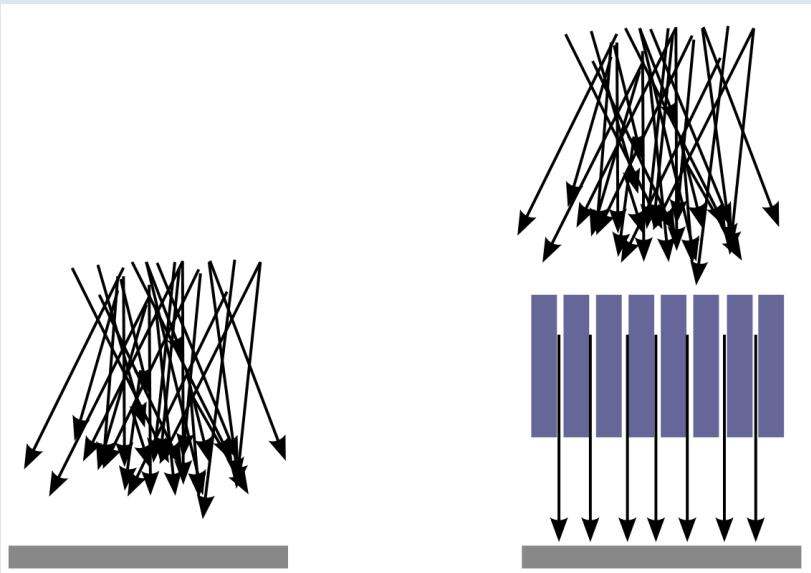
SDO/HMI Quick-Look SDO/AIA 304 2 SDO/AIA 171 2 SDO/AIA 193 SDO/AIA 211 SDO/AIA 335 SDO/AIA 94 SDO/AIA 131

Powyżej pewnej energii nawet optyka ślizgających promieni przestaje być użyteczna. Do wykorzystania pozostają techniki obrazowania pośredniego.



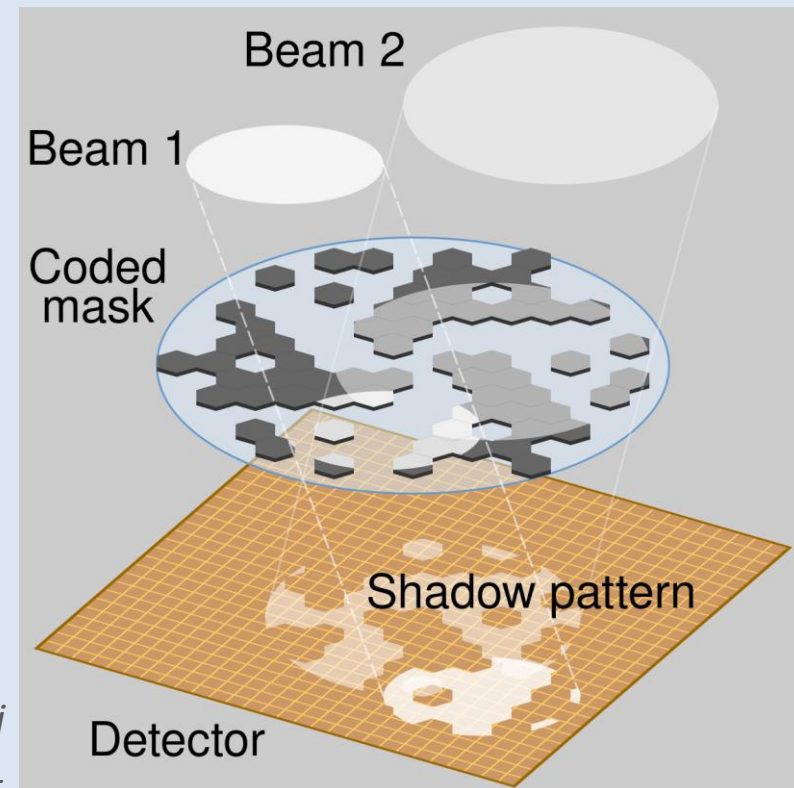
instrumenty

- W zakresie HRX używane są kolimatory / modulatory / apertury kodowane.
- Kolimator ma za zadanie ograniczyć wiązkę promieniowania do fotonów nadbiegających z określonego kierunku.
- Najprostszy przykład to kamera otworkowa (zaleta: prosta konstrukcja, wada: mała jasność obrazu).
- Obejście tego problemu: użycie siatki wielu otworków ułożonych w pewien wzór (apertura kodowana, coded aperture imaging).
- Obraz uzyskuje się pomiarów przy wykorzystaniu odpowiednich algorytmów (obrazowanie pośrednie/obliczeniowe, computational imaging)

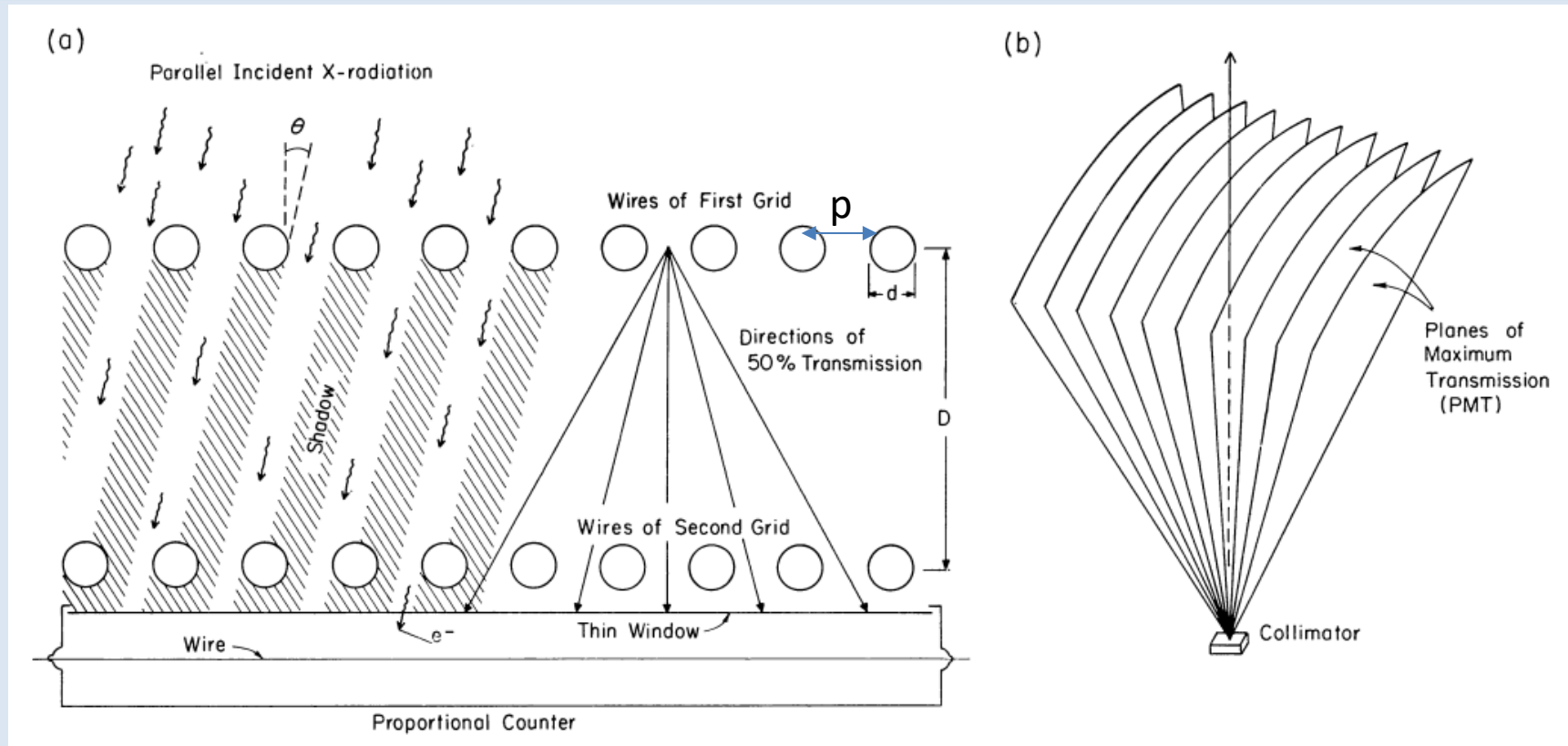


zasada działania kolimatora

*zasada działania apertury kodowanej
na przykładzie teleskopu INTEGRAL*



Rozwinięciem zasady apertury kodowanej są kolimatory składające się z układu siatek (2 lub więcej) o odpowiedniej charakterystyce, tzw. kolimatory modulujące (modulation collimators, MC). Opracowane przez Minoru Oda (1964).

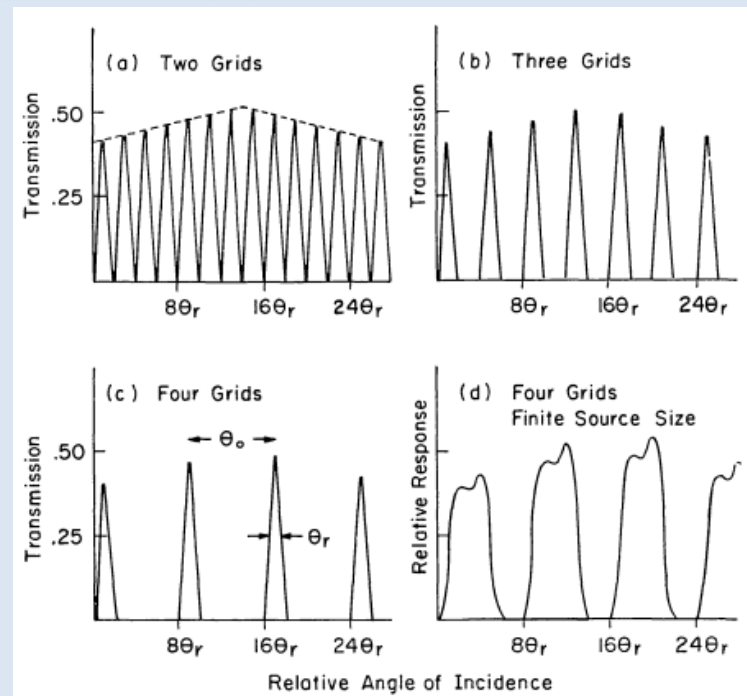
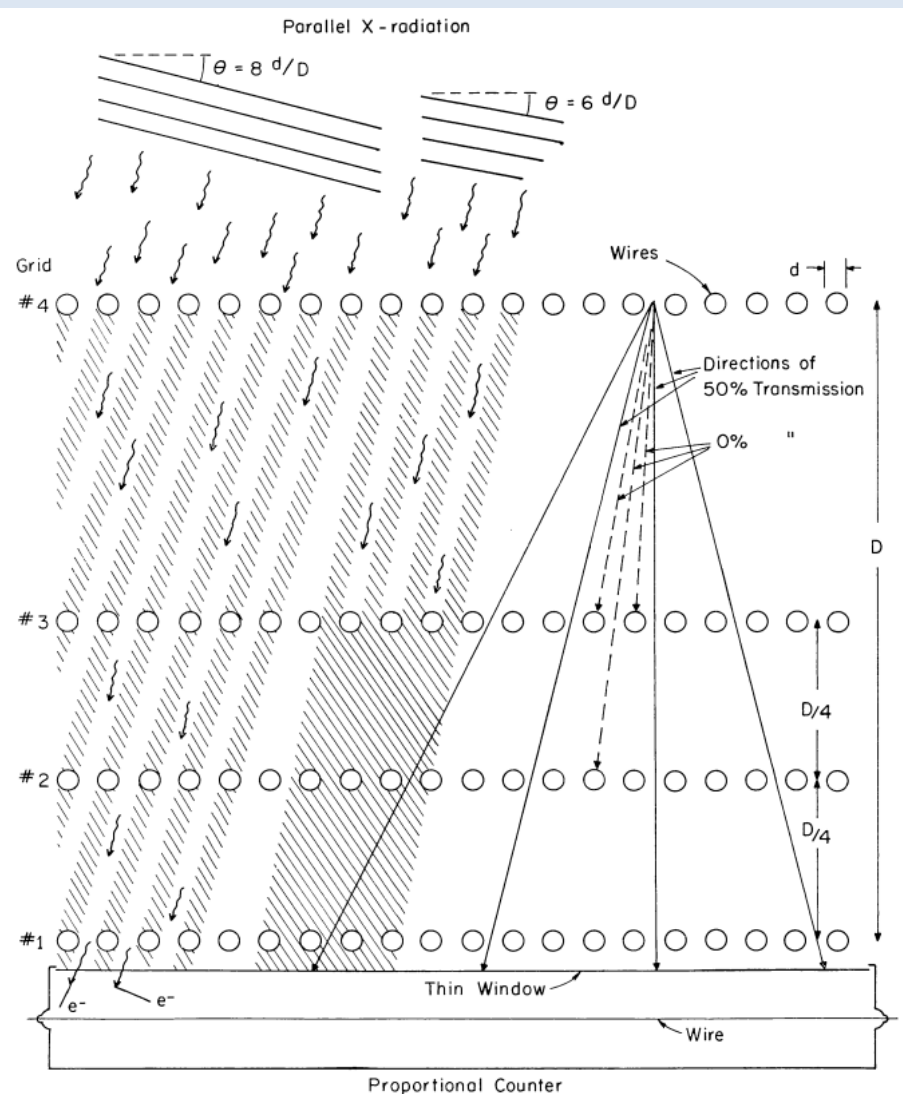


(a) Geometria kolimatora modulującego składającego się z 2 siatek, dla przypadku wiązki równoległej promieniowania (źródło punktowe). (b) Płaszczyzny maksymalnej przepuszczalności w dużej odległości od detektora.

Kąt odpowiedzi / rozdzielczość kolimatora (FWHM) wynosi: $\theta_r = \frac{d}{D} = \frac{p}{2D}$

Układ taki pozwala jednoznacznie wyznaczyć rozmiar źródła, jeśli zawiera się w przedziale od $\theta_r/4$ do $2\theta_r$ [Bradt et al. 1968]

Zastosowanie układów trzech lub czterech siatek pozwala na obserwacje większych źródeł (do $8\theta_r$ w przypadku czterech siatek). Dodatkowe środkowe siatki pozwalają też blokować promieniowanie z kierunków wyraźnie odbiegających od osi optycznej.

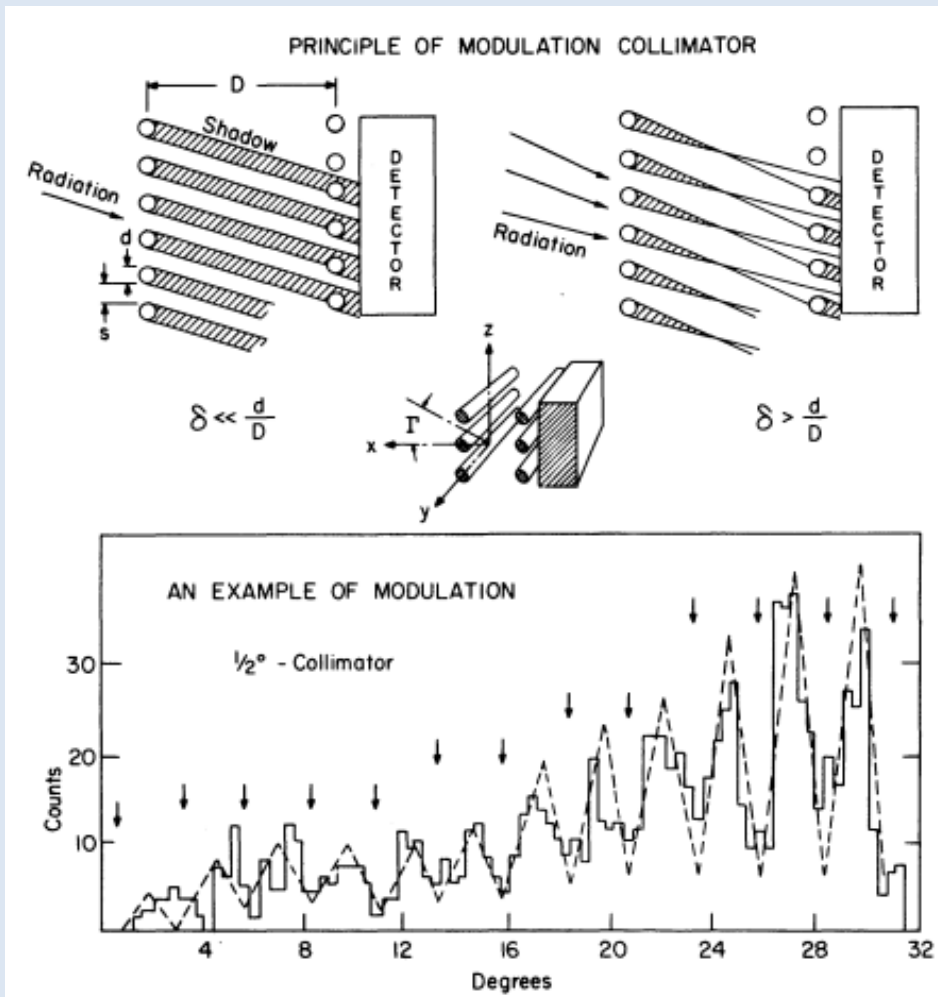


Funkcje odpowiedzi kątowej dla kolimatorów składających się z dwóch (a), trzech (b), czterech siatek (c). Przypadek (d) to odpowiedź kolimatora (c) dla źródła o pewnym rozmiarze kątowym [Bradt et al. 1968]

Geometria kolimatora modulującego składającego się z 4 siatek, dla przypadku wiązki równoległej (źródło punktowe) [Bradt et al. 1968]

W 1964 r. przeprowadzono eksperyment raketowy w celu wyznaczenia rozmiaru kąowego źródeł rentgenowskich Sco X-1 i Sgr. Wykorzystano modulator złożony z 2 siatek. Z uzyskanych pomiarów wynioskowano, że [Oda et al. 1965, Oda 1965]:

- rozmiar Sco X-1 jest na pewno mniejszy niż 0.5° i może mniejszy od 0.125° .
- źródło Sgr jest rozciągnięte $>0.5^\circ$ lub składa się z wielu mniejszych źródeł.



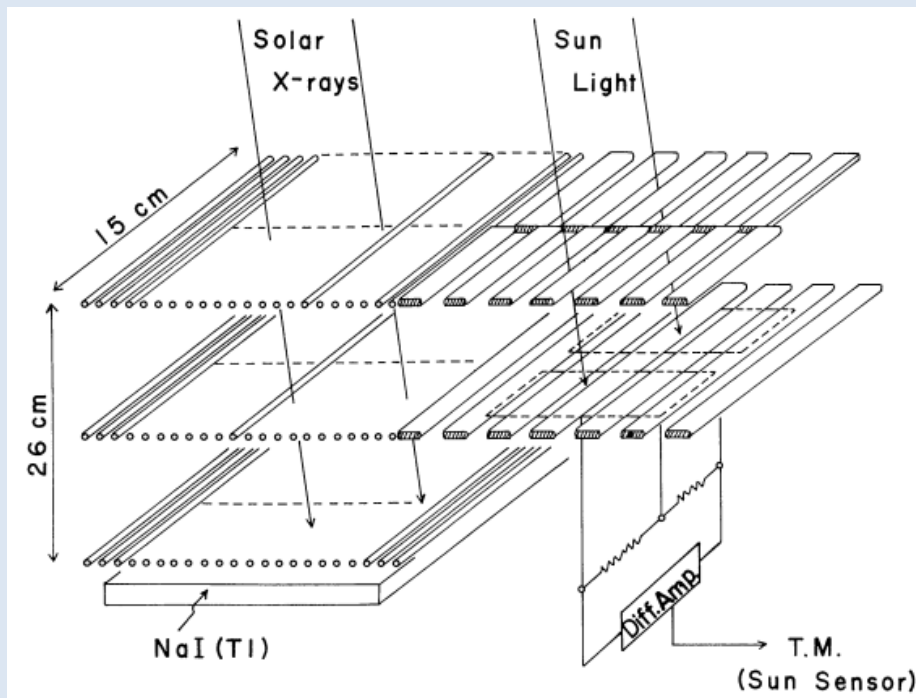
W 1966 r. dzięki misji raketowej z modulatorem 4-siatkowym, określono położenie źródła Sco X-1 z dokładnością do 4 arcmin. [Gursky et al. 1966].

*cyt. z publikacji Oda (1965):
Depending upon whether the angular size of the source is smaller or larger than d/D radian, the collimator produces or does not produce the „modulation” of the flux as the orientation of the collimator with respect to the direction of the source changes.*

*Zasada działania modulatora oraz pomiar modulacji dla źródła Sco X-1.
[Oda et al. 1965, Oda 1965]*

W 1969 r. przeprowadzono pierwsze obserwacje Słońca w zakresie HXR z wykorzystaniem modulatora. Celem było określenie położenia i struktury emisji rozbłyskowej nietermicznej. Instrument posiadał kolimator 3-siatkowy ($\theta_r = 1.32'$) i detektor (20-60 keV). Była to misja balonowa (32 km). Rozdzielczość dostępna była tylko w 1D (kierunek E-W)

[Takakura et al. 1971]



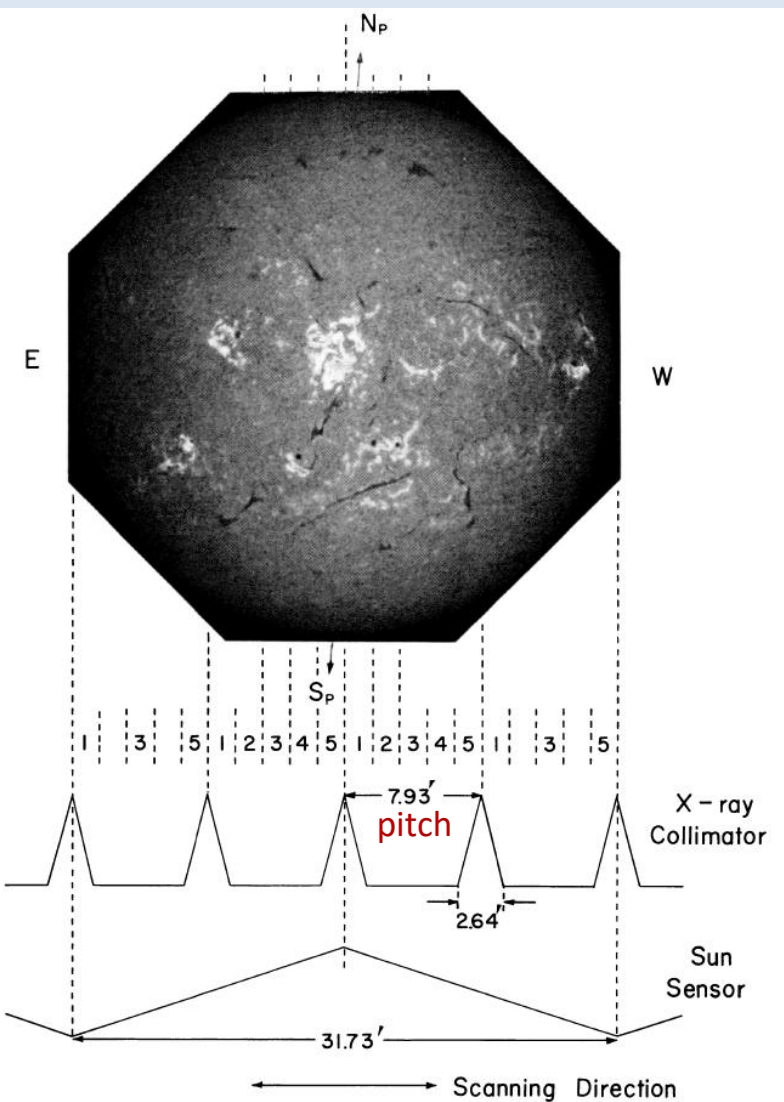
Schemat modulatora



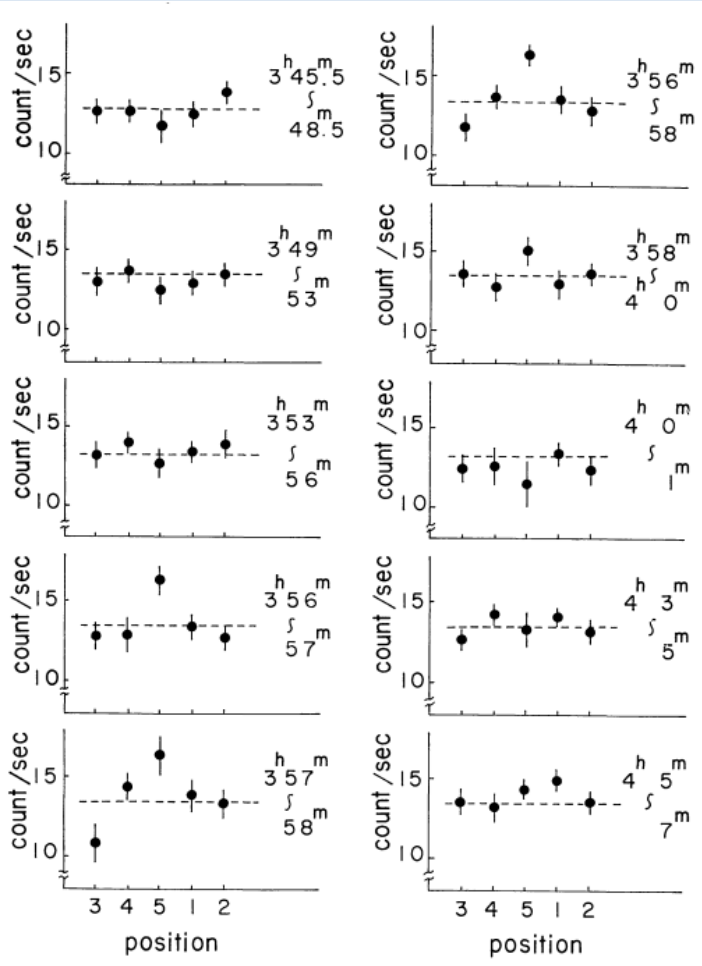
Modulator w czasie kalibracji

instrumenty

W trakcie trwania misji udało się zaobserwować silny rozbłysk (klasa 3N-3B) z wyraźnym pojaśnieniem w zakresie HXR w czasie fazy impulsowej. W celu zlokalizowania źródła HXR, pitch podzielono na 5 pasków. Skanowanie (modulację) promieniowania uzyskano przez swobodną rotację gondoli balonu.



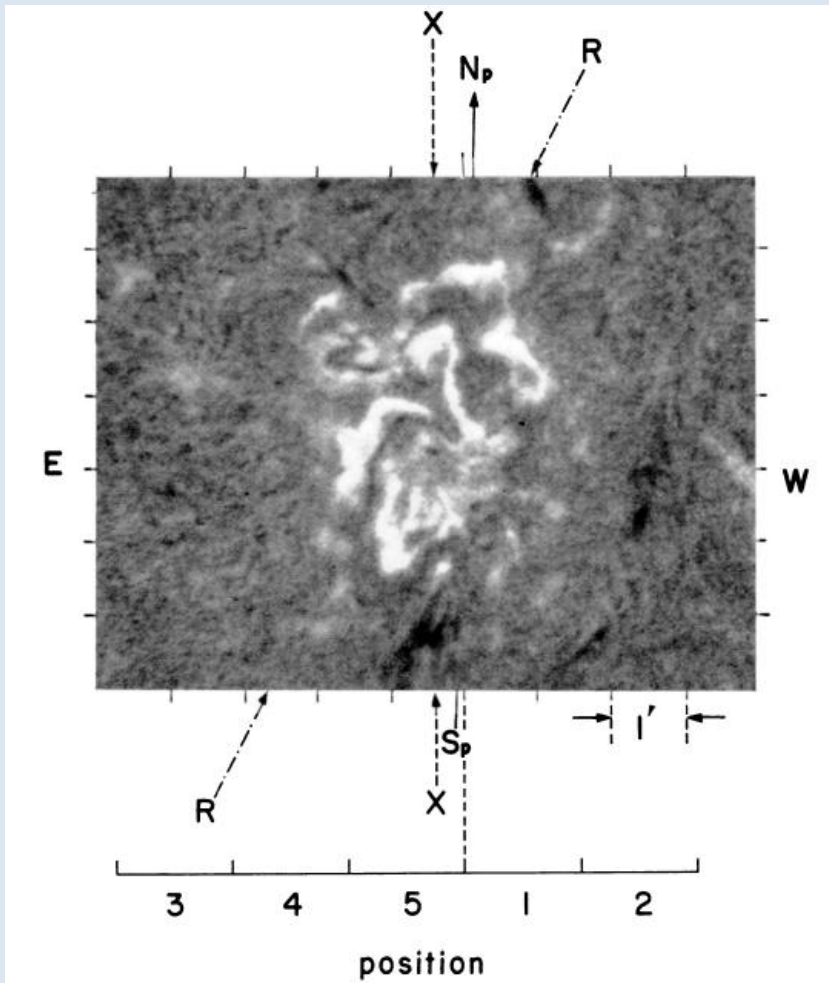
Czasowe 1-D zmiany rozkładu sygnału w na dysku Słońca. Nr 1-5 to paski wskazujące pozycję w osi E-W. Wyraźne pojaśnienie widoczne między 3:56-3:58 w pasku 5 związane jest z fazą impulsową rozbłysku.



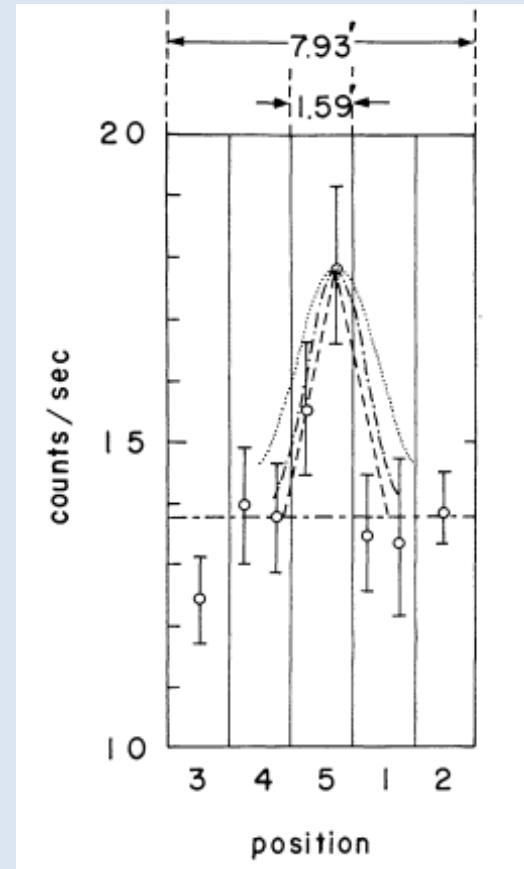
Obraz Słońca w H-alfa wykonany w fazie impulsowej rozbłysku. Poniżej transmisja modulatora HXR i czujnika położenia Słońca.

instrumenty

Położenie źródła HXR (mierzone w jednym wymiarze) było zgodne z obserwowanym rozbłyskiem $H\alpha$. Rozmiar źródła określono na prawdopodobnie równy lub mniejszy niż $1'$. To więcej niż rozmiar obszaru rozbłysku w $H\alpha$ ($\sim 3'$). Uwaga: niejednoznaczność położenia równa pitch.



Położenie źródła HXR względem obrazu rozbłysku w H α (3:57). Środek źródła HXR położony jest na linii X. Na linii R znajdowało się źródło widoczne w zakresie radiowym.



Jednowymiarowy rozkład jasności dla pojaśnienia HXR w czasie 3:56-3:58. Nr pasków na osi X odpowiadają tym na obrazie obok. Linia pozioma to tło przed/po pojaśnieniu. Linia - - - oczekiwany profil dla źródła punktowego Linia -.- oczekiwany profil dla źródła o rozmiarze 1.1' Linia . . . oczekiwany profil dla źródła o rozmiarze 2.2'

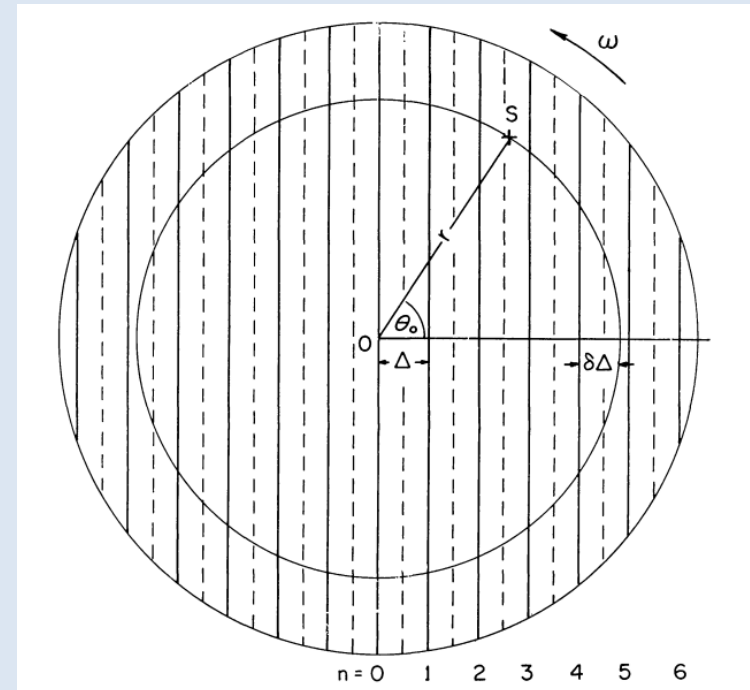
Pierwsze teleskopy z kolimatorami modulującymi miały rozdzielczość kątową w jednej osi. Uzyskanie obrazu 2-D możliwe jest poprzez skanowanie w różnych kierunkach za pomocą:

- rotacji modulatora wokół osi optycznej (RMC – rotating modulation collimator)
- kilku modulatorów ustawionych w różnych kierunkach

Dodatkowo teleskop powinien mieć siatki i różnej rozdzielczości, aby móc uzyskać modulację dla źródeł o różnych rozmiarach.

Konstrukcję z rotującym modulatorem (RMC) zaproponował Mertz (1967). Rotacja powoduje powstanie cyklicznego wzorca modulacji, której częstotliwość (cykle na 1 obrót) zależy od odległości (r) źródła od osi kolimatora. Faza modulacji zależy od kąta azymutalnego θ_0 .

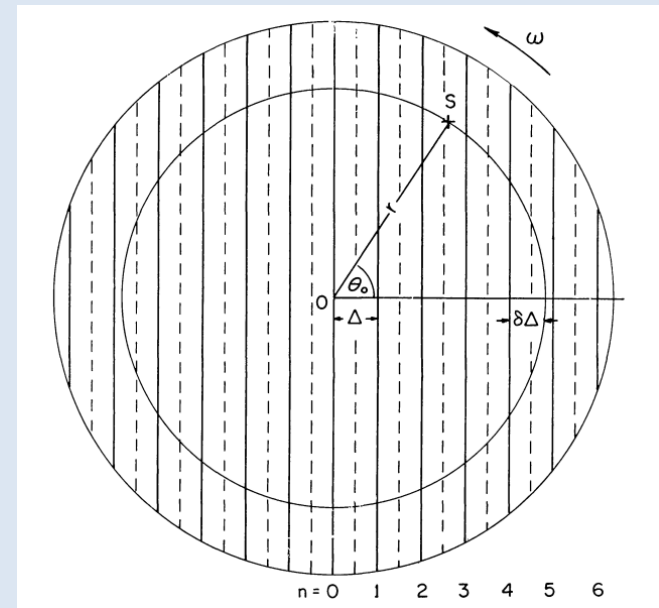
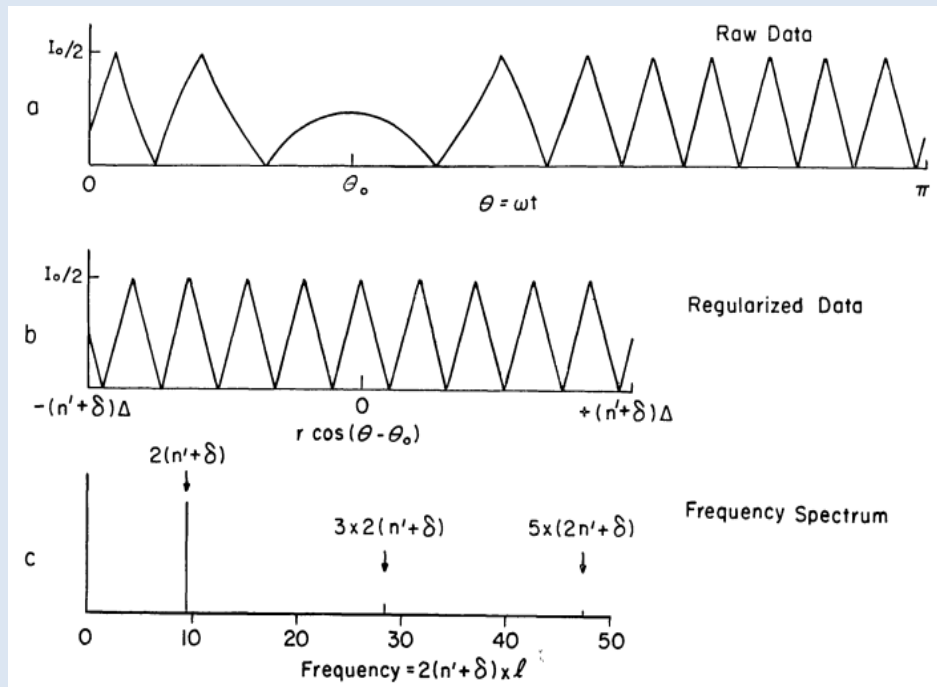
Linie odpowiadają pasmom maksymalnej (linia ciągła) i minimalnej (linia przerywana) transmisji przez kolimator. W układzie odniesienia kolimatora źródło S zatacza okrąg o promieniu r wokół osi obrotu. Geometrię kolimatora określa Δ (pitch), a pozycję źródła S określa r . Orientację kolimatora wyznacza kąt θ_0 ($\pm 180^\circ$) w chwili $t=0$. Oś obrotu kolimatora jest prostopadła do sfery niebieskiej w punkcie O . [Schnopper et al. 1968]



Po zregulowaniu modulowany sygnał poddawany jest analizie fourierowskiej w celu znalezienia częstotliwości, a stąd położenia źródła.

W praktyce θ_0 nie jest znane. Wyznaczenie z obserwacji polega na liczeniu transformacji Fouriera dla różnych θ_0 , aż do uzyskania pojedynczej częstotliwości.

Tło jest samoczynnie usuwane z obserwacji źródła, bo nie jest modulowane.



(a) Symulowane dane dla źródła S – krzywa modulacji mierzonego sygnału. (b) Zregularyzowane dane dla tego samego źródła, przy odpowiednim doborze kąta fazowego θ_0 . (c) Widmo częstotliwości uzyskane z analizy Fouriera danych zregularyzowanych [Schnopper et al. 1968].

Problemy:

- Źródła o rozmiarze większym od rozdzielczości siatki nie dają modulacji.
- Grupa wielu źródeł położonych blisko siebie nie można rozdzielić.
- Uzyskanie obrazu dla źródeł o złożonym kształcie lub drobnej strukturze jest trudne lub niemożliwe.
- Źródła poruszające się, zmieniające jasność lub wielkość są problematyczne.
- Niski zakres dynamiczny ($\sim 1:10$) uniemożliwia obrazowanie słabych źródeł w obecności silnych.

Zalety:

- Możliwość uzyskania informacji o położeniu, rozmiarze, jasności i rozkładzie widmowym źródła emisji. Śledzenie zmian czasowych.

Wybrane satelitarne obserwatoria HXR

Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)

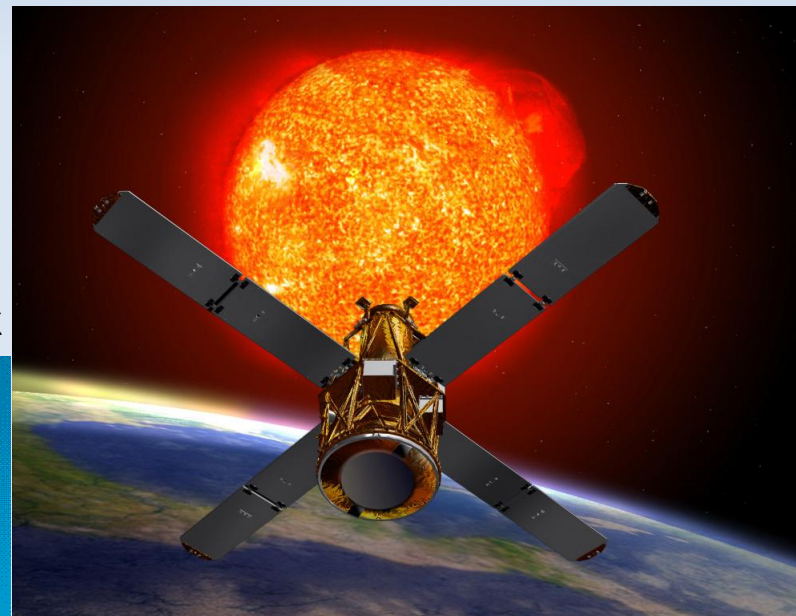
Układ optyczny: RMC

Zakres: 3 keV – 17 MeV

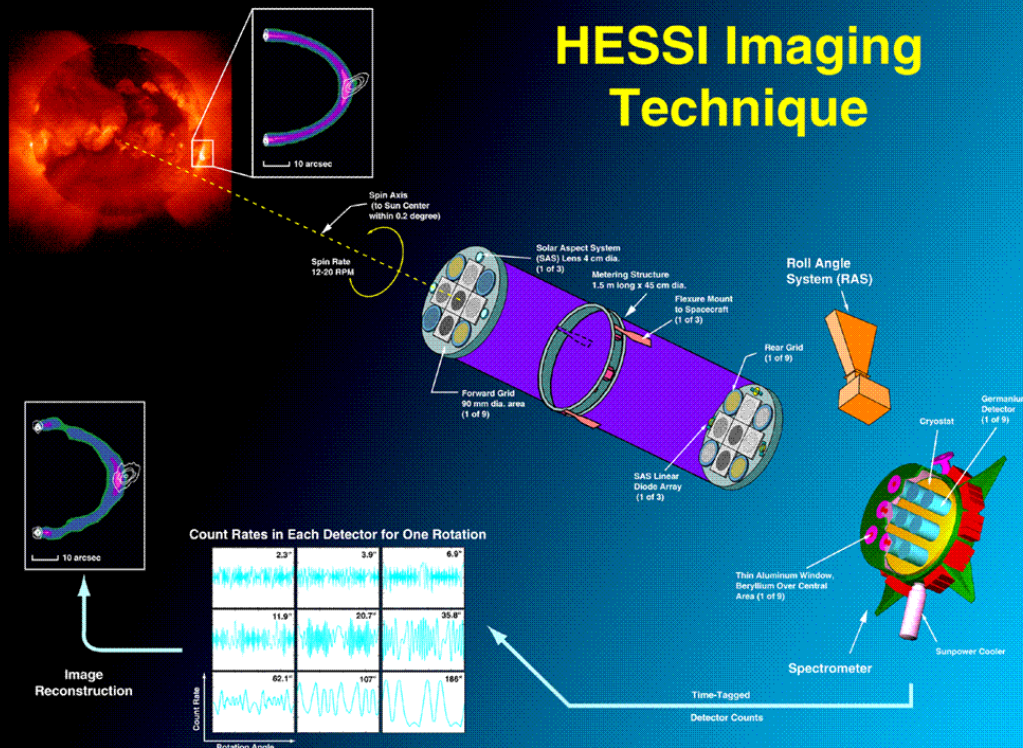
Rozdzielczość: 2.3 arcsec, 1-3 keV, <4s

Czas: 2002-2018 (2023)

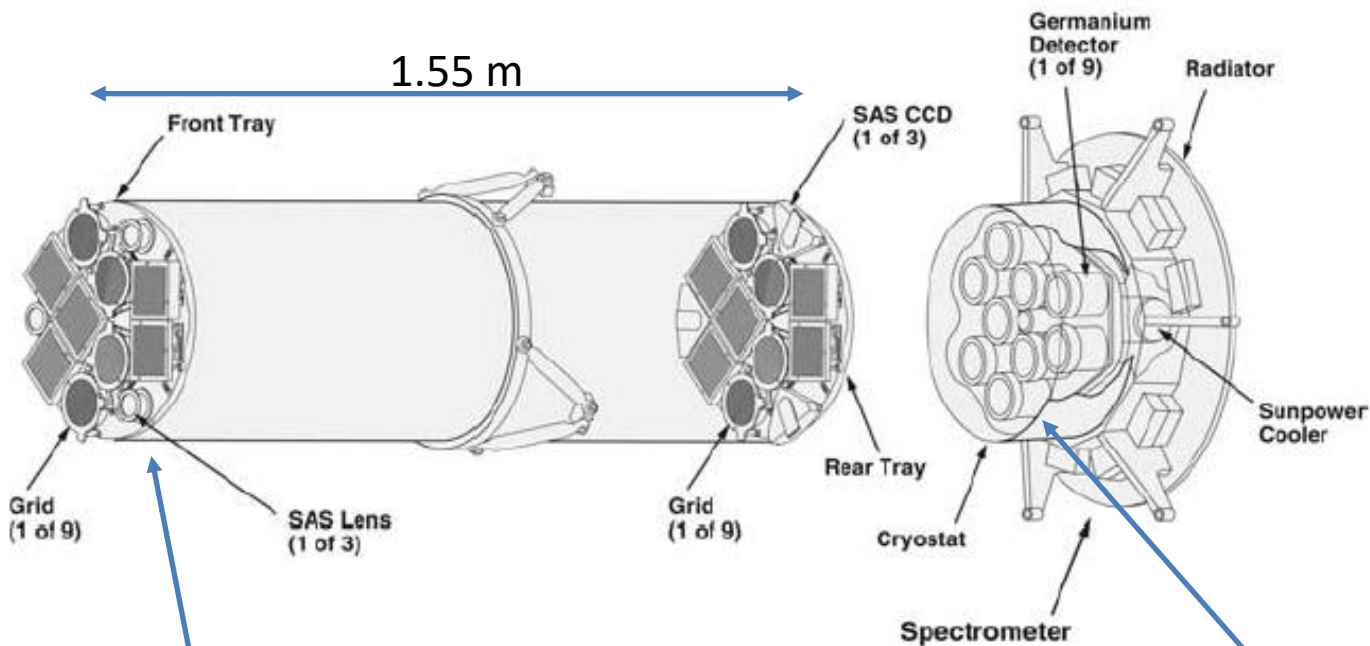
Cele: zrozumienie procesów wydzielania energii, przyspieszania cząstek oraz transportu i energii i cząstek



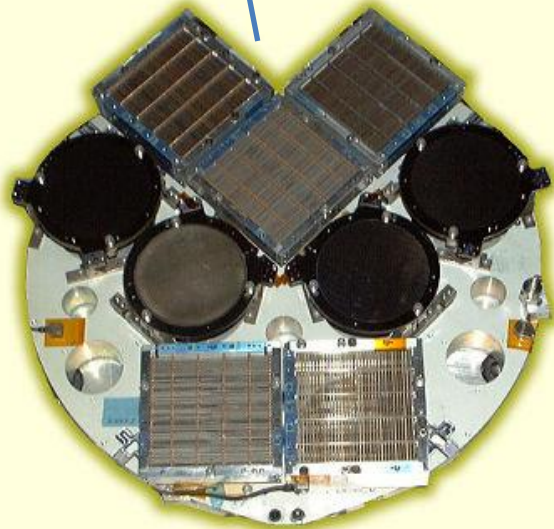
HESSI Imaging Technique



- 9 detektorów (Ge) 7.1 x 8.5 cm, każdy z kolimatorem o innej rozdzielczości
- rejestracja energii, czasu przybycia każdego fotonu
- możliwość uzyskiwania: obrazów dla wybranych przedziałów energii, widm bez i z rozdzielczością przestrzenną (spektroskopia obrazowa)



*Schemat RHESSI.
Główne elementy
obrazujące to tuba z
9 sub-kolimatorami,
blok 9 detektorów
(kryształy Ge)
[Hurford et al. 2002]*



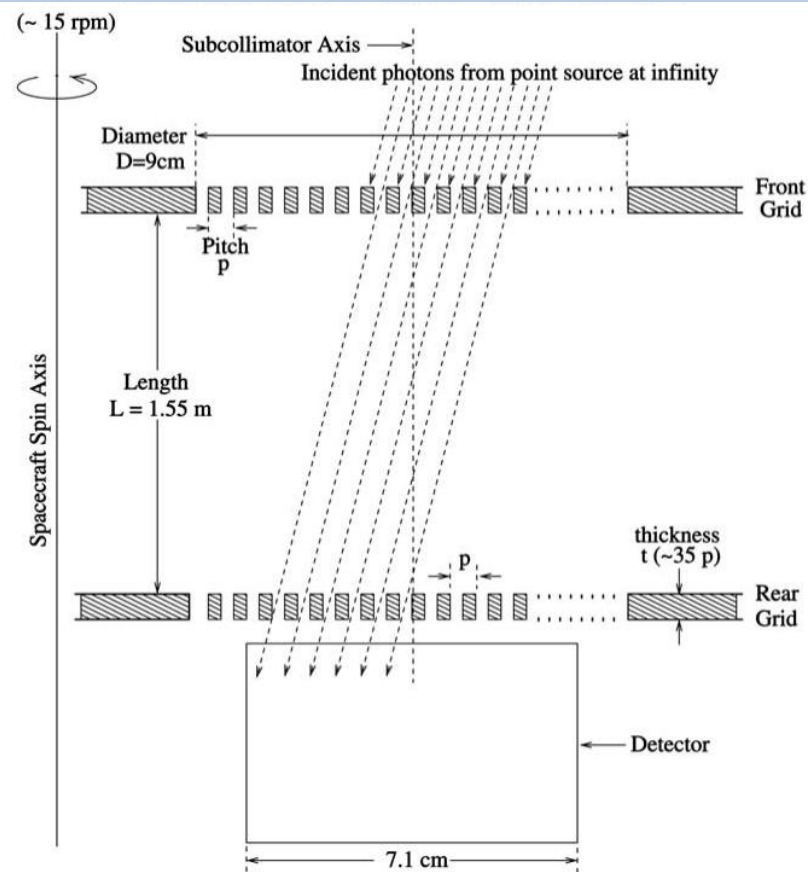
siatka 5



Nominalne parametry siatek dla dziewięciu układów sub-kolimator – detektor

Każdy z sub-kolimatorów (para siatek front grid i rear grid) ma inną rozdzielczość (FWHM) określoną przez pitch siatki (różny dla każdego z sub-kolimatora) i długość sub-kolimatora (1.55 m dla wszystkich kolimatorów).

Zastosowanie siatek o różnych rozdzielczościach pozwala obserwować źródła o różnych rozmiarach oczekiwanych dla rozbłysków.



RHESSI – nominal grid parameters.

Subcollimator number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pitch (mm)	0.034	0.059	0.102	0.177	0.306	0.530	0.918	1.590	2.754
slit width (mm)	0.020	0.035	0.061	0.106	0.184	0.318	0.477	0.811	1.487
FWHM resolution (arc sec)	2.26	3.92	6.79	11.76	20.36	35.27	61.08	105.8	183.2
Max. transmission	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.52	0.51	0.54
Grid thickness (mm)	1.2	2.1	3.6	6.2	10.7	18.6	6.2	6.2	30.0
Slat material	Mo	W	W	W	W	W	W	W	W
Field of view (deg)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	4.4	7.5	2.8

Geometria układu sub-kolimator – detektor. P to pitch siatki (stała siatki).

RHESSI wykonywał 15 obrotów na min. (1 obrót na 4 s). W wyniku tego, dla źródeł nie znajdujących się na osi optycznej, mierzona jest modulacja sygnału.

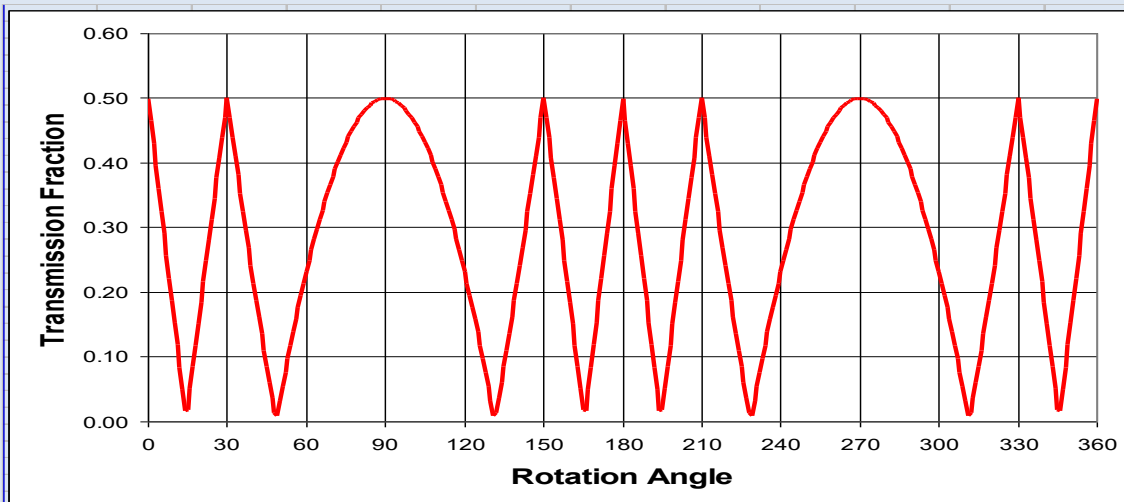
Z cech modulacji można określić jasność, położenie i rozmiar źródeł, czyli uzyskać obraz 2D.

Liczba maksimów w przebiegu modulacji pozwala wyznaczyć odległość źródła od osi rotacji, r .

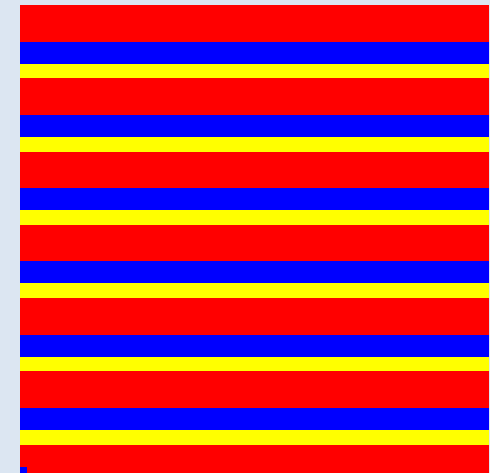
Kąt ustawienia siatek w czasie najwolniejszej zmiany modulacji daje kąt azymutalny źródła, θ_0 .

Średni poziom zliczeń pozwala wyznaczyć jasność źródła.

Liczba zliczeń w minimach modulacji oraz jej amplituda niesie informację o rozmiarze źródła względem rozdzielczości sub-kolimatora



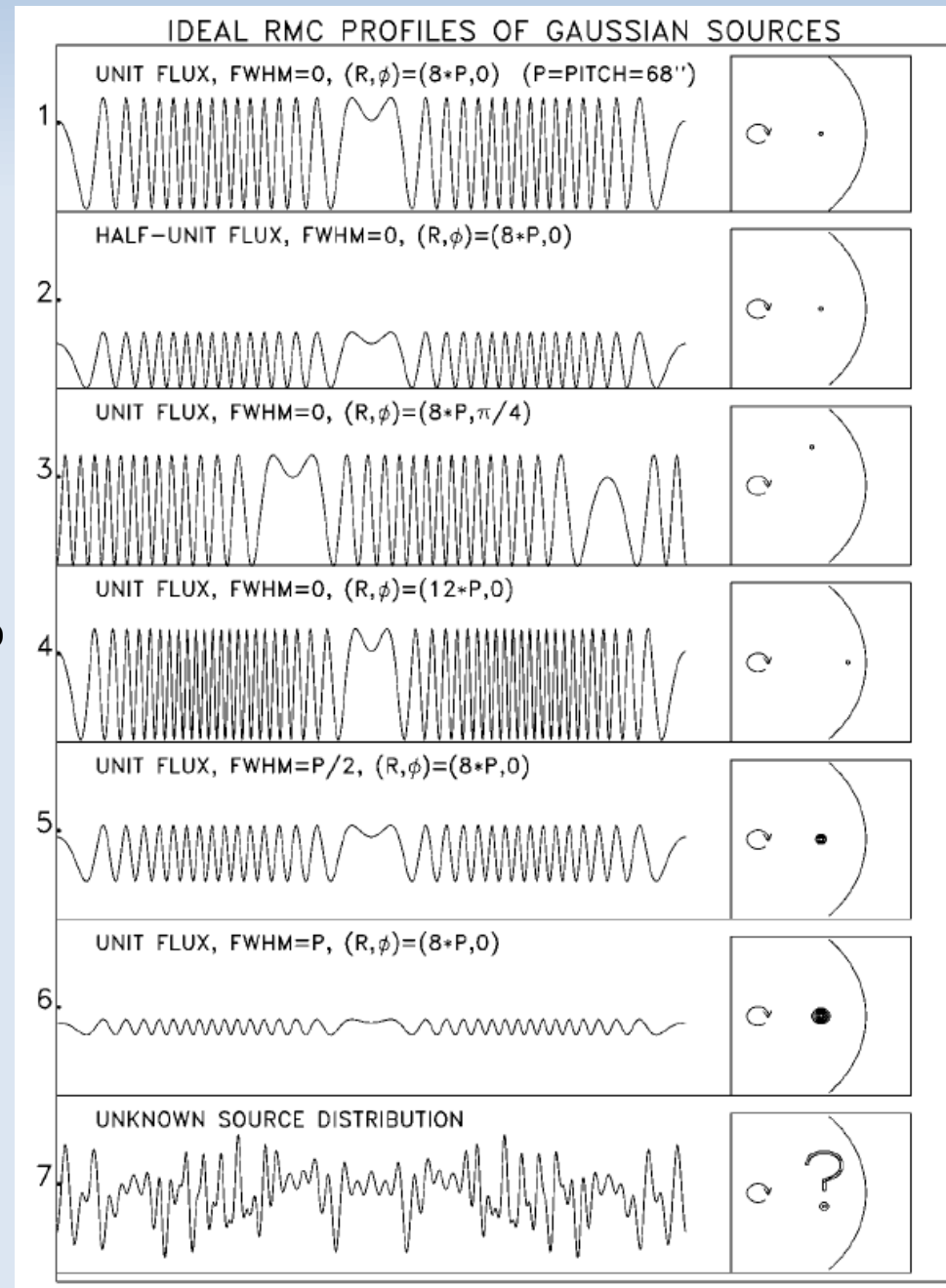
Schematyczna krzywa blasku (profil modulacji) pokazująca jak zmienia się liczba fotonów docierających do detektora przez dwie siatki w czasie jednego obrotu RHESSI. Maksymalna liczba fotonów osiągana jest w momencie, gdy siatka tylna jest dokładnie za siatką przednią z punktu widzenia nadchodzących fotonów.



Widok schematyczny kolimatora od strony Słońca dla punktu nieznajdującego się na osi rotacji RHESSI (kolory: czerwony – siatka przednia, niebieski – siatka tylna, żółty - detektor).

Przykładowe poglądowe profile modulacji dla jednej rotacji dla różnych źródeł (p – pitch siatki).

1. źródło punktowe w odległości $8p$ od osi rotacji
2. to samo, co 1, ale jasność o połowę mniejsza
3. to samo, co 1, ale azymut przesunięty o 45°
4. to samo, co 1, ale odległość zwiększona do $12p$
5. to samo, co 1, ale rozmiar źródła równy $p/2$
6. to samo, co 1, ale rozmiar źródła równy p
7. przypadek zbliżony do rzeczywistego – źródło o złożonym nieznanym kształcie i położeniu

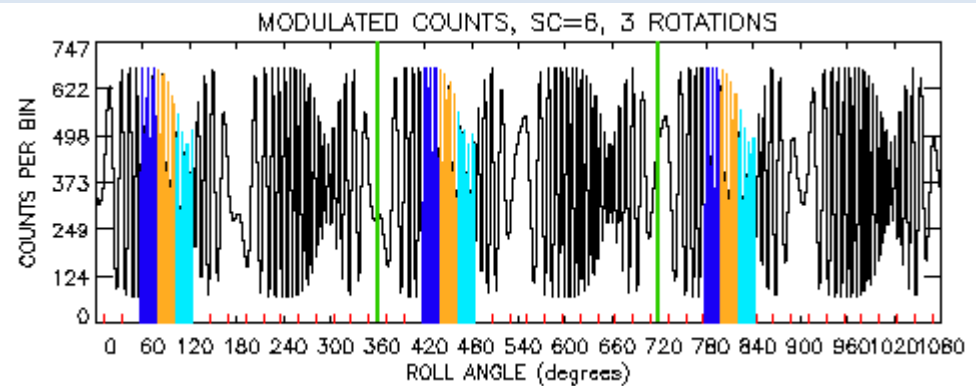
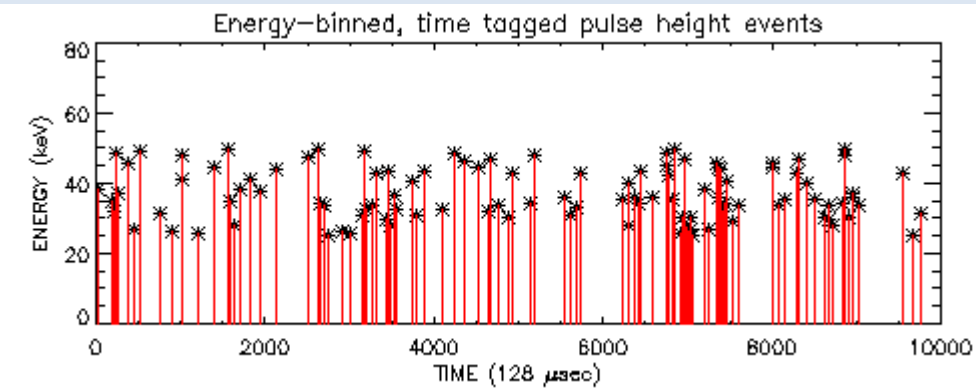
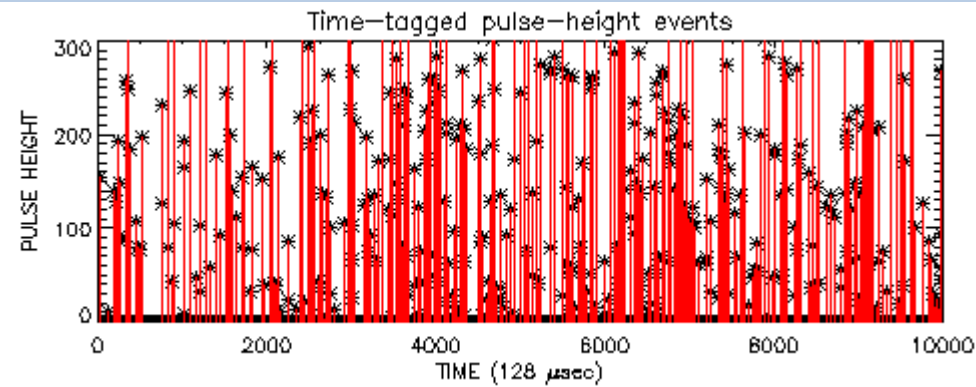


W praktyce prawdziwe źródła są bardziej skomplikowane, a więc profile modulacji są bardziej złożone.

Sytuację pogarszają dodatkowo przerwy w rejestracji (data gaps), zmienność prawdziwych źródeł (rozmiary, jasność, położenie) oraz szum.

Podstawowe zadanie przy analizie danych RHESSI to zagadnienie odwrotne – wyznaczenie rozkładu źródeł, rozmiarów, jasności na podstawie zestawu zarejestrowanych modulacji z zestawu kolimatorów.

Rozwiązanie tego problemu zaczynamy od digitalizacji modulacji w przedziały czasu i opisanu rozkładu jasności w płaszczyźnie źródła za pomocą pikselizowanego obrazu F_m , gdzie F_m to strumień (fotony/cm²/s), z piksela m , padający na przednie siatki.



Przejście od danych pierwotnych (rejestracji fotonów – czas, energia) do profilu modulacji [Schmahl 2006].

W pierwszym przybliżeniu
zaniedbujemy tło i energię fotonów.

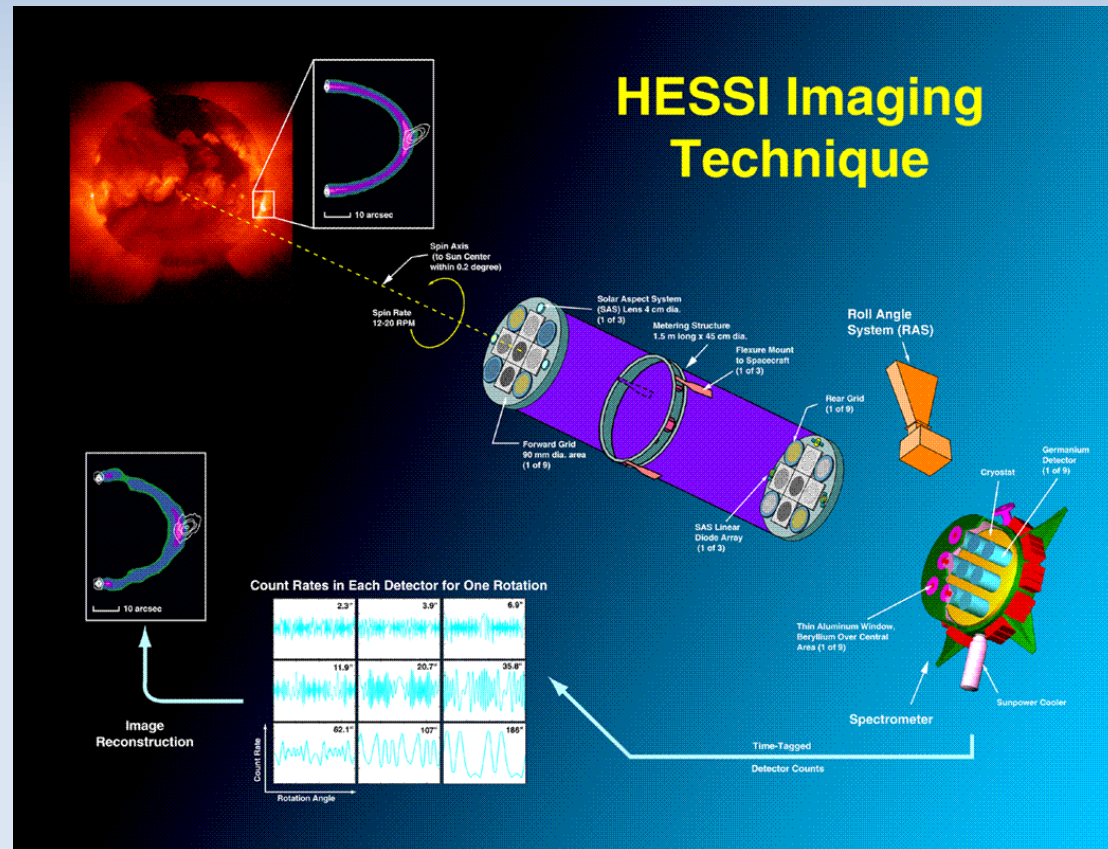
Oczekiwane zliczenia w i-tym binie
czasowym:

$$C_i = A \sum_m P_{im} F_m \Delta t_i$$

P_{im} – prawdopodobieństwo, że foton z
piksela m zostanie zliczony w i-tym
binie czasowym (o szerokości Δt_i)
przez detektor o powierzchni A.

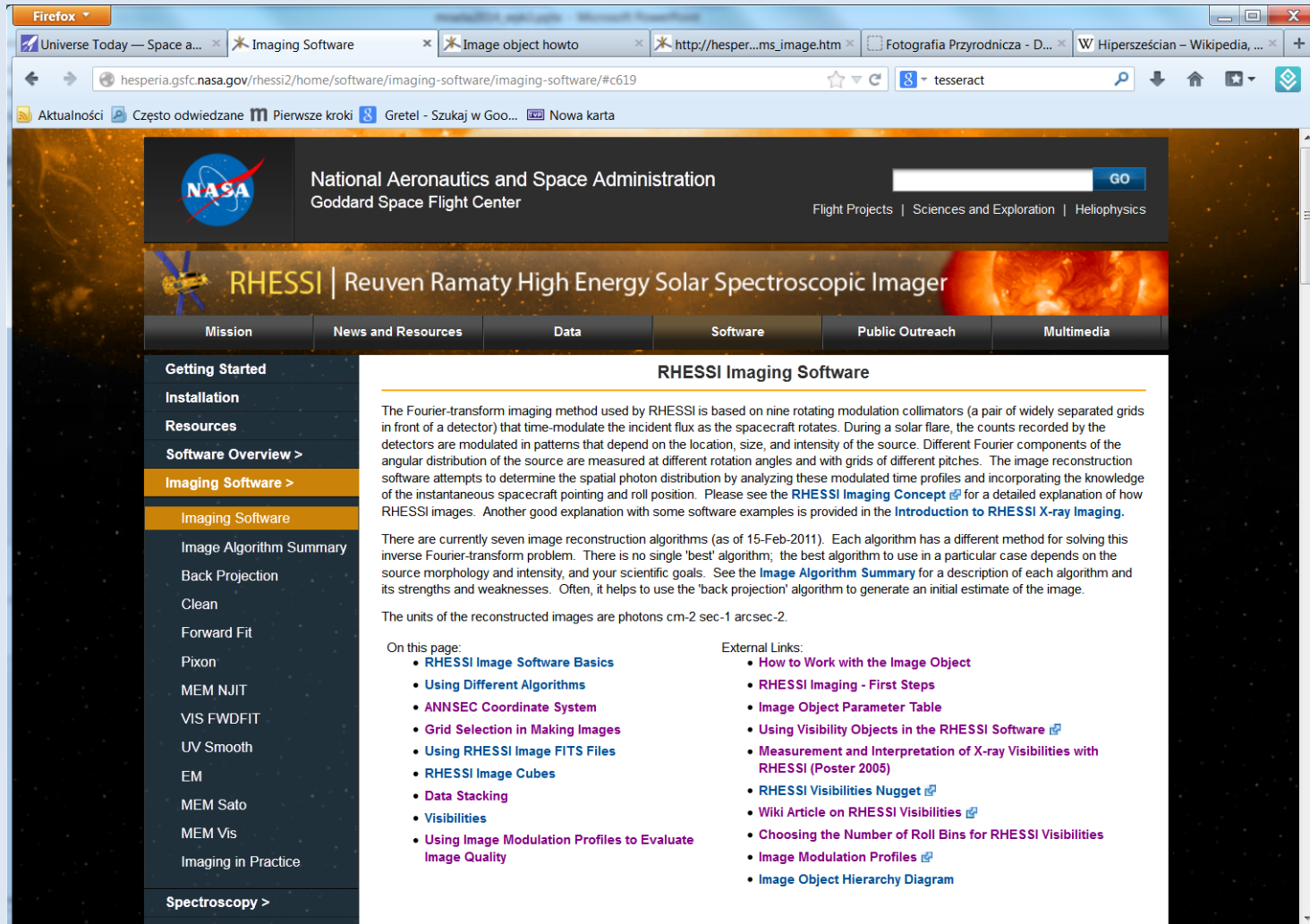
P_{im} może być policzone jeśli znamy
parametry kolimatora i jego orientację
względem płaszczyzny źródła.

**Znaleźć mapę źródeł F_m mając C_i w
każdym przedziale czasu i.**



Do rekonstrukcji obrazów dostępnych jest sporo algorytmów, m.in.: Back Projection, Clean, ForwardFit, Pixon, EM, MEM NJIT, VIS FWDFIT, UV Smooth, VIS CS.

<https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/software/imaging-software/image-algorithm-summary/index.html>



The screenshot shows a web browser window displaying the NASA RHESSI Imaging Software page. The page features a NASA logo and the text "National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center". The main heading is "RHESSI | Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager". Below this, there is a navigation bar with tabs: Mission, News and Resources, Data, Software, Public Outreach, and Multimedia. The "Software" tab is selected, leading to the "RHESSI Imaging Software" section. This section contains a detailed description of the Fourier-transform imaging method used by RHESSI, a list of seven image reconstruction algorithms (Back Projection, Clean, Forward Fit, Pixon, MEM NJIT, VIS FWDFIT, UV Smooth, EM, MEM Sato, MEM Vis, Imaging in Practice), and a list of external links including "How to Work with the Image Object", "RHESSI Imaging - First Steps", "Image Object Parameter Table", "Using Visibility Objects in the RHESSI Software", "Measurement and Interpretation of X-ray Visibilities with RHESSI (Poster 2005)", "RHESSI Visibilities Nugget", "Wiki Article on RHESSI Visibilities", "Choosing the Number of Roll Bins for RHESSI Visibilities", "Image Modulation Profiles", and "Image Object Hierarchy Diagram".

RHESSI Imaging Software

The Fourier-transform imaging method used by RHESSI is based on nine rotating modulation collimators (a pair of widely separated grids in front of a detector) that time-modulate the incident flux as the spacecraft rotates. During a solar flare, the counts recorded by the detectors are modulated in patterns that depend on the location, size, and intensity of the source. Different Fourier components of the angular distribution of the source are measured at different rotation angles and with grids of different pitches. The image reconstruction software attempts to determine the spatial photon distribution by analyzing these modulated time profiles and incorporating the knowledge of the instantaneous spacecraft pointing and roll position. Please see the [RHESSI Imaging Concept](#) for a detailed explanation of how RHESSI images. Another good explanation with some software examples is provided in the [Introduction to RHESSI X-ray Imaging](#).

There are currently seven image reconstruction algorithms (as of 15-Feb-2011). Each algorithm has a different method for solving this inverse Fourier-transform problem. There is no single 'best' algorithm; the best algorithm to use in a particular case depends on the source morphology and intensity, and your scientific goals. See the [Image Algorithm Summary](#) for a description of each algorithm and its strengths and weaknesses. Often, it helps to use the 'back projection' algorithm to generate an initial estimate of the image.

The units of the reconstructed images are photons cm⁻² sec⁻¹ arcsec⁻².

On this page:

- [RHESSI Image Software Basics](#)
- [Using Different Algorithms](#)
- [ANNSEC Coordinate System](#)
- [Grid Selection in Making Images](#)
- [Using RHESSI Image FITS Files](#)
- [RHESSI Image Cubes](#)
- [Data Stacking](#)
- [Visibilities](#)
- [Using Image Modulation Profiles to Evaluate Image Quality](#)

External Links:

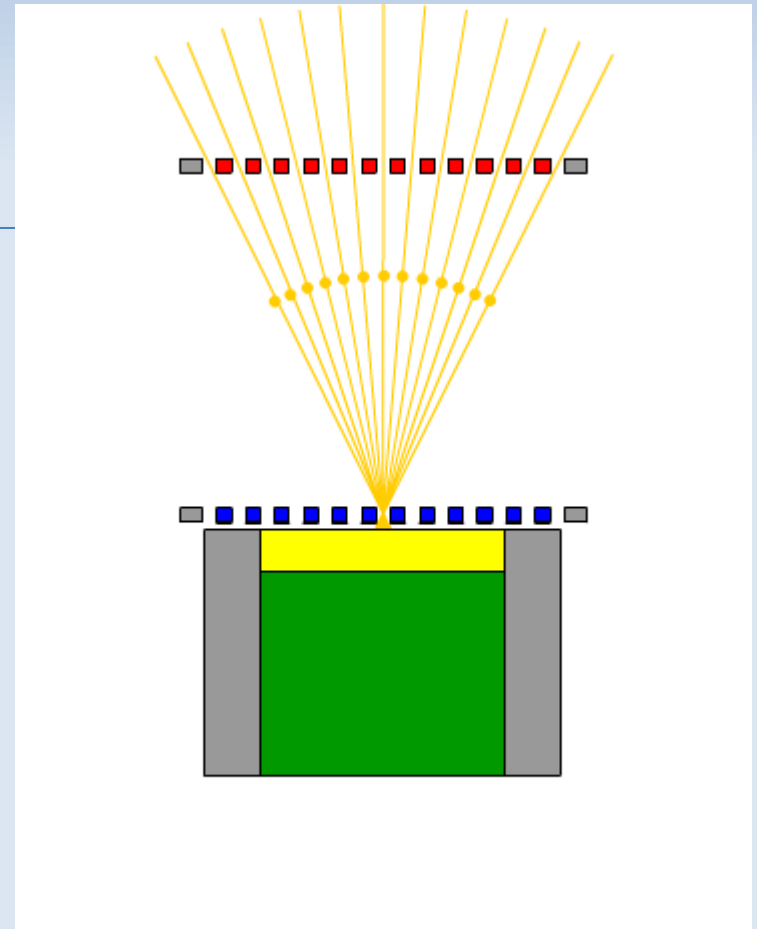
- [How to Work with the Image Object](#)
- [RHESSI Imaging - First Steps](#)
- [Image Object Parameter Table](#)
- [Using Visibility Objects in the RHESSI Software](#)
- [Measurement and Interpretation of X-ray Visibilities with RHESSI \(Poster 2005\)](#)
- [RHESSI Visibilities Nugget](#)
- [Wiki Article on RHESSI Visibilities](#)
- [Choosing the Number of Roll Bins for RHESSI Visibilities](#)
- [Image Modulation Profiles](#)
- [Image Object Hierarchy Diagram](#)

algorytm **Back Projection**

Polega na określeniu możliwych ścieżek, którymi foton mógł dotrzeć do detektora przy danej geometrii kolimatora.

Śledzenie tych ścieżek wstecz do Słońca („back projection”) tworzy na niebie mapę złożoną z wielu równoległych linii, wskazujących, skąd foton mógł pochodzić.

Foton nie mógł pochodzić z punktu na Słońcu znajdującego się pomiędzy liniami, ponieważ w takim przypadku zostałby zatrzymany przez szczelbelki jednej z siatek i nie dotarłby do detektora.

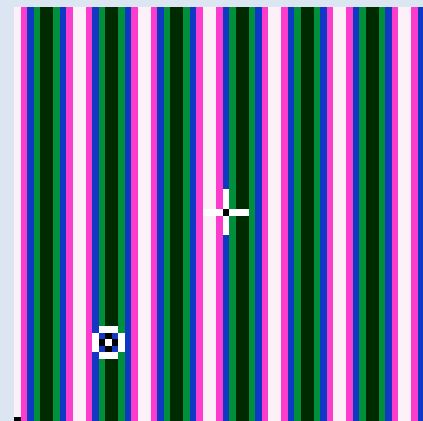
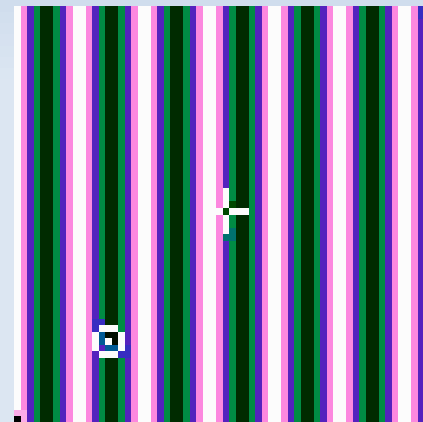


algorytm **Back Projection**

Mapa prawdopodobieństwa położenia źródła na Słońcu w danym momencie obrotu RHESSI. Biały kolor to wysokie prawdopodobieństwo, czarny – niskie, że wykryty w tym czasie foton pochodził z danego obszaru na Słońcu.

Wraz z rotacją RHESSI i zmianą kąta siatek, zmienia się ustawienie mapy prawdopodobieństwa.

Źródło (punktowe) znajduje się w dolnym lewym rogu pola. Oś obrotu RHESSI pokazuje znak + w centrum pola.



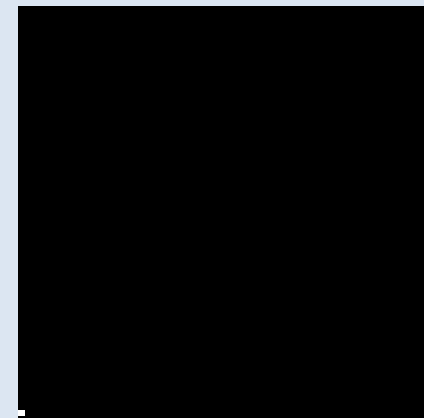
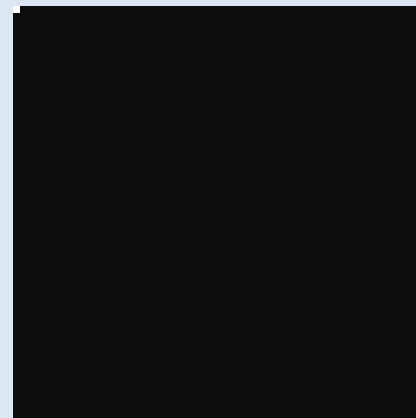
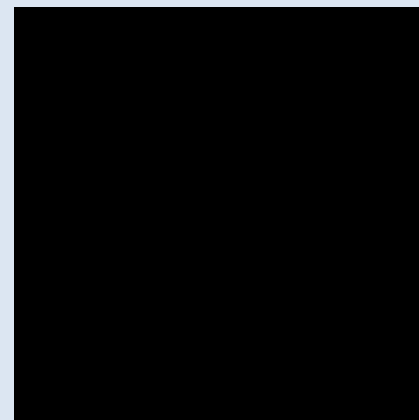
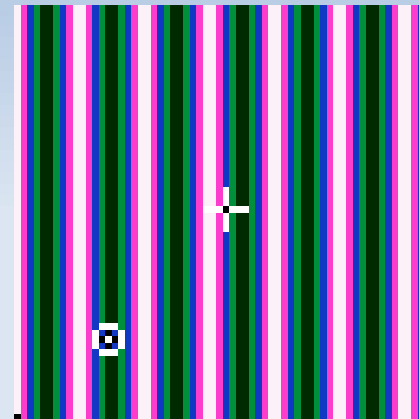
algorytm **Back Projection**

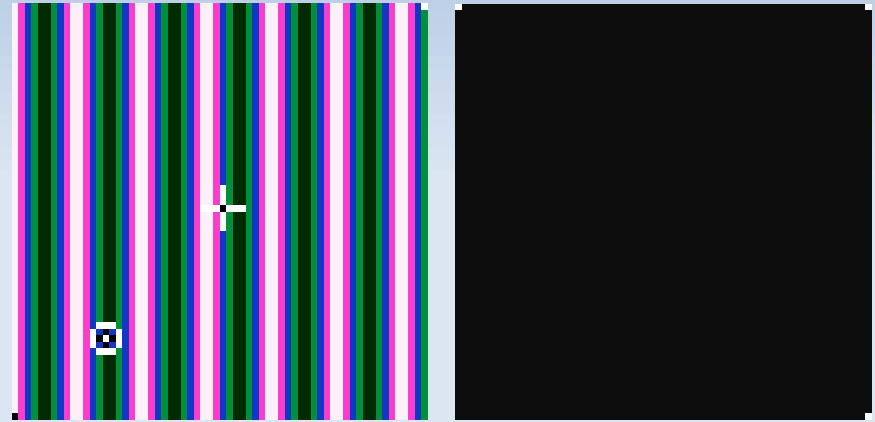
Rotacja RHESSI i zmiana ustawienia mapy prawdopodobieństwa powoduje zmianę liczby fotonów docierających do detektora.

Z punktu widzenia detektora zmiana wygląda jak na animacji obok. Rotacja jest niewidoczna, ponieważ detektor rotuje razem z siatkami. Białe – fotony przechodzą do detektora, czarne – nie.

Detektor nie posiada przestrzennej zdolności rozdzielczej, więc rejestruje jedynie wartość docierającego strumienia fotonów.

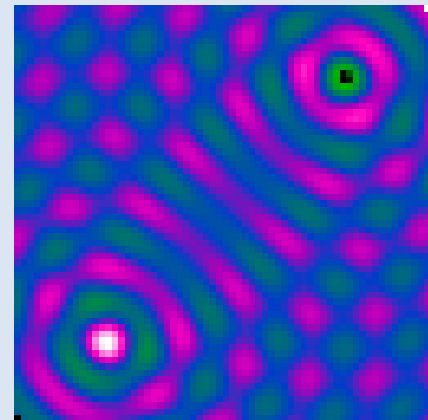
Można to przedstawić w postaci krzywej blasku (profil modulacji)





algorytm **Back Projection**

Obraz jest rekonstruowany poprzez dodawanie map prawdopodobieństwa ważonych sygnałem mierzonym przez detektor.

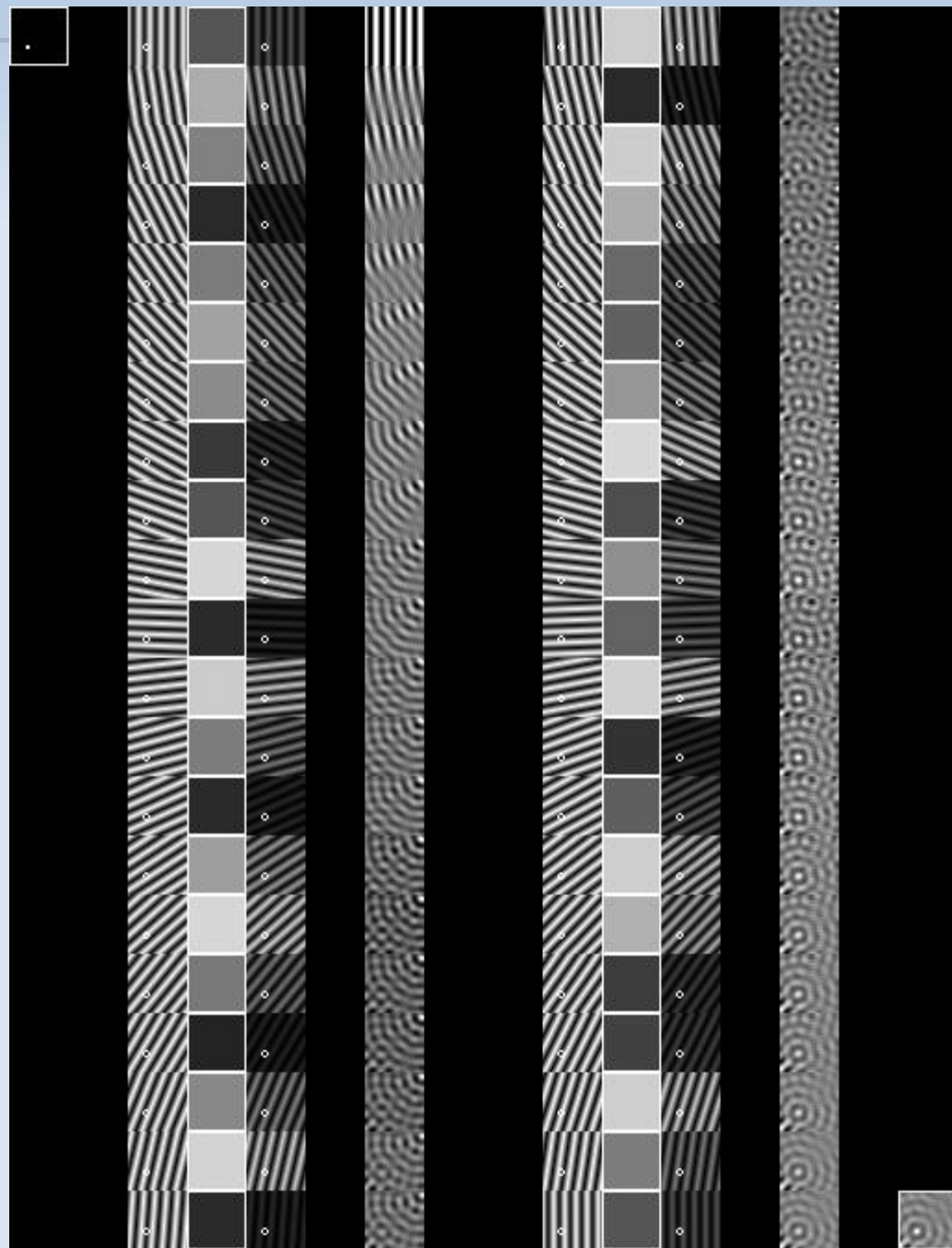


Tworzenie obrazu metodą BP w miarę obrotu RHESSI w czasie 1 pełnej rotacji dla **siatki 5''**.

Źródło symulowane jest w górnym lewym rogu. Zrekonstruowany obraz jest w dolnym prawym rogu. Każdy zestaw kolumn pokazuje połowę czasu 1 rotacji (2 s). Czas biegnie w dół.

Kolejne kolumny zawierają:

- mapa prawdopodobieństw (biały – największe prawdopodobieństwo)
- zmierzony na detektorze sygnał
- kolumna 1 ważona sygnałem z kolumny 2
- suma kolejnych map ważonych prawdopodobieństw, która po pełnym obrocie daje ostateczny obraz

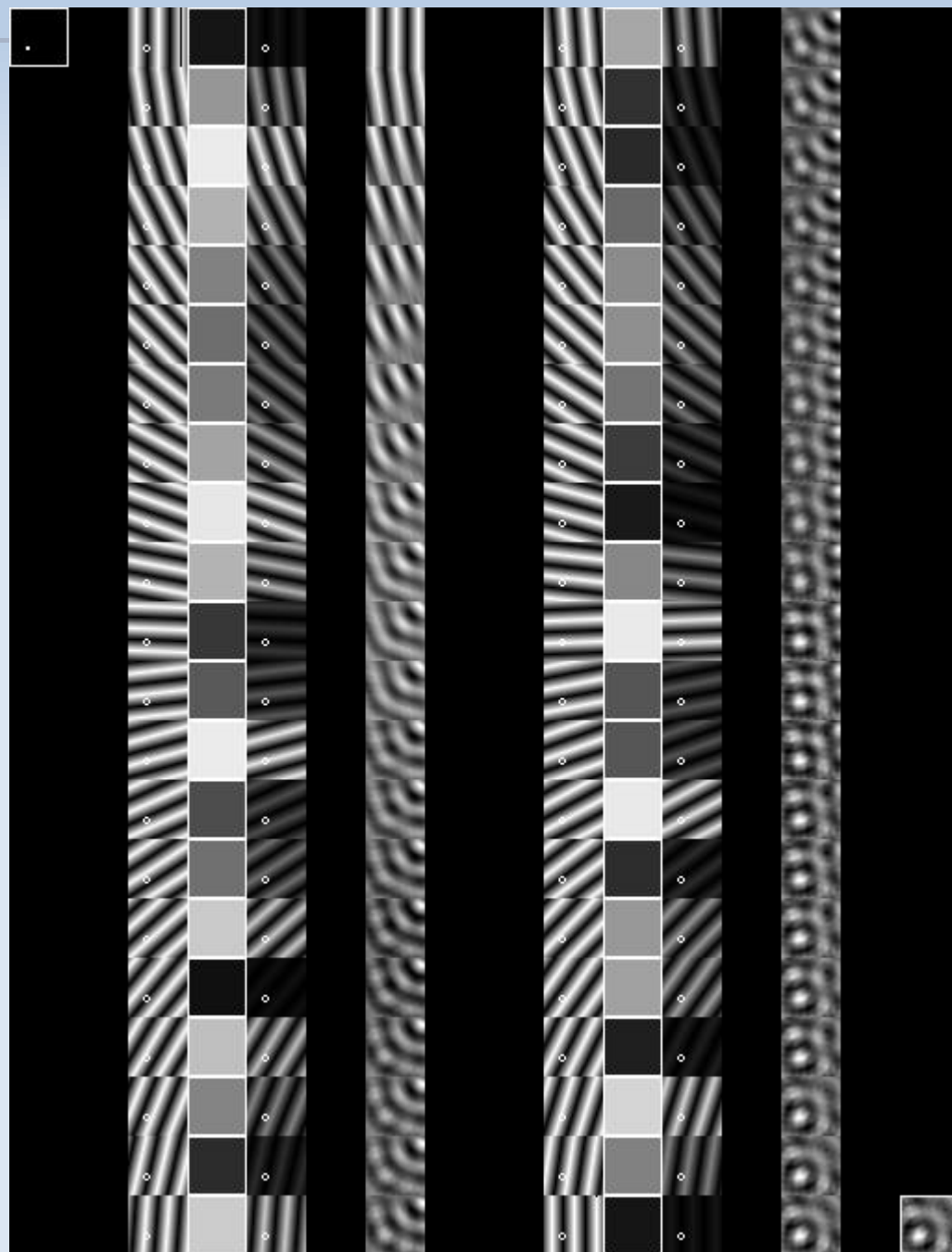


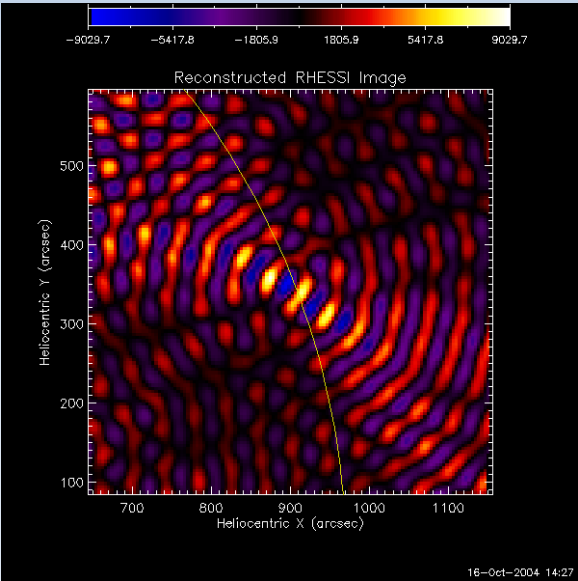
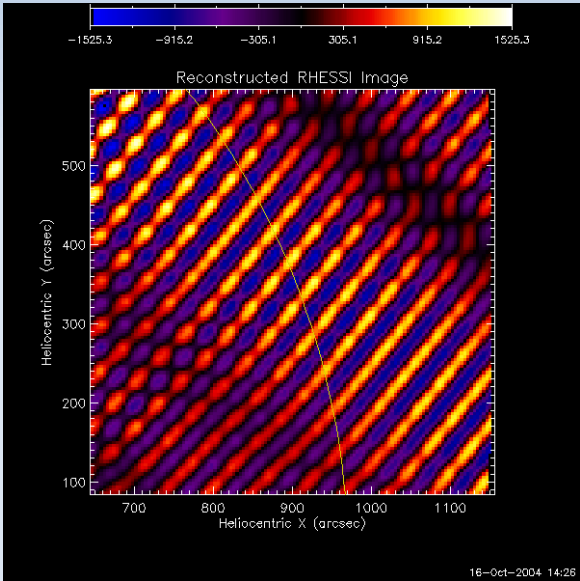
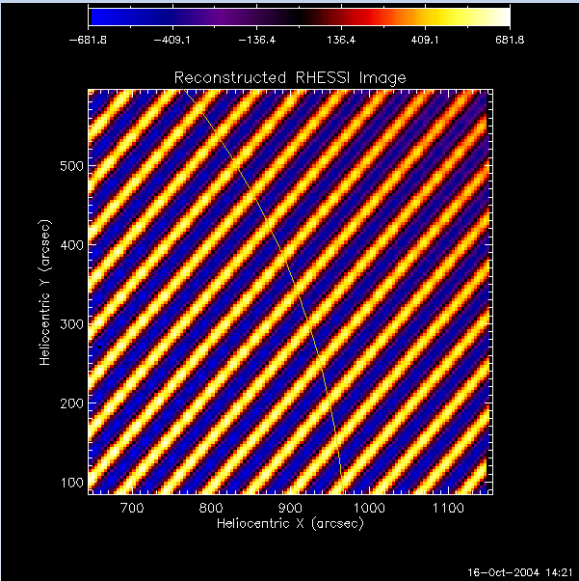
Tworzenie obrazu metodą BP w miarę obrotu RHESSI w czasie 1 pełnej rotacji dla **siatki 10.5"**.

Źródło symulowane jest w górnym lewym rogu. Zrekonstruowany obraz jest w dolnym prawym rogu. Każdy zestaw kolumn pokazuje połowę czasu 1 rotacji (2 s). Czas biegnie w dół.

Kolejne kolumny zawierają:

- mapa prawdopodobieństw (biały – największe prawdopodobieństwo)
- zmierzony na detektorze sygnał
- kolumna 1 ważona sygnałem z kolumny 2
- suma kolejnych map ważonych prawdopodobieństw, która po pełnym obrocie daje ostateczny obraz

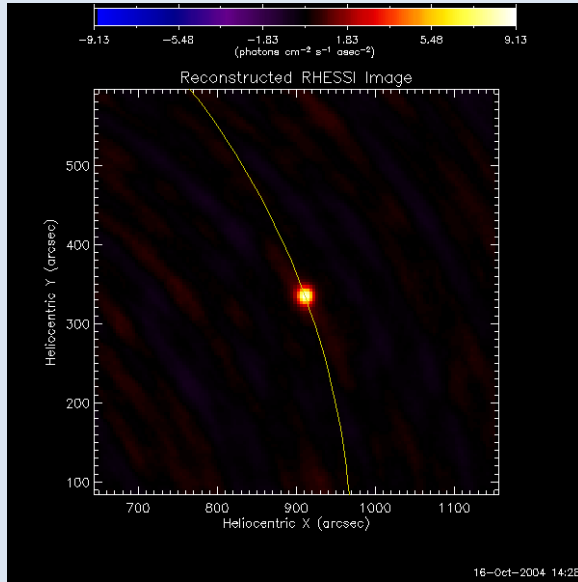
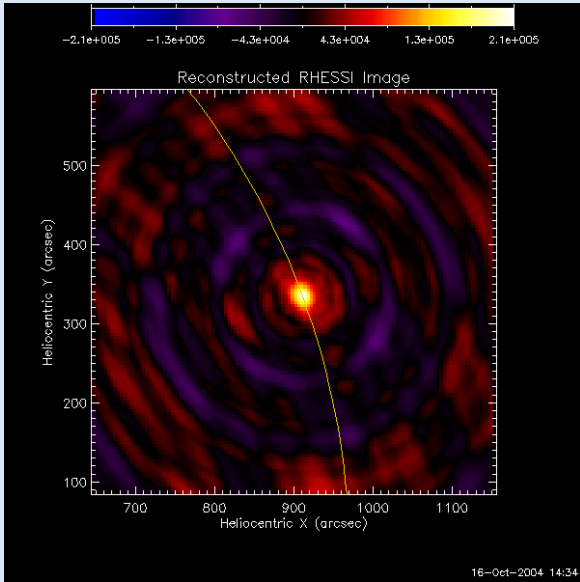
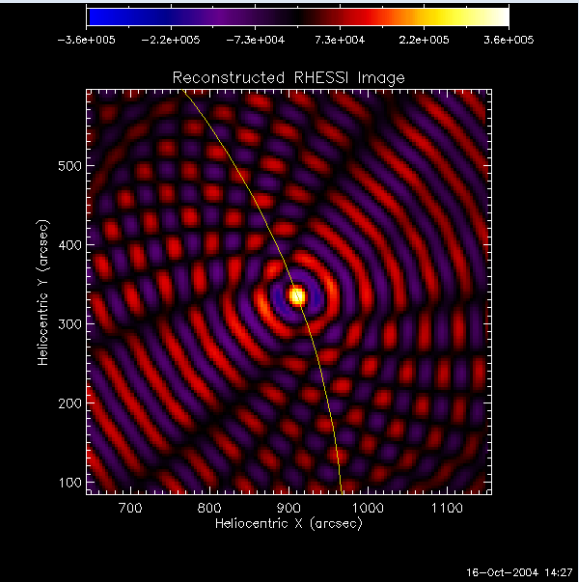




dany moment/jeden foton

10 stopni rotacji

90 stopni rotacji



wiele rotacji

siatki 3 – 8

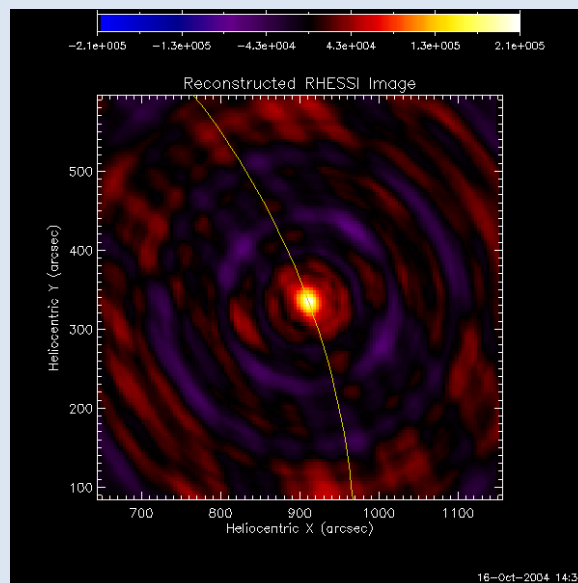
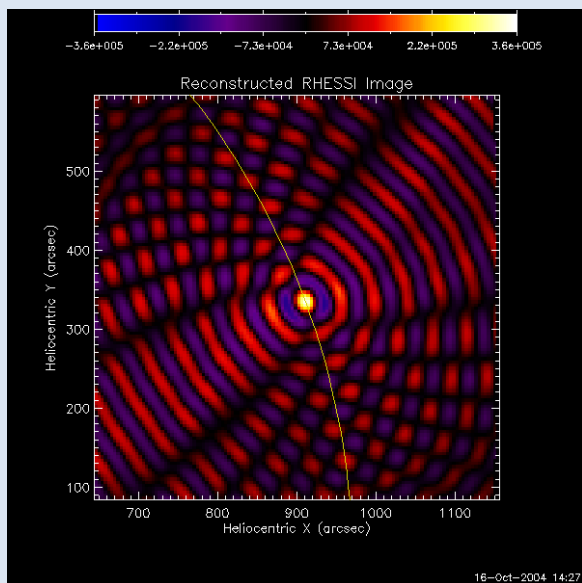
obraz oczyszczony

algorytm **Back Projection**

obraz końcowy: zrekonstruowany obraz jest konwolucją rzeczywistego źródła z funkcją odpowiedzi dla źródła punktowego, nazywany jest dirty map

zalety: metoda bardzo szybka, prosta, liniowa, nie wymaga wstępnych założeń odnośnie geometrii źródeł, daje dobre współrzędne źródeł (nawet słabych), dobra do selekcji subkolimatorów do innych metod

wady: obrazy słabej jakości z płátami bocznymi, nie nadaje się do wyznaczania rozmiarów źródeł i fotometrii, trudność z uzyskanie obrazu słabszych źródeł w obecności silniejszych (niski zakres dynamiczny).



algorytm **Clean**

- Algorytm iteracyjny bazujący na założeniu, że obraz może być przedstawiony jako złożenie źródeł punktowych.
- Algorytm zaczyna od dirty map utworzonej przez BP. Znajdowany jest najjaśniejszym piksel tej mapy.
- Przyjmuje się, że w tym miejscu znajduje się źródło punktowe o jasności będącej ułamkiem jasności danego piksela (loop gain, typowo ok 5%).
- Od dirty map odejmowany jest PSF odpowiadający temu źródłu punktowemu (lokalizacja, jasność). Powstaje residual map (mapa różnic).
- Do mapy CLEAN dodawane jest źródło o kształcie gaussowskim, o szerokości równej rozdzielczości danej siatki, o jasności i lokalizacji źródła punktowego.
- Kroki 1–4 są powtarzane zadaną liczbę kroków lub do momentu, aż pozostałe wartości na residual map spadną poniżej ustalonego poziomu progowego (maks. ujemne > maks. dodatnie).
- Na koniec obraz CLEAN jest splotany z PSF gaussowskim o szerokości odpowiadającej wybranemu zestawowi detektorów.
- Zalety: dość szybki, daje dodatnie strumienie, usuwa boczne płaty
- Wady: błędy w fotometrii, problemy z obrazowaniem źródeł rozciągniętych, zawyża rozmiary źródeł

algorytm **Clean**

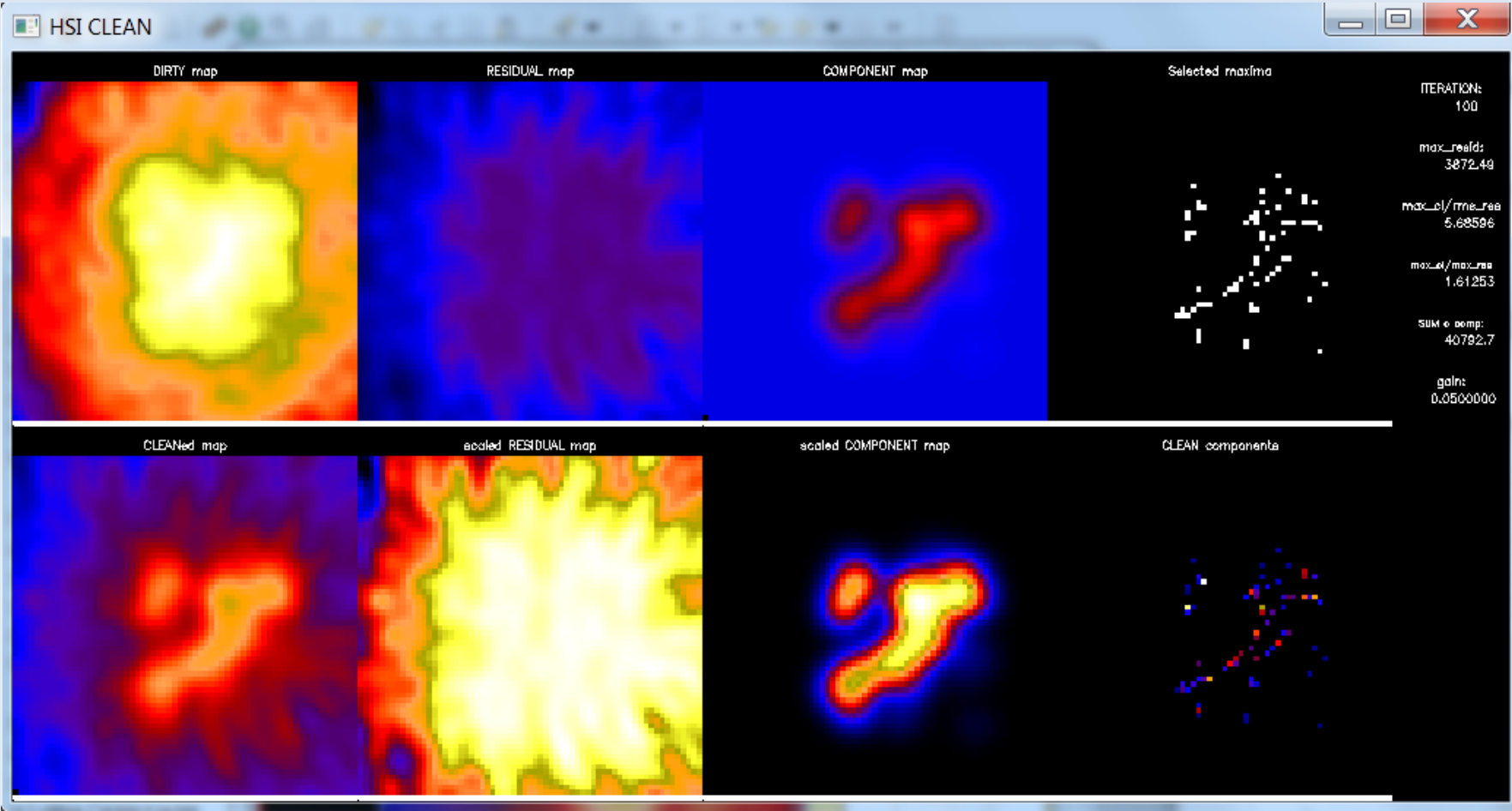
okno pokazujące algorytm w trakcie pracy

wsteczna projekcja

mapa różnic

mapa składników

wybrane maksima



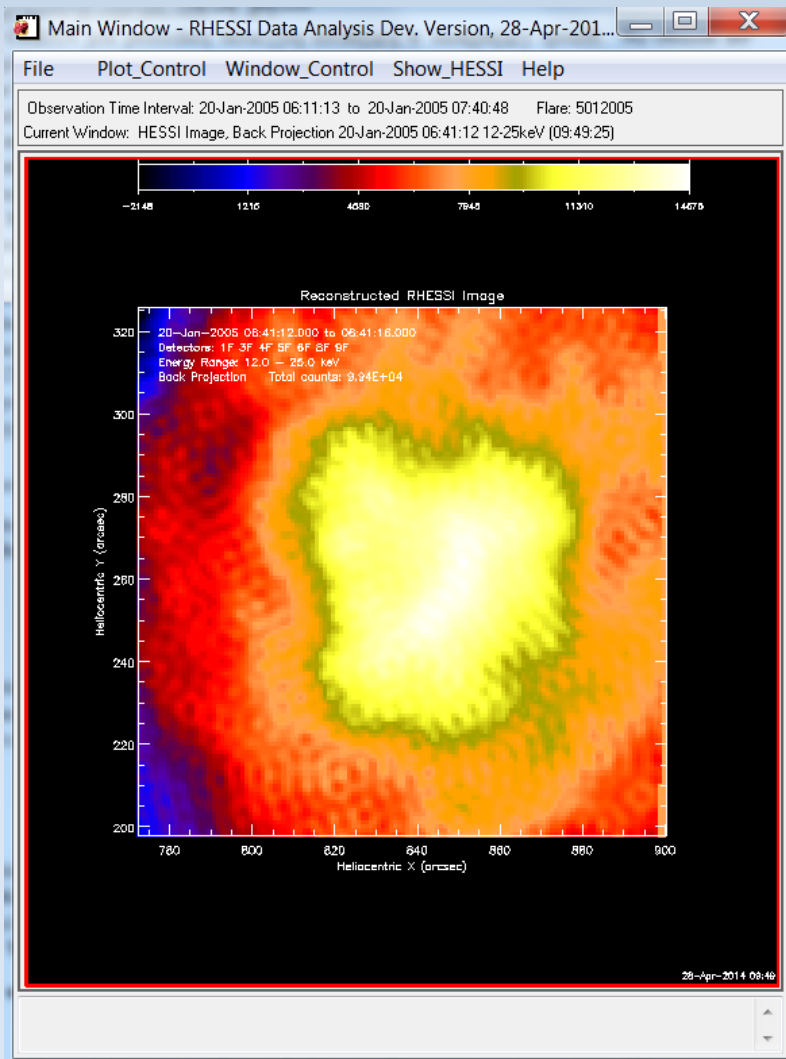
obraz
po wyczyszczeniu

mapa różnic

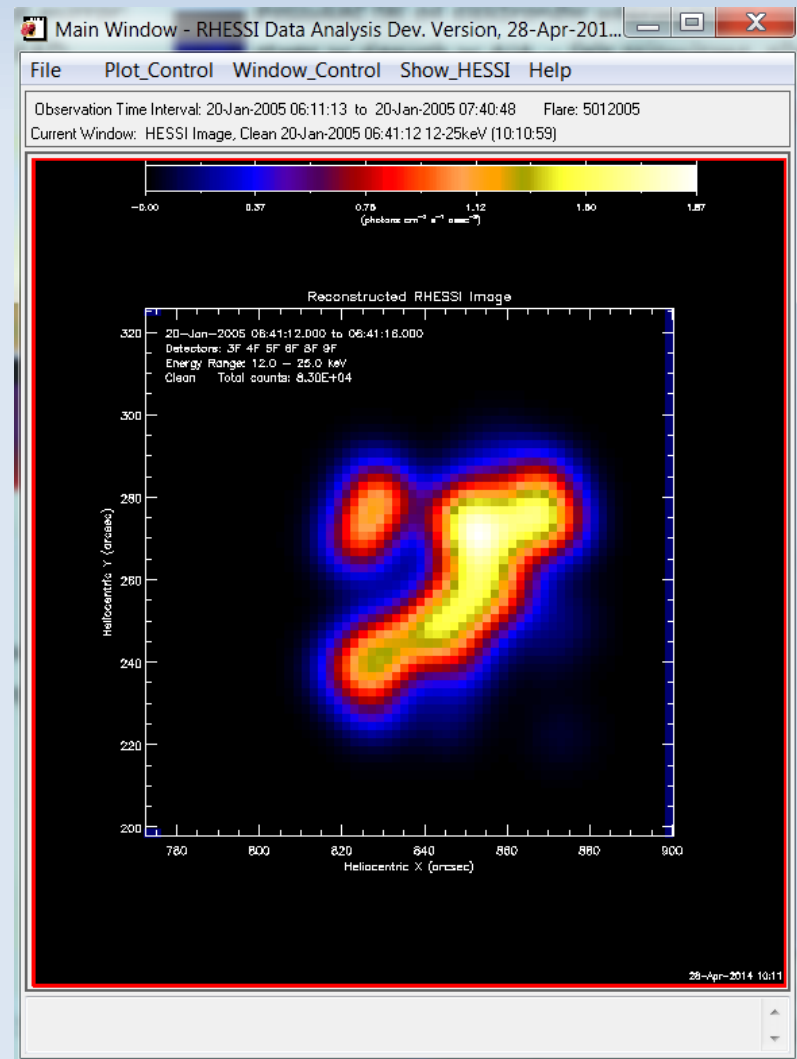
mapa składników

wybrane maksima

skalowane rzeczywistą jasnością



Back Projection



CLEAN

porównanie obrazów dla tego samego rozkładu

Większość (pozostałych) metod rekonstrukcji obrazów bazuje na twierdzeniu Bayesa. Polegają one na maksymalizowaniu rozkładu prawdopodobieństwa rekonstruowanego obrazu (I) i modelu (M), mając dane obserwacje (D):

$$p(I, M|D) = \frac{p(D|I, M)p(I|M)p(M)}{p(D)} \propto p(D|I, M)p(I|M)$$

Model (M) zawiera wszystkie aspekty relacji między obserwacjami a obrazem („mechanika” kodowania obrazu, rozmiar piksela, kwadratowa siatka punktów itd.).

jakość dopasowania (prawdopodobieństwo danych pod warunkiem konkretnego obrazu i modelu)

tzw. obraz pierwotny (nie zależy od obserwacji i może być policzony a priori przed uzyskaniem obserwacji)

Wybór obrazu pierwotnego służy zdefiniowaniu różnych nieliniowych algorytmów rekonstrukcji obrazu. Np. w MEM (maximum entropy method) jest brany jako $\exp(\alpha S)$ gdzie S jest entropią obrazu – najbardziej płaski (rozmyty) obraz jest najbardziej prawdopodobny.

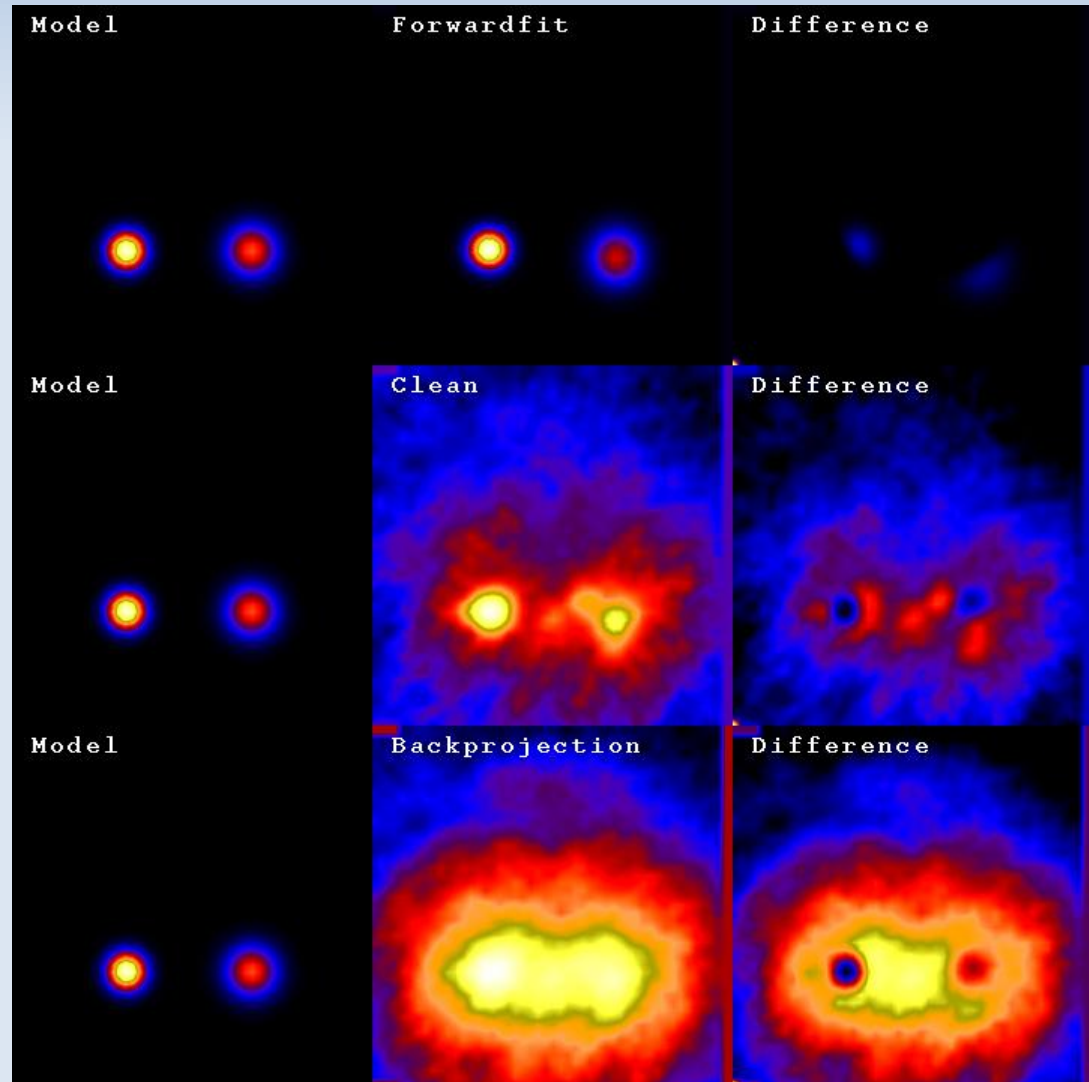
inne algorytmy

Forward Fit

Zakłada, że źródło (lub źródła) można opisać prostą funkcją o niewielkiej liczbie parametrów (na przykład kołowym rozkładem Gaussa) i poszukuje wartości tych parametrów, które prowadzą do uzyskania mapy zgodnej z danymi (zliczenia).

Zalety: szybki, dodatnie strumienie, daje rozmiary źródeł wraz z błędami

Wady: wymaga założeń odnośnie liczby i kształtu źródeł.



przykładowe obrazy BP, CLEAN, i Foward Fit
zrekonstruowane dla danych danych syntetycznych
(symulacja pary źródeł)

hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi/docs/imaging/hessi_fwd_comp.html

Pixon

Kluczowym elementem metody jest to, że nie wszystkie części obrazu potrzebują tej samej rozdzielczości przestrzennej. W przypadku obrazów HXR większość obrazu jest czarna (nie zawiera źródeł) – tu można użyć niskiej rozdzielczości (duże „piksele”). To zmniejsza liczbę stopni swobody. W miejscu rzeczywistych źródeł „piksele” będą mniejsze.

„Pikselem” jest tzw. pixon. (uogólnienie piksela). Jest zmienną komórką obrazu reprezentującą jeden stopień swobody.

W idealnym przypadku zrekonstruowany obraz składa się z minimalnej liczby pixonów (o różnych skalach) potrzebnych do opisania informacji zawartej w obrazie.

Zalety: dokładna fotometria, bdb do źródeł rozciągniętych przy obecności małych

Wady: wolny, tendencja do nadrozdzielczości

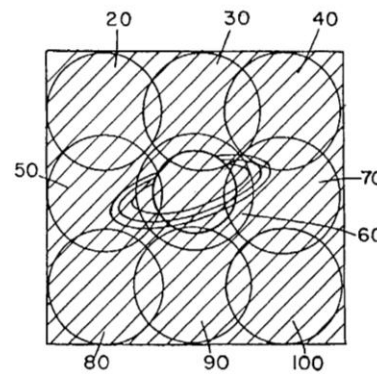


Figure 7a

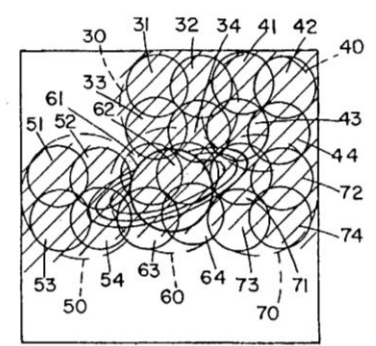


Figure 7b

Pina & Puetter 1993

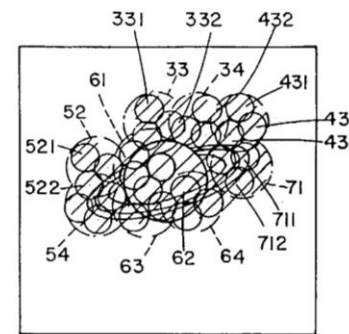


Figure 7c

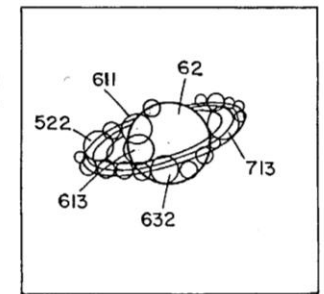
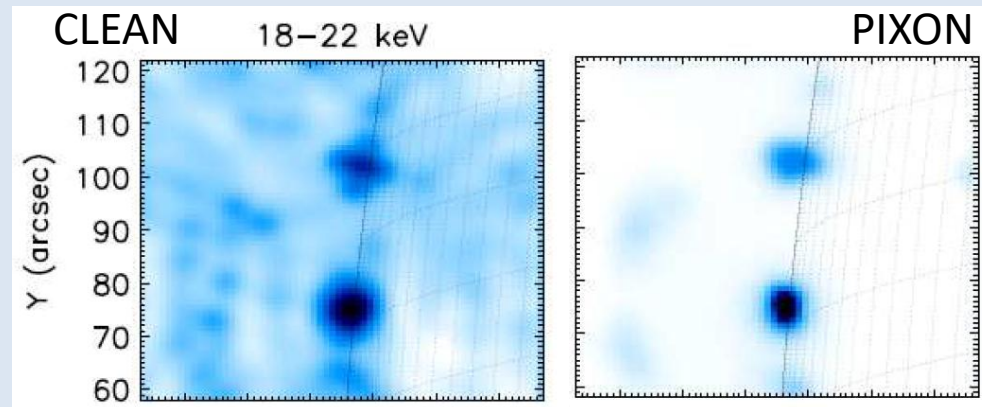


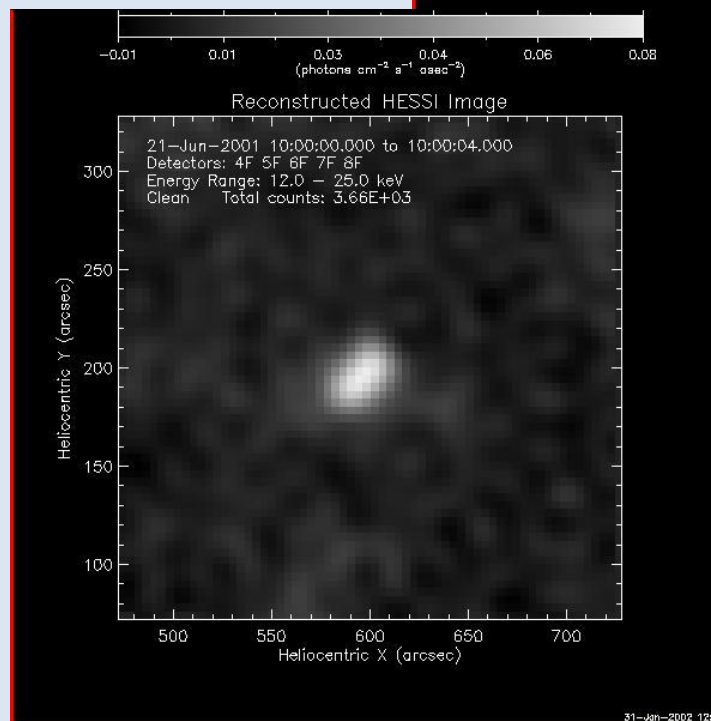
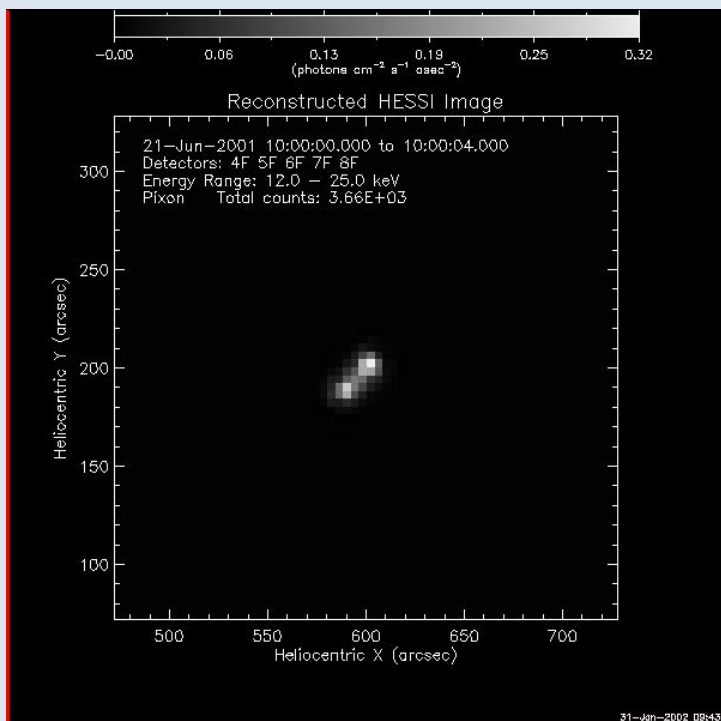
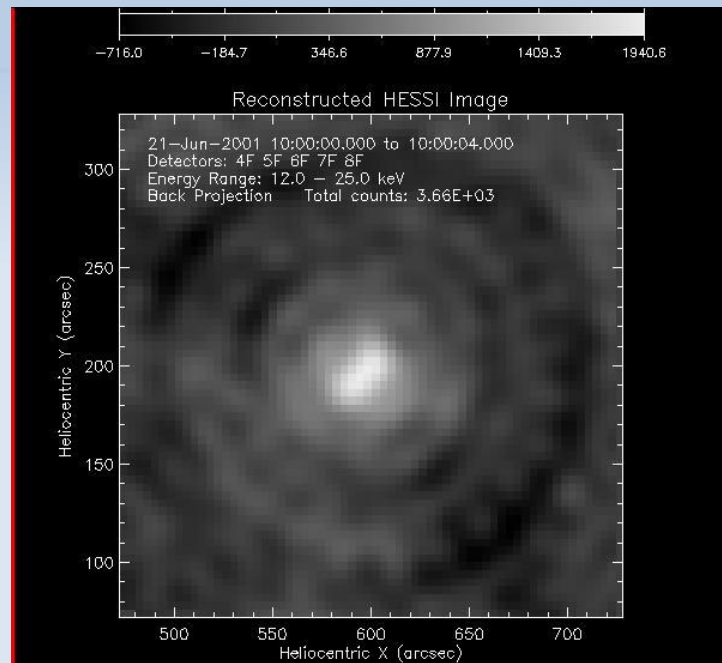
Figure 7d

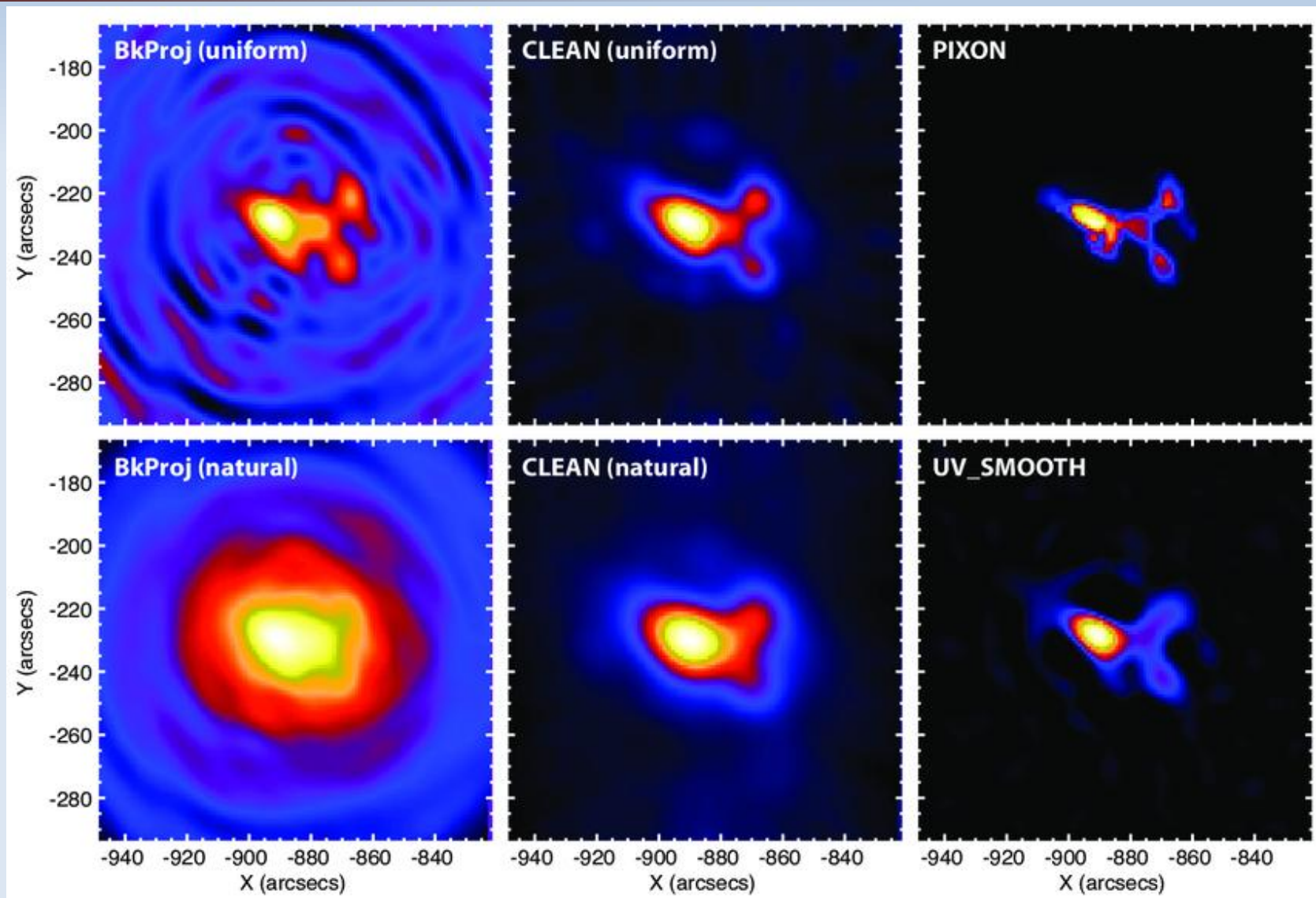


Porównanie obrazów dla tego samego rozbłsku [Kontar 2009]

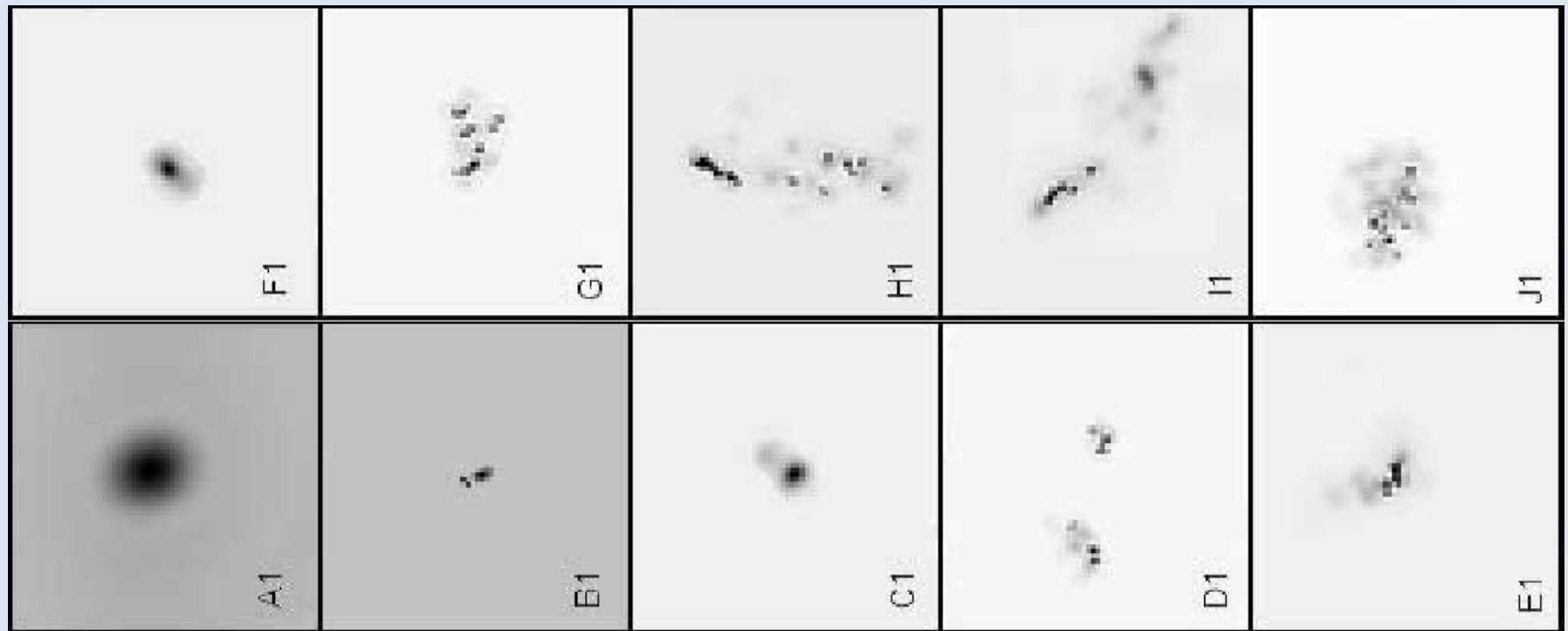
Porównanie obrazów zrekonstruowanych metodami (hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessidatcenter/simulations/chris_johns_krull.html)

- Back Projection
- CLEAN
- PIXON





Porównanie rekonstrukcji obrazu przy użyciu metod: Back Projection, CLEAN (z wagami uniform i natural), PIXON oraz UV_SMOOTH dla emisji w zakresie 25–50 keV rozbłysku z 23.07.2002, z wykorzystaniem siatek 3–6, 9. Silne płaty boczne widoczne w PB są usuwane przez pozostałe algorytmy. Obraz PIXON przejawia zjawisko nadrozdzielczości [Caspi 2010].



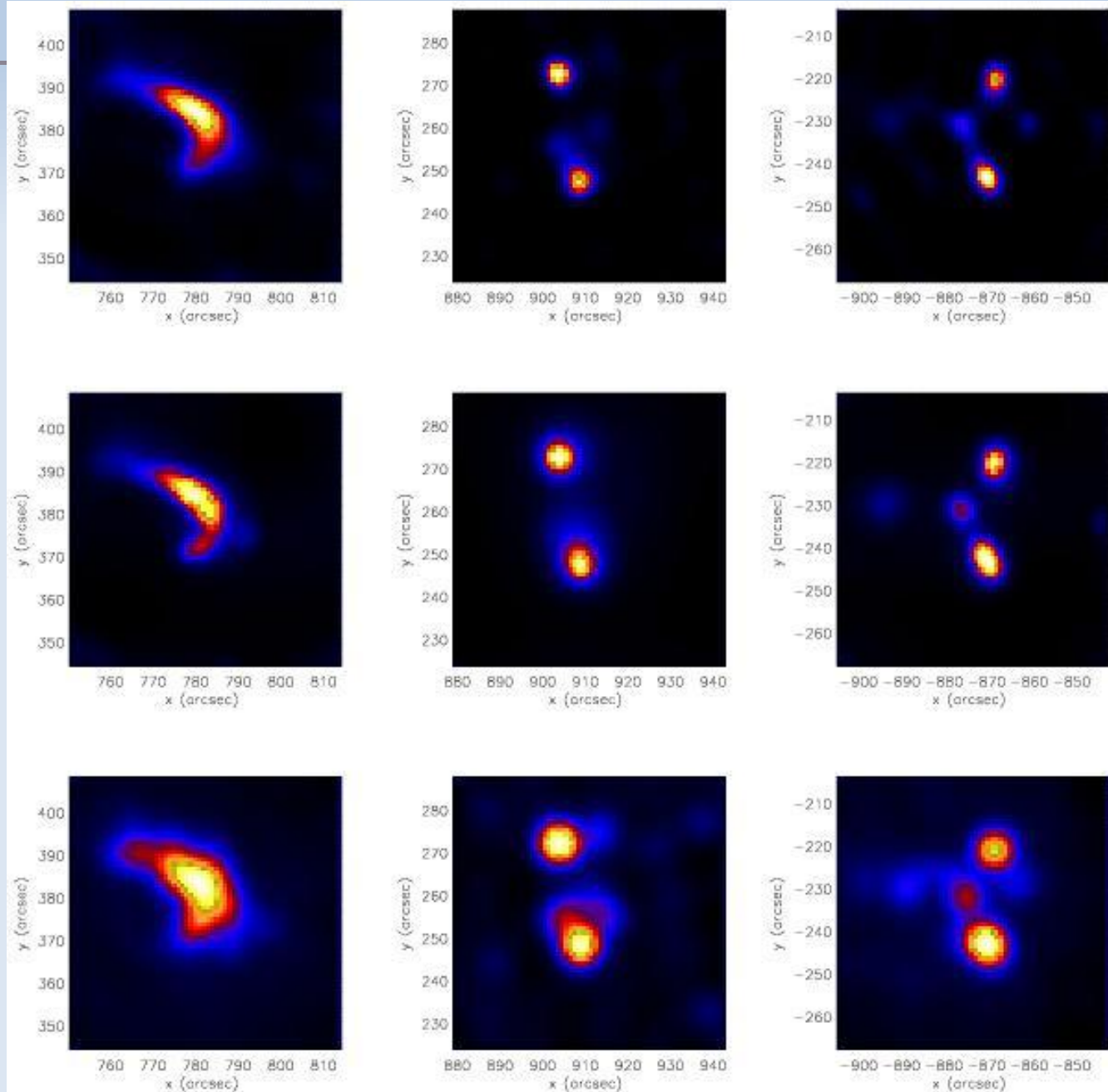
Problem nadrozdzielczości metody PIXON [Alexander & Daou 2008]

Expectation Maximization

Metoda rekonstrukcji oparta na metodzie największej wiarygodności Richardson-Lucy. Metoda opiera się na schemacie iteracyjnym, który wykorzystuje odchylenia przewidywanych zliczeń (uzyskanych z bieżącego obrazu) od zliczeń zaobserwowanych do wprowadzania zmian w aktualnym obrazie.

Zalety: dokładna fotometria, dość odporna na dobór kolimatorów

Wady: nie jest szybka, wymaga większej liczby zliczeń



Porównanie działania metod EM (górny wiersz), PIXON (środkowy), CLEAN (dolny) dla trzech rozbłysków (w kolumnach) [Benvenuto et al. 2013]

Wybór zestawu przedziałów czasu do rekonstrukcji obrazów.

Wybór formatu danych wejściowych (RAW, FITS etc.). Wybór przedziału czasu do analizy.

Wybór zestawu przedziałów energii

Wybór zestawu detektorów

Ustalenie rozmiaru obrazu (w pikselach), rozmiaru piksela (w sekundach), współrzędnych środka obrazu.

Wybór metody rekonstrukcji i jej parametrów

Dodatkowe parametry poprawiające zbieżność metody

Format wyjściowy i prezentacja danych pośrednich

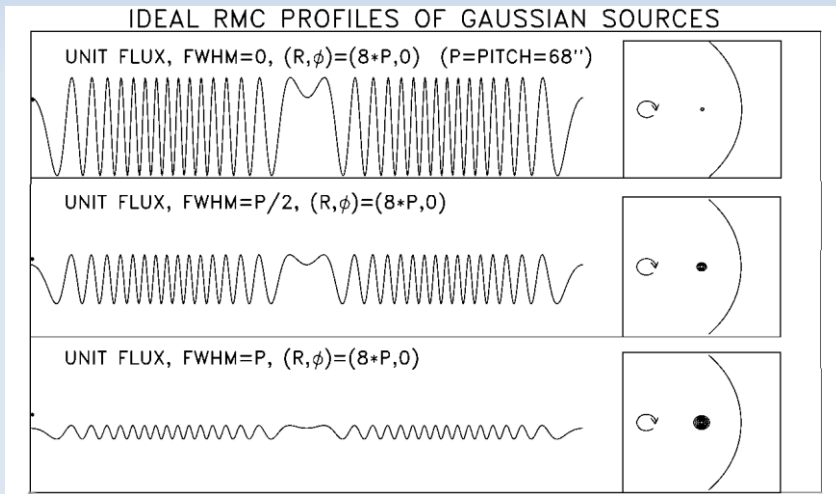
Zestaw dodatkowych komend, w tym polecenie startujące rekonstrukcję (Make/Plot Image(s))

Okno GUI (Graphical User Interface) umożliwiające rekonstrukcję obrazów przy wybranych przez użytkownika ustawieniach. Duża liczba możliwych do zmiany parametrów daje sporo możliwości, ale wymaga od użytkownika doświadczenia i ostrożności.

Ogólne zasady rekonstrukcji (dobre praktyki):

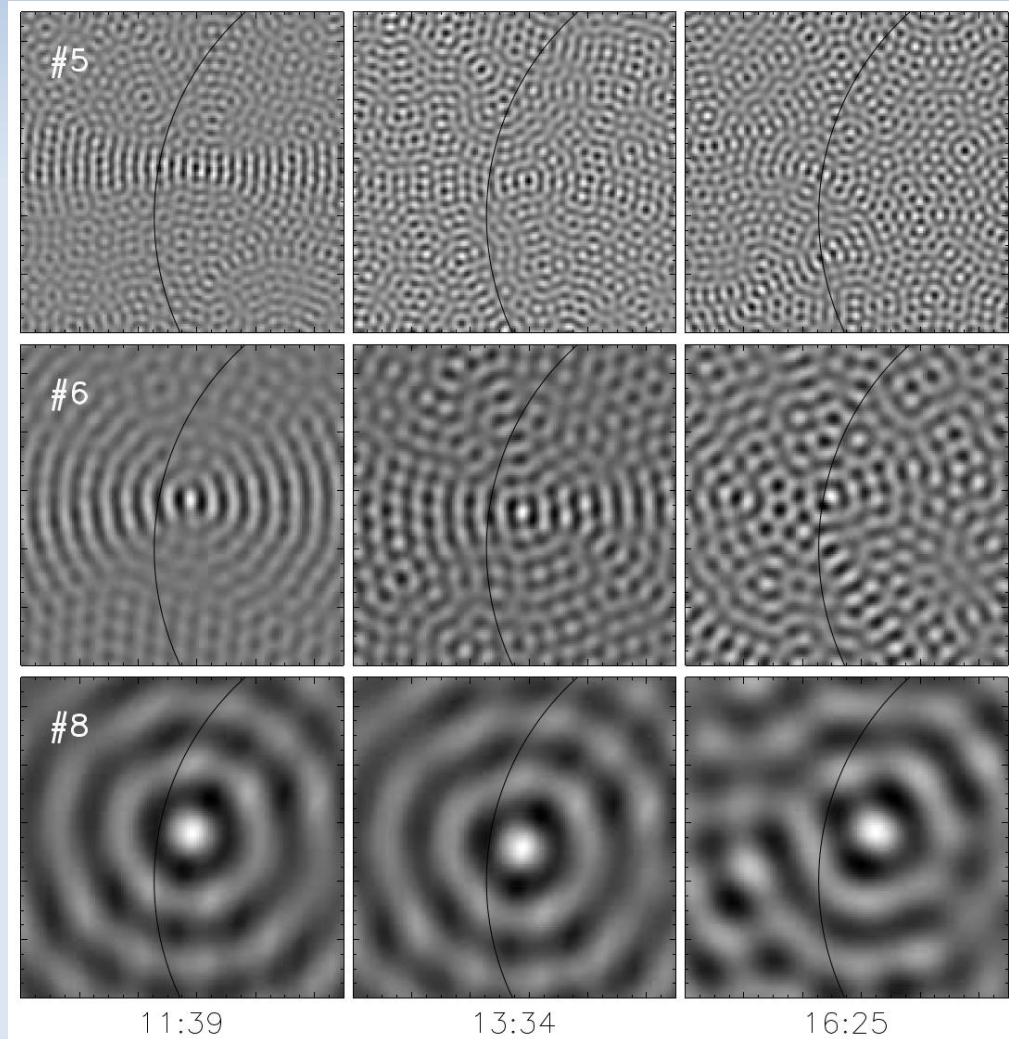
- zwykle używa się standardowego zestawu detektorów (3-6,8,9) i współrzędnych katalogowych (w razie potrzeb można to zmienić)
- dla kontroli można wykonać obraz całego Słońca
- można użyć metody wyboru kolimatorów (siatek) w celu uniknięcia tych bez modulacji (patrz następny slajd)
- używamy tak wąskich przedziałów energii, jak to tylko możliwe (groźba błędnych interpretacji)
- dobieramy przedział czasu do rekonstrukcji tak, aby zliczenia na obrazie końcowym mieściły się w zakresie 1000-10000 z tolerancją 20% (PIXON, EM wymaga więcej zliczeń)
- długość przedziałów czasu do rekonstrukcji powinna być dopasowana do tempa ewolucji zjawiska
- kontrolujemy powtarzalność pojawiania się źródeł przy użyciu różnych parametrów/metod/sąsiednich przedziałów energii lub czasu
- najpierw rekonstruujemy obrazy metodami szybkimi, a potem dopiero wolnymi (lepszymi) (PIXON, EM)

Wraz ze wzrostem rozmiaru źródła maleje amplituda modulacji sygnału dla danej siatki.



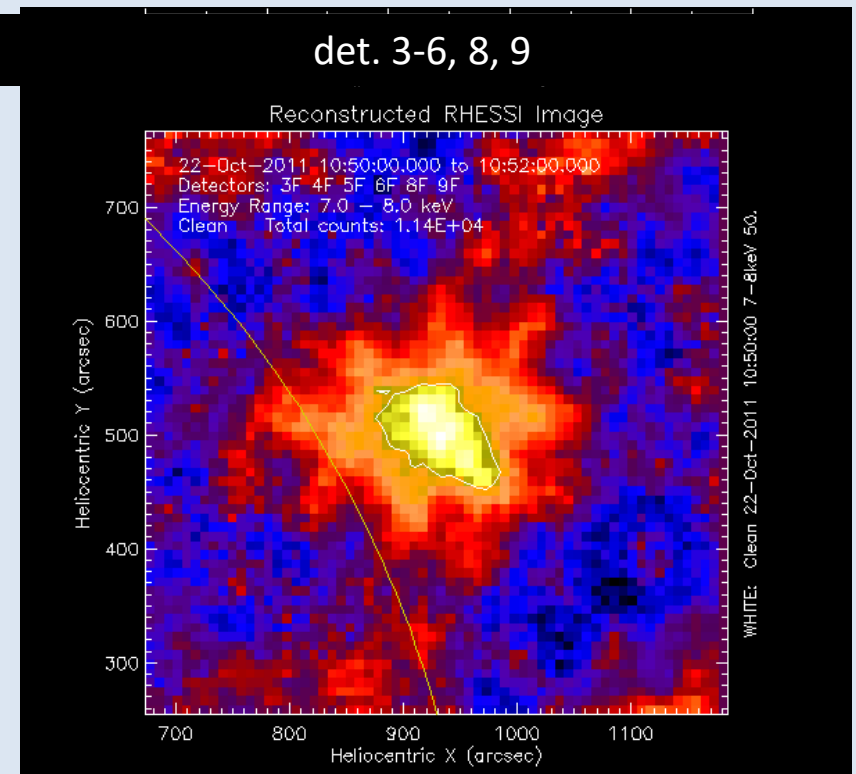
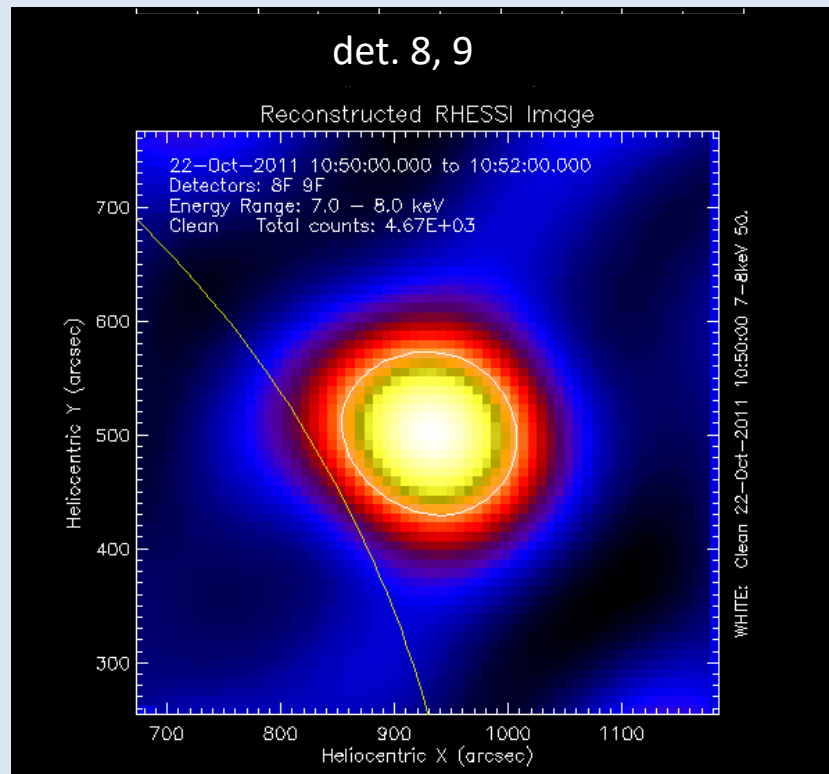
Jeśli rozmiar źródła $\geq$ rozdzielczość siatki $\Rightarrow$ modulacja jest bardzo słaba lub nie występuje $\Rightarrow$ brak informacji o źródle $\Rightarrow$ obraz otrzymany z tej siatki jest zdominowany przez szum

Dodanie takiej siatki do zestawu siatek użytych do rekonstrukcji może spowodować otrzymanie obrazu niskiej jakości. Dlatego należy do rekonstrukcji używać tylko siatek, które dla analizowanego rozbłysku dają istotną modulację sygnału. Sprawdzenia można dokonać rekonstruując obrazy metodą BP dla pojedynczych siatek.



Obrazy uzyskane metodą BP dla pojedynczych siatek (5, 6, 8) dla 3 momentów czasu rozbłysku z 30.07.2005. Obraz dla siatki nr 5 nie zawiera informacji o źródle, pozostałe dwie siatki – tak. Rozmiar źródła musi być zatem $> 20''$ (FWHM siatki nr 5) [Kołomański i in. 2011]

Przykład działania metody doboru siatek

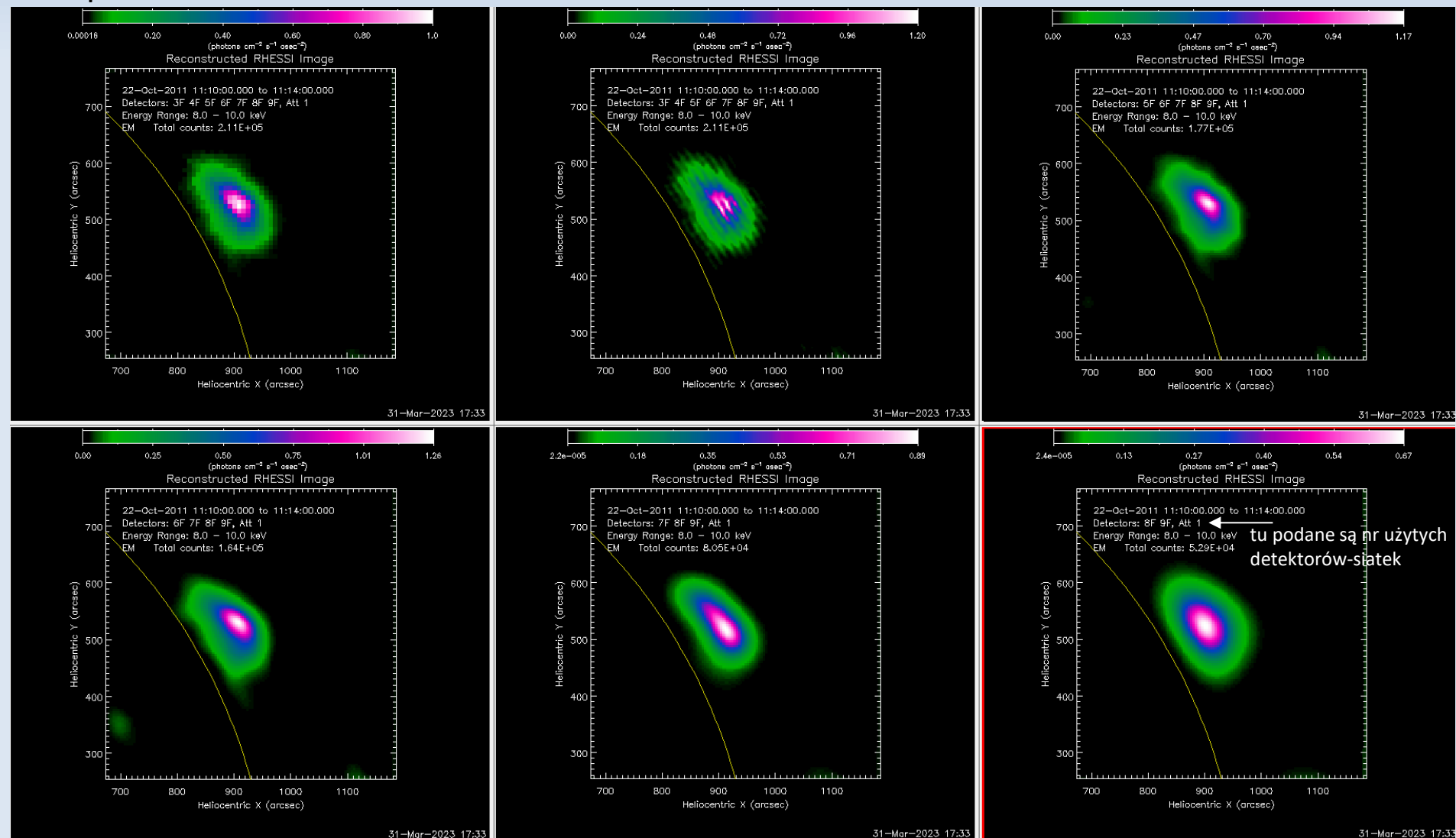


tylko siatki, które dały modulację sygnału (8, 9)

„standardowy” stały zestaw siatek (3 - 6, 8, 9)

oba obrazy uzyskane dla tego samego momentu czasu, przedziału energii 7-8 keV
i czasu integracji sygnału 2 min

Algorytm Expectation Maximization (EM) wydaje się bardziej odporny na poprawny dobór siatek niż np. PIXON

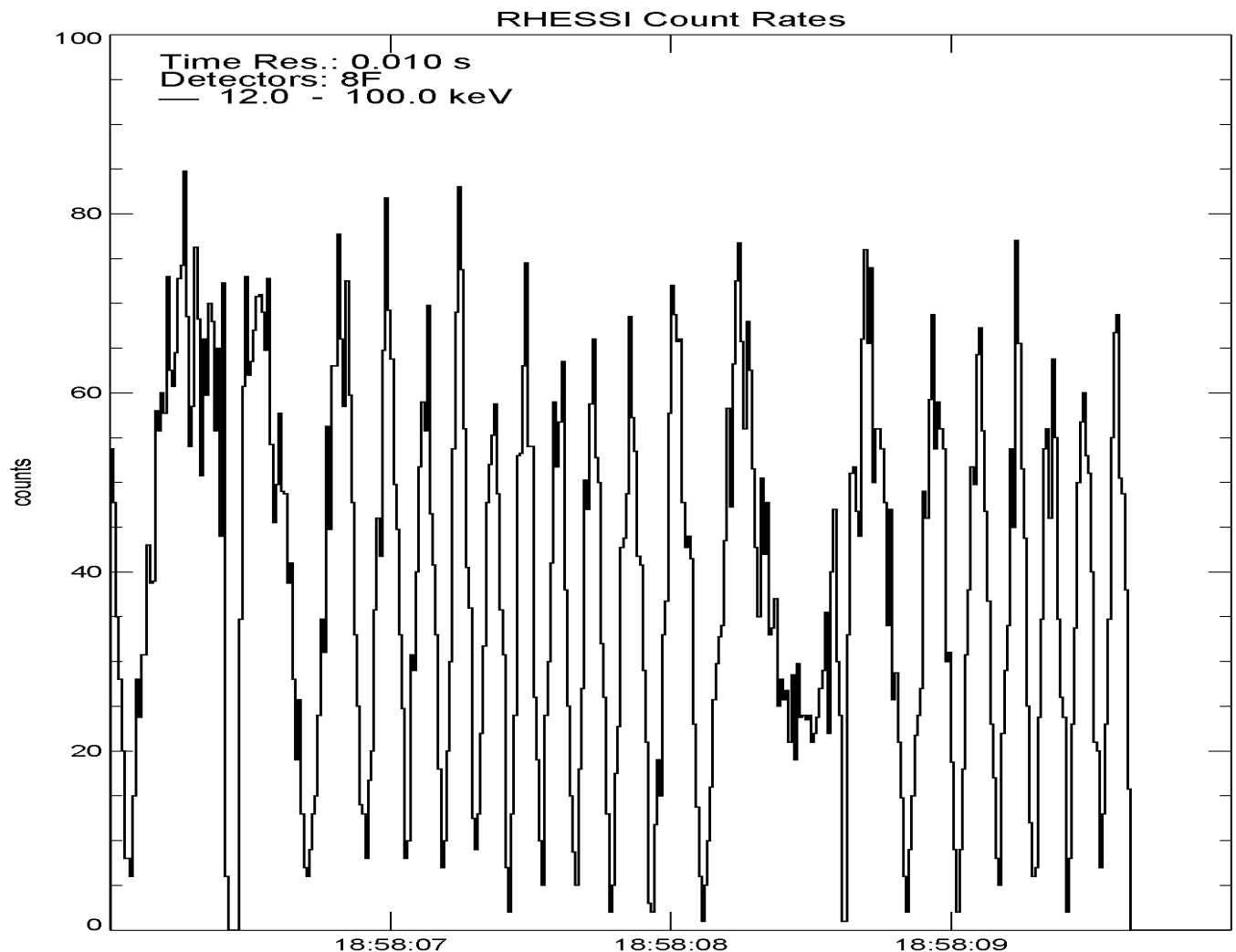


test: rozbłysk Sol2011-10-22T11:10, różne zestawy siatek, 8-10 keV; obecność modulacji sygnału:
siatki 1-5: nie, siatki 6-9 tak

Zadanie do rozwiązania

Odpowiedzi na poniższe pytanie wraz z uzasadnieniem proszę przestać mejlowo.

Osoba, która pierwsza prześle poprawną odpowiedź otrzyma +0.5 stopnia na egzaminie.



Wykres pokazuje profil modulacji dla sub-kolimatora 8.

Parametry sub-kolimatorów (siatek) są w tabeli na jednym z wcześniejszych slajdów.

Oś rotacji jest w położeniu $x=246$ $y=-73$ sekund łuku we współrzędnych heliocentrycznych.

Tempo rotacji to 15 obrotów na minutę (1 obrót = 4 s), w kierunku zgodnym ze wskazówkami zegara (patrząc od tyłu RHESSI).

Szczeliny sub-kolimatora 8 ustawione są równolegle do osi rotacji Słońca w momencie 18:58:08.5 UT

Pytanie: gdzie znajduje się źródło emisji? (oszacowanie z dokładnością $\pm 200''$)

Spectrometer/Telescope for Imaging X-rays (STIX)

Układ optyczny: MC

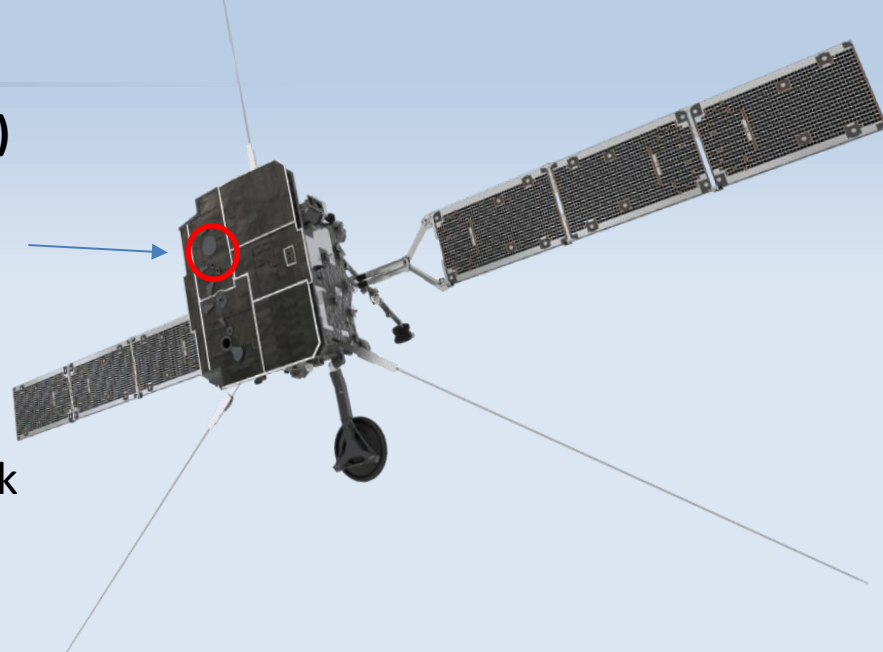
Zakres: 4 – 150 keV

Rozdzielczość: 7 arcsec, 1-15 keV, 0.1-1 s

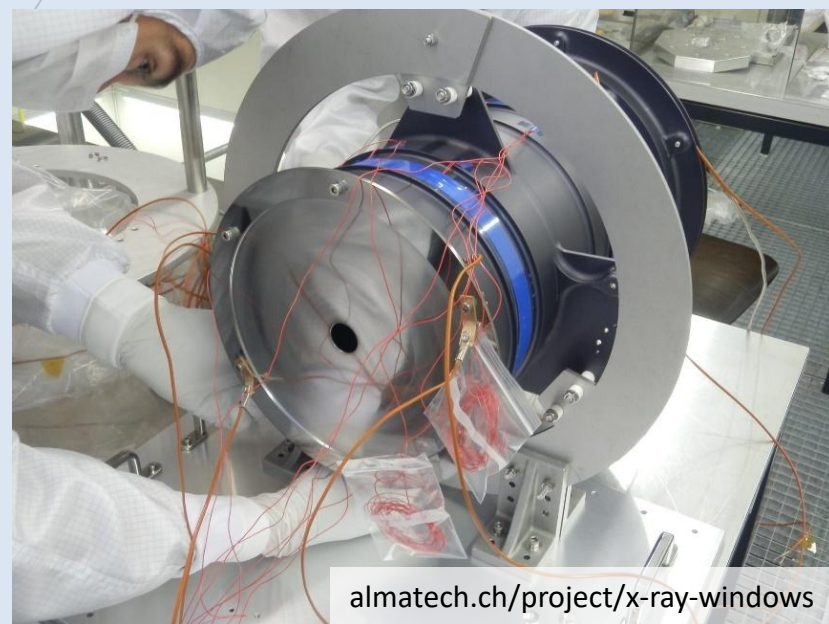
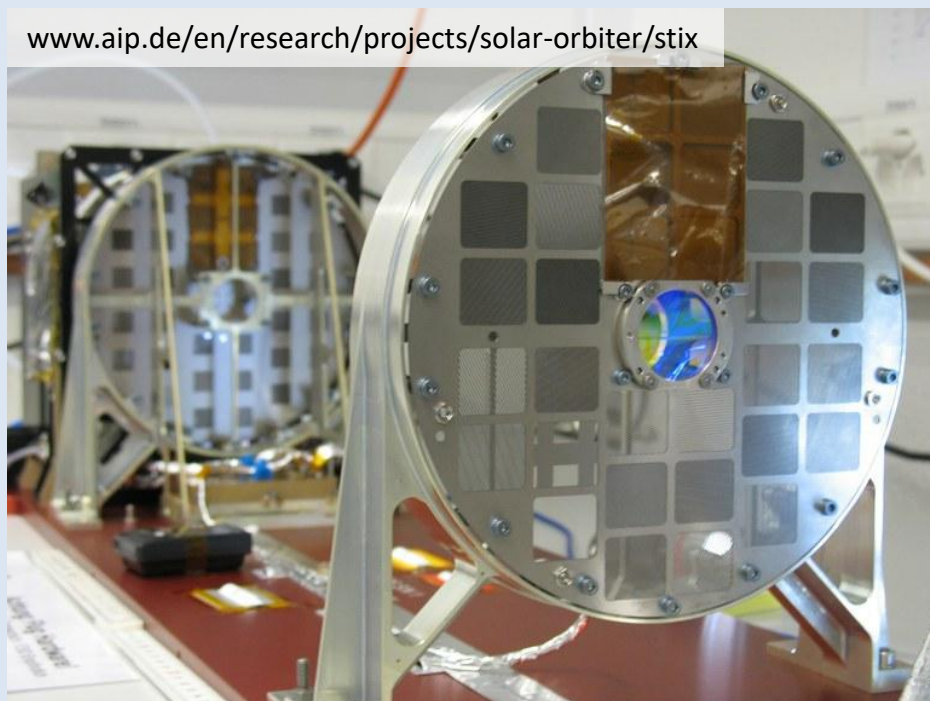
FoV: 2 x 2 stopnie

Czas: 2020 - ...

Cele: zrozumienie procesów przyspieszania cząstek i ich transportu oraz diagnostyka ich właściwości



www.aip.de/en/research/projects/solar-orbiter/stix



almatech.ch/project/x-ray-windows

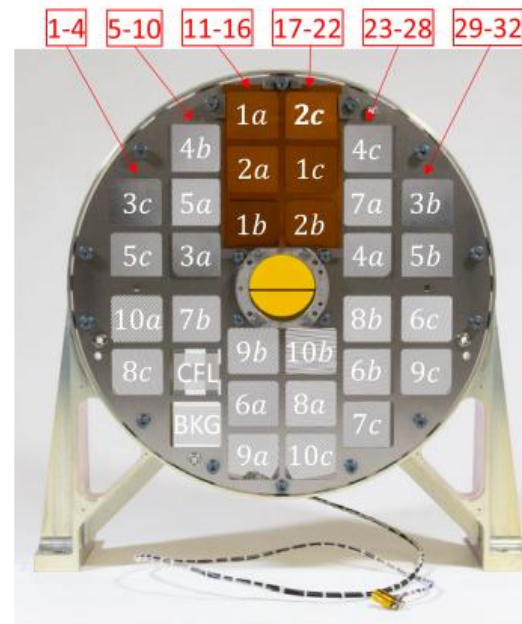
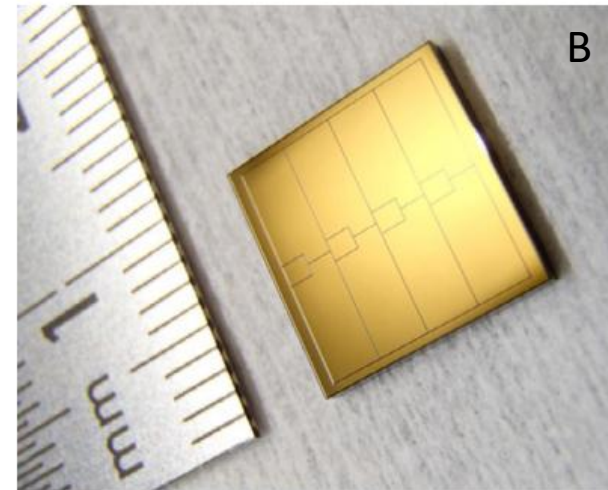
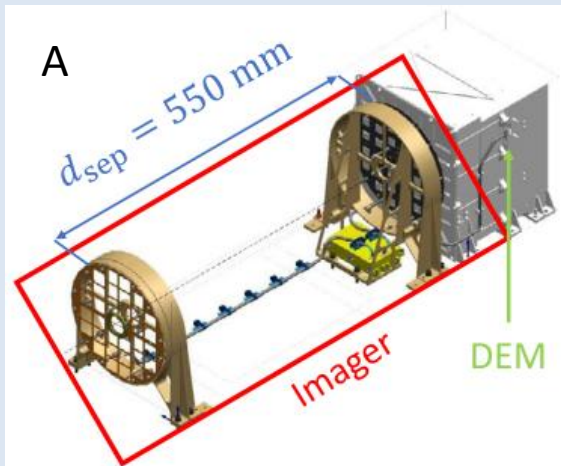
Budowa STIX. (po prawej) Na pierwszym planie moduł z przednimi siatkami, w tle moduł siatek tylnych. Za nim znajduje się moduł zawierający detektory i elektronikę. (po lewej) Okno X-ray znajdujące się z przodu teleskopu – blokuje niepożądane promieniowanie i nagrzewanie się instrumentu.

instrumenty

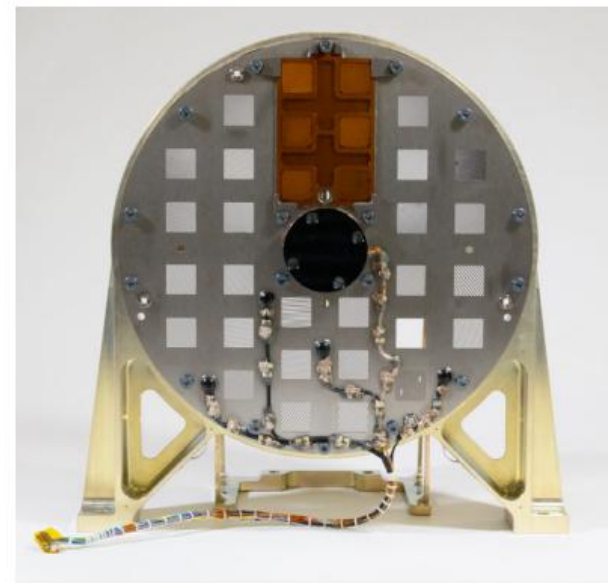
- Apertura kodowana (kolimatory modulujące), rozd. kątowa 7"
- Trzydzieści par siatek o różnych stałych i orientacjach, grubość 0.4 mm
- Para siatek tworzy wzór mory na przedniej części detektora
- Dodatkowo monitor tła BKG (różne apertury na poszczególnych pikselach detektora) oraz...
- ...monitor przybliżonego położenia rozbłysku CFL
- Detektory pikselizowane Caliste-SO (warstwa aktywna: 1 mm CdTe, 50% efektywność dla 100 keV)
- Rejestracja energii i czasu przybycia każdego fotonu
- Możliwość uzyskiwania: obrazów dla wybranych przedziałów energii, widm bez i z rozdzielczością przestrzenną (spektroskopia obrazowa)

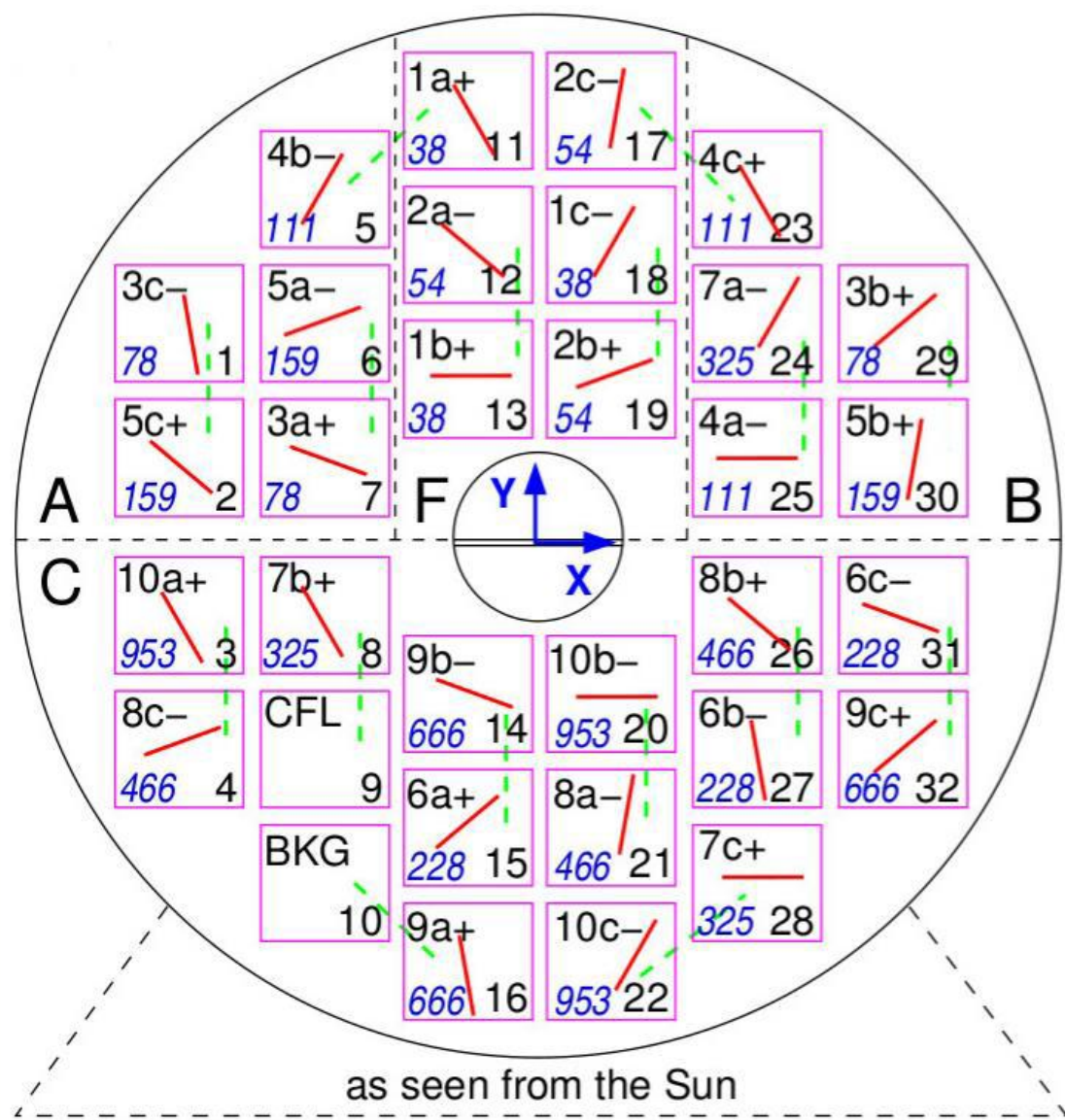
(A) Schematy budowy STIX: podstawowe elementy konstrukcji to kolimatory (imager) i detektory z elektroniką (DEM – Detector Electronic Module).

(B) detektor, widoczne piksele (8 dużych i 4 małe) ułożone w 4 paski. (C) przednie i tylne siatki (podana jest numeracja i oznaczenia siatek) [Massa et al. 2023]



C





Slit average orientation

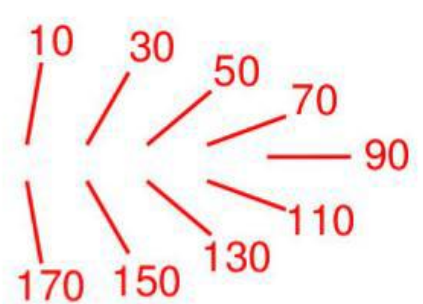
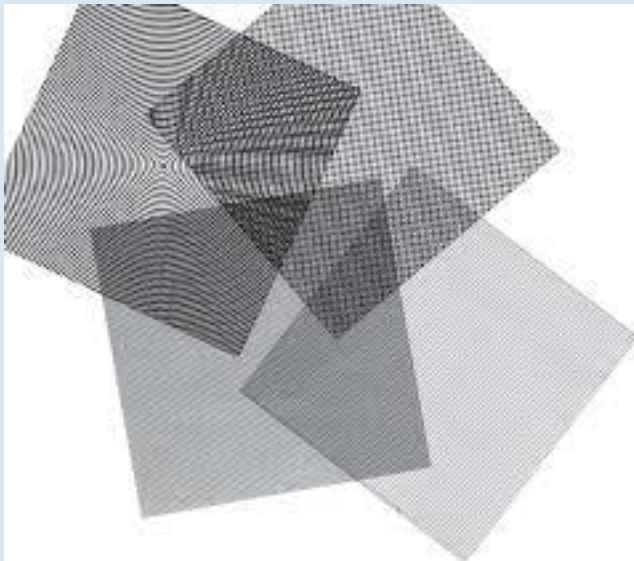
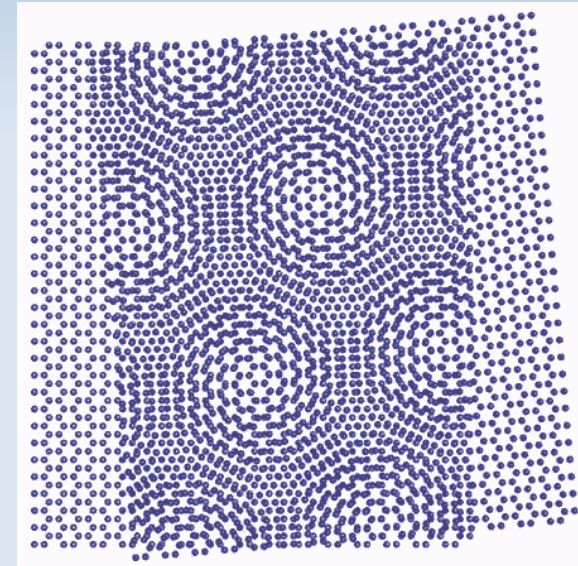
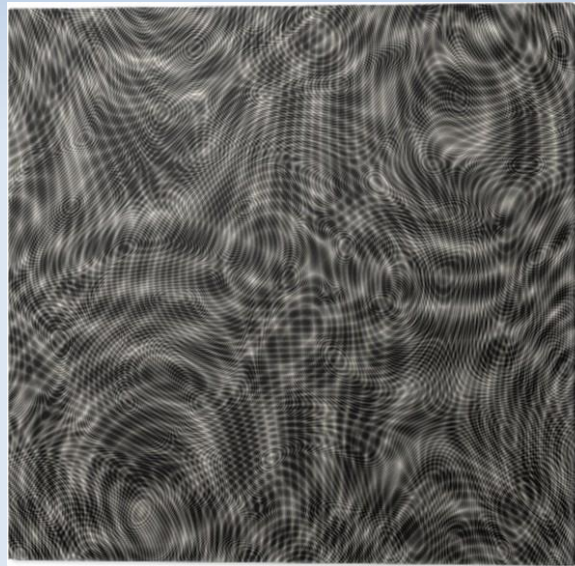
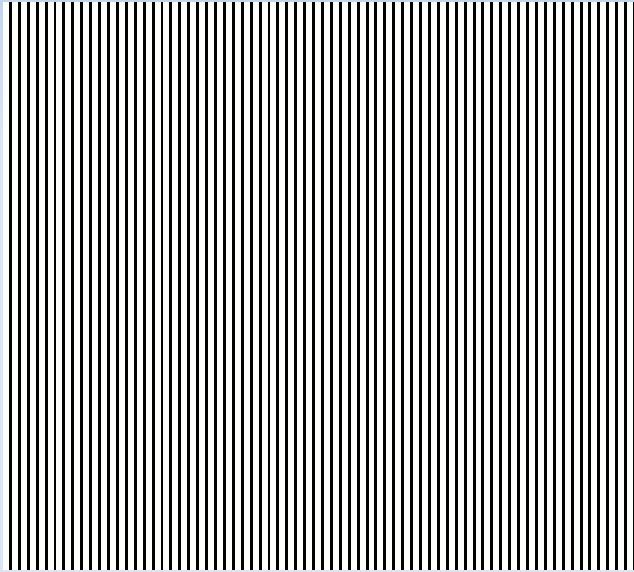


Table 2. Nominal grid parameters.

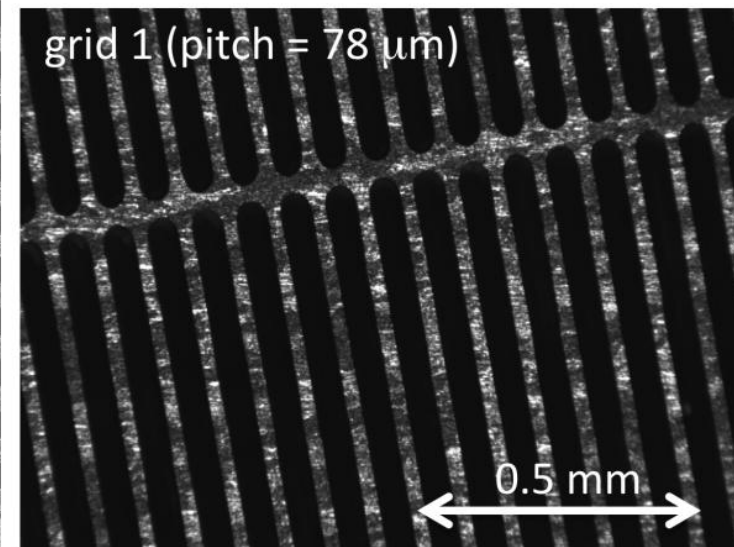
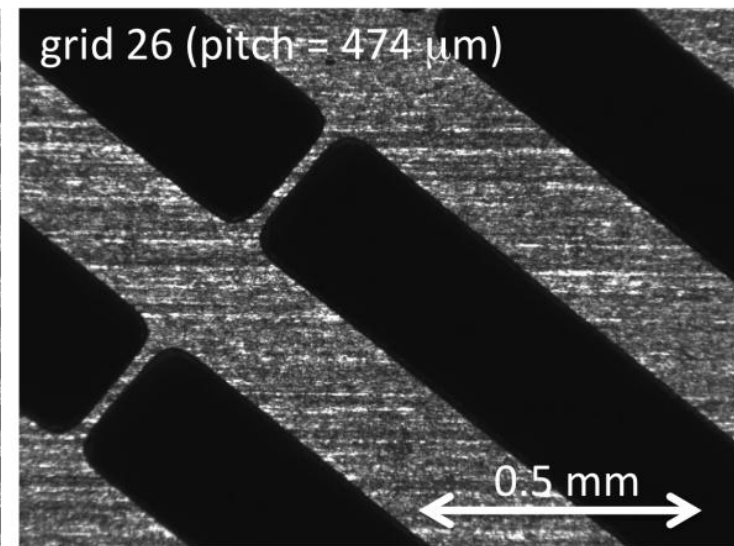
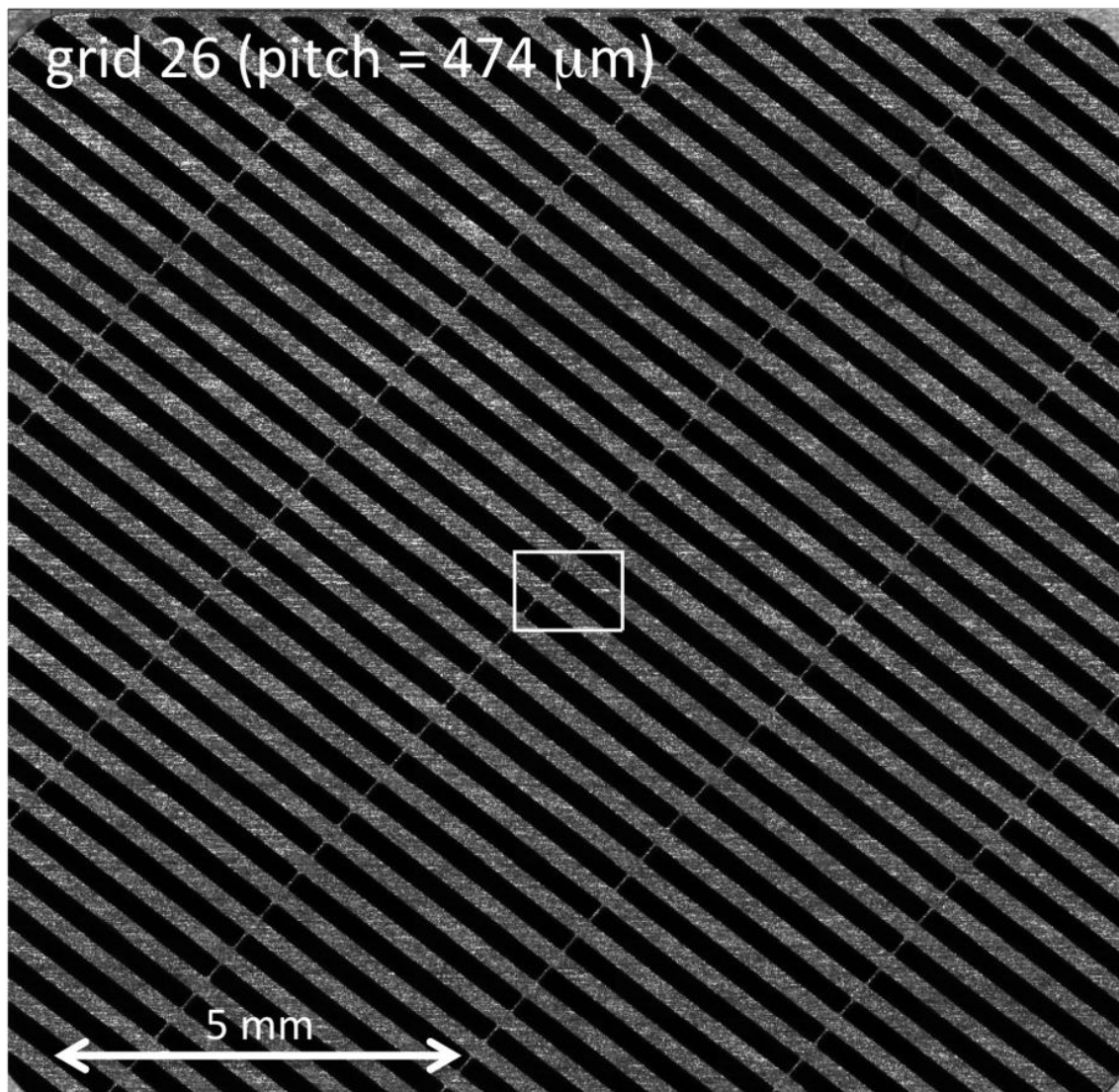
Grid label	Subcollimator number	Average pitch [mm]	Slit width [mm]	Average orientation [degrees]	Angular resolution [arcsec]
1 a,b,c	11,13,18	0.0380	0.0220	150,90,30	7.1
2 a,b,c	12,19,17	0.0543	0.0302	130,70,10	10.2
3 a,b,c	7,29,1	0.0777	0.0419	110,50,170	14.6
4 a,b,c	25,5,23	0.1112	0.0586	90,30,150	20.9
5 a,b,c	6,30,2	0.1590	0.0825	70,10,130	29.8
6 a,b,c	15,27,31	0.2275	0.1168	50,170,110	42.7
7 a,b,c	24,8,28	0.3254	0.1657	30,150,90	61.0
8 a,b,c	21,26,4	0.4655	0.2358	10,130,70	87.3
9 a,b,c	16,14,32	0.6659	0.3360	170,110,50	124.9
10 a,b,c	3,20,22	0.9526	0.4793	150,90,30	178.6
CFL	9				
BKG	10				

Kolimatory STIX z punktu widzenia Słońca. Podane są nr (1-32) i oznaczenia kolimatorów (1a, 1b, ...) Czerwone kreski podają orientację szczelin siatek. Tabela podaje nominalne parametry siatek. Dla każdej z 10 rozdzielczości są 3 kolimatory o różnych orientacjach siatek. [Krucker et al. 2020]

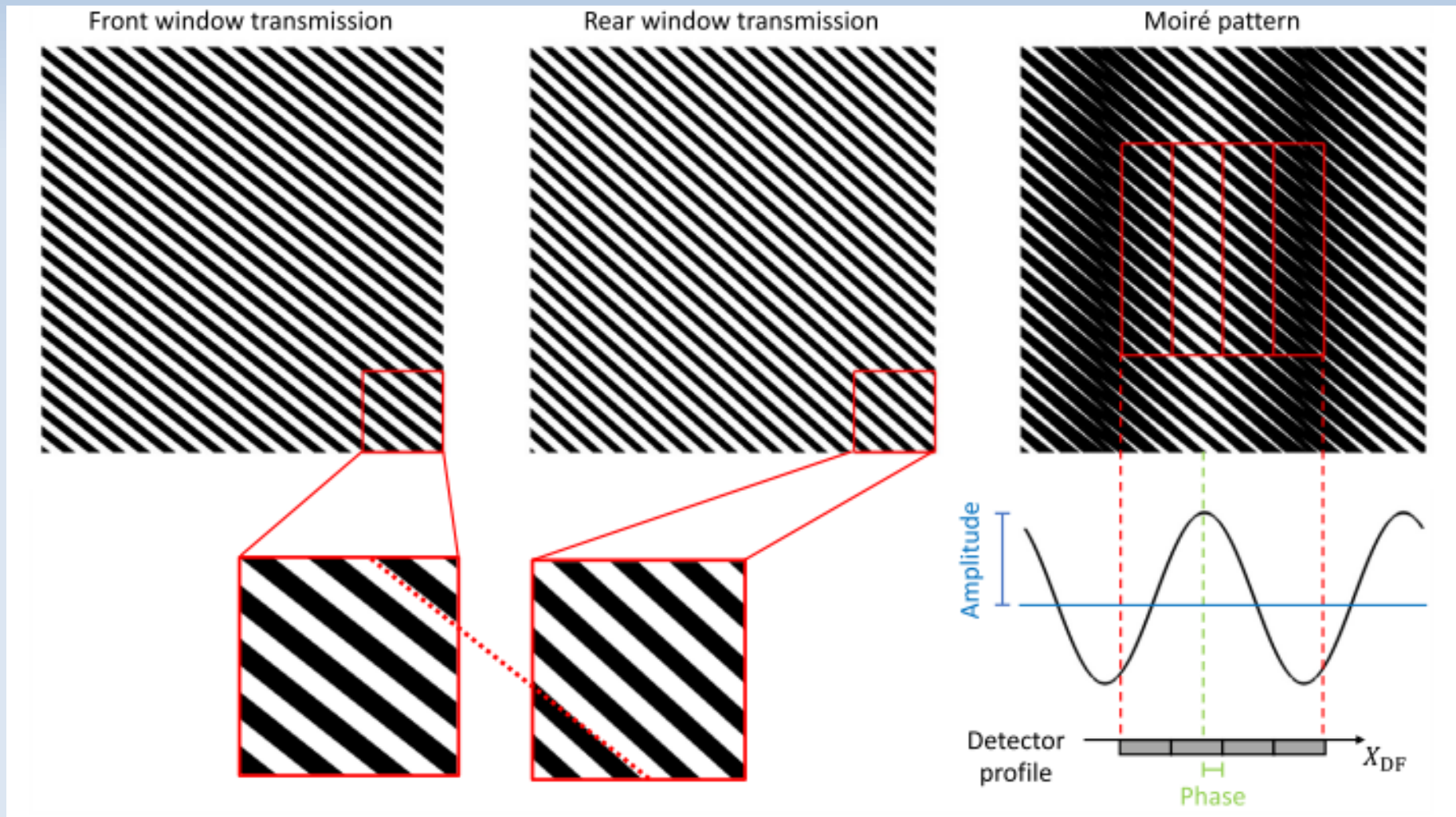


Prążki moiré (prążki mory, wzór mory) – pewien rodzaj układu prążków powstałego na skutek interferencji (nakładania się) dwóch siatek linii obróconych o pewien kąt lub poddanych deformacji (zniekształconych względem siebie) [wikipedia]

W STIX wzór mory tworzony jest na detektorze dzięki niewielkiemu skręceniu siatki przedniej i tylnej względem siebie (w każdym kolimatorze). Cechy mory rejestrowane na pikselizowanym detektorze są podstawą do późniejszej rekonstrukcji obrazów. Szczegóły na następnych slajdach.

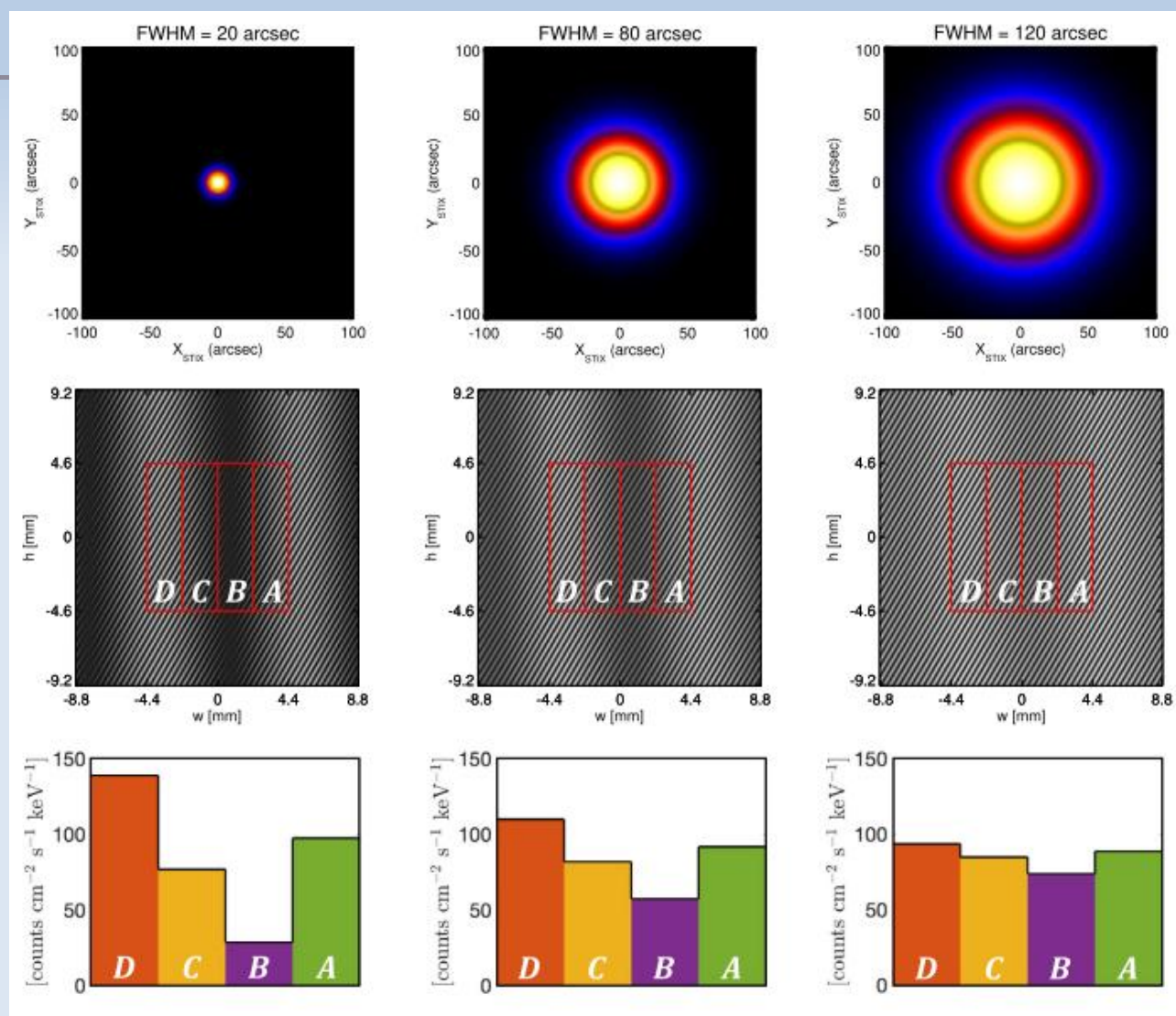


Zbliżenie jednej z tylnych siatek (nr 26). Szczelbelki biegną od prawego dolnego do lewego górnego rogu. Pięć słabo widocznych linii ortogonalnych biegnących od lewego dolnego do prawego górnego rogu to mostki, które zwiększają wytrzymałość konstrukcji, ale nie pogarszają jakości obrazowania. Obraz w prawym górnym rogu przedstawia zbliżenie tej samej siatki, odpowiadające białemu prostokątowi po lewej stronie. W prawym dolnym rogu znajduje się zbliżenie znacznie drobniejszej siatki (nr 1). [Krucker et al. 2020]



Góra lewy i środkowy: symulacja strumienia promieniowania przenikającego przez przednią i tylną siatkę subkolimatora 32 (9c). Symulowany strumień odpowiada punktowemu źródłu promieniowania rentgenowskiego znajdującemu się we współrzędnych heliocentrycznych $(x, y) = (0, 0)$. Góra prawy: wzór mory utworzony przez nałożenie się strumienia przenikającego przez obie siatki. Krawędzie pionowych pasków detektora zaznaczone są na czerwono. Wzór jest przedstawiony tak, jakby patrzeć w stronę Słońca zza detektora. Wzór mory ma charakter okresowy. Dół lewy i środkowy: zbliżenie strumienia przenikającego przez przednią i tylną siatkę. Czerwona przerywana linia pokazuje jako punkt odniesienia, że orientacje szczelin w przedniej i tylnej siatce są nieco różne. Dół prawy: profil wzoru mory (przybliżony jako fala sinusoidalna) oraz profilu detektora wzdłuż osi X_{DF} . Faza i amplituda wzoru są zaznaczone odpowiednio na zielono i niebiesko. Każdy z 4 pasków detektora rejestruje inny poziom sygnału, zależny od cech źródła. [Massa et al. 2023]

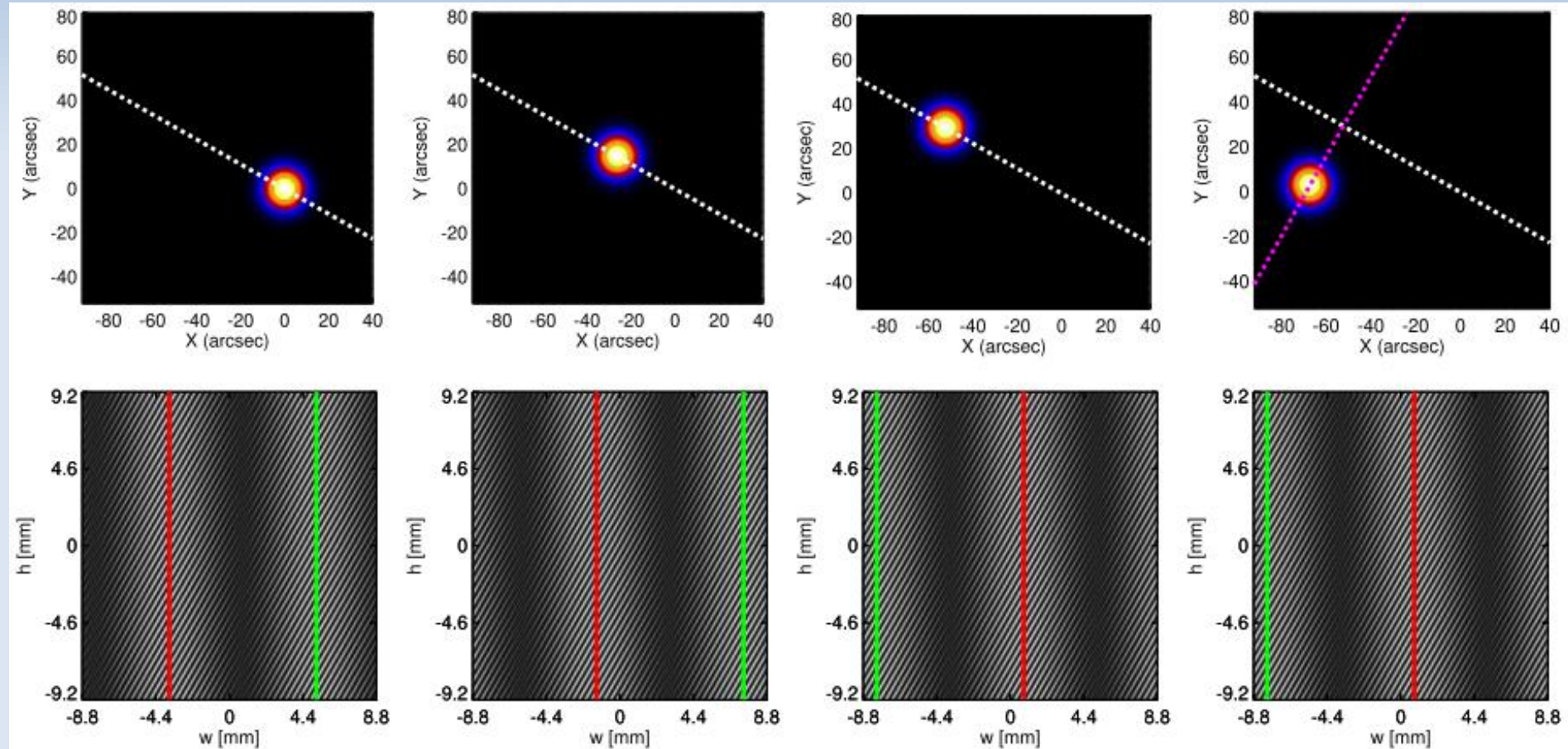
Okres i orientacja mory (zależne do cech pary siatek) zostały dobrane tak, że na detektorze mieści się 1 okres mory, a orientacja prążków jest równoległa do dłuższej osi Y detektora. Możliwe odstępstwa od tego, wynikające z niedokładności wykonania rzeczywistej geometrii instrumentu, można wykryć - kalibracja.



Górny rząd: symulowane kołowe źródła o profilu Gaussa, umieszczone we współrzędnych heliocentrycznych $(x, y) = (0, 0)$. FWHM źródeł wynosi odpowiednio 20, 80 i 120 sekund łuku.

Środkowy rząd: symulowane wzory mory utworzone przez kolimator nr 8 (7b, rozdzielczość 61") odpowiadające każdemu ze źródeł. Krawędzie pionowych pasków detektora są zaznaczone na czerwono, a wzory przedstawiono tak, jakby patrzeć od strony detektora w kierunku Słońca. Na szerokości detektora mieści się jeden pełny okres wzoru mory.

Dolny rząd: histogramy zliczeń rejestrowanych przez piksele detektora dla każdego z symulowanych źródeł Gaussa. A-D oznaczenia pasków detektora i poziomów zliczeń w danym pasku. [Massa et al. 2023]



Górny rzęd: symulowane kołowe źródło o profilu Gaussa i $FWHM = 20''$. Od lewej do prawej pozycja źródła jest przesuwana względem punktu $(x, y) = (0,0)$ o 30 i 60 sekund łuku wzdłuż kierunku określonego przez częstotliwość kątową (u,v) próbkowaną przez kolimator 8 (7b). Kierunek ten zaznaczono białą przerywaną linią. Na prawym górnym panelu źródło jest dodatkowo przesunięte o 30 sekund łuku w kierunku ortogonalnym do (u,v) , różowa przerywana linia.

Dolny rzęd: wzory mory utworzone przez kolimator 8 (7b), odpowiadające każdemu ze źródeł. Czerwona i zielona pionowa linia oznaczają dwa kolejne maksima wzoru mory. Należy zwrócić uwagę, jak zmiana położenia źródła zmienia fazę wzoru mory. [Massa et al. 2023]

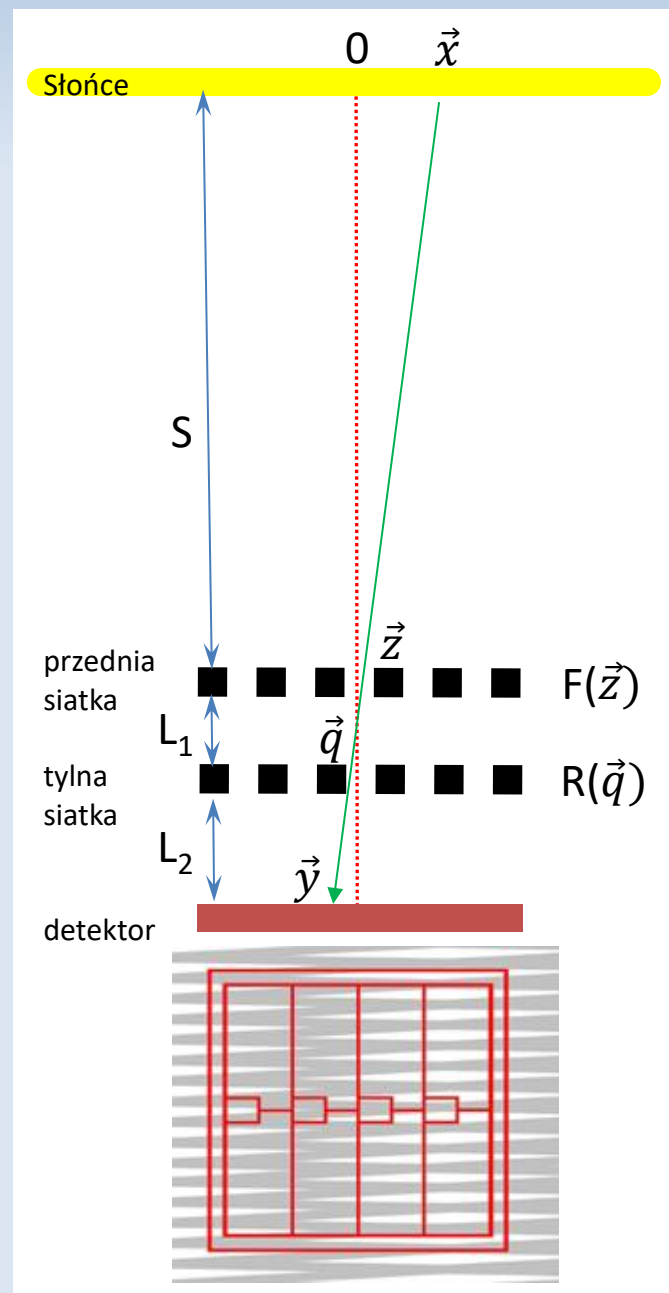
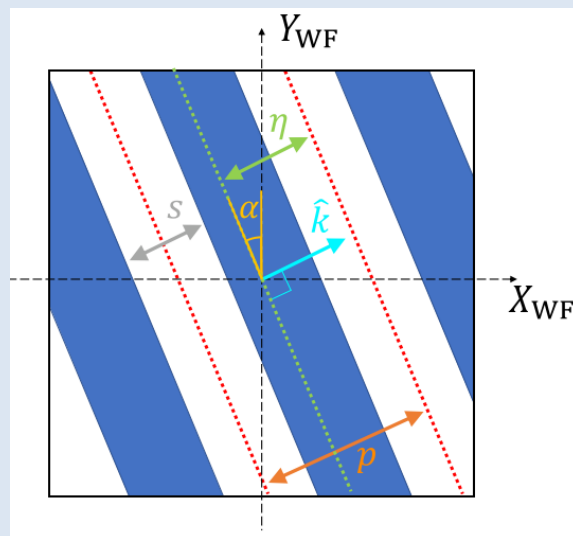
Transformata Fouriera rzeczywistego rozkładu emisji $I(x,y)$ daje funkcję widzialności $V(u,v)$

$$V(u, v) = \iint I(x, y) e^{-i2\pi(ux+vy)} dx dy$$

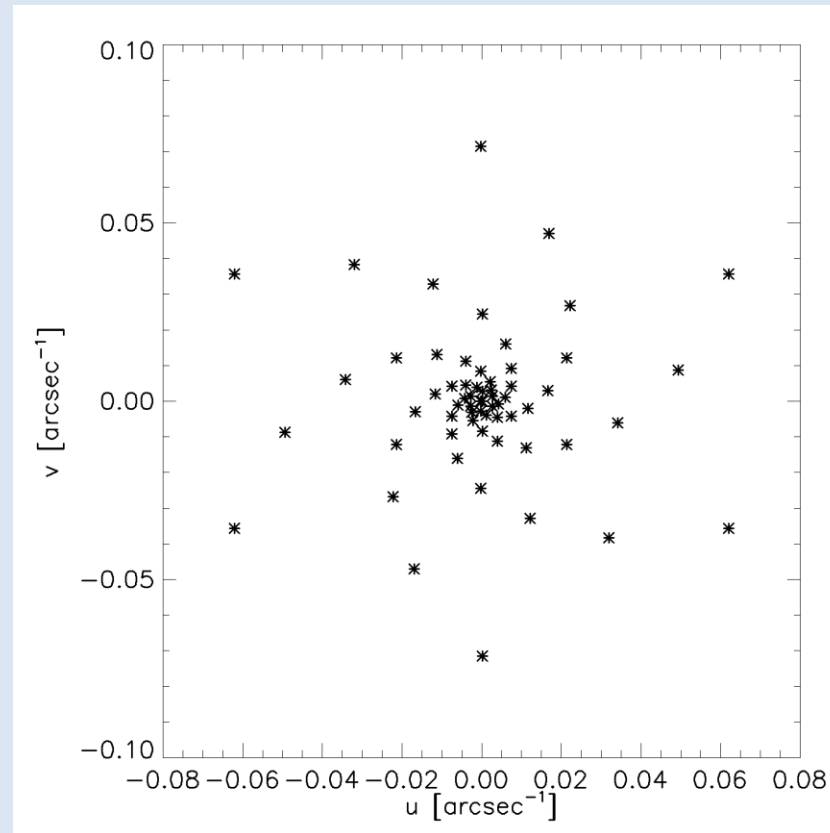
u, v – częstości kątowe w kierunkach x, y zależne od geometrii i ustawienia siatek

$$(u, v) = \vec{k}^f \frac{L_1 + L_2}{S} - \vec{k}^r \frac{L_2}{S}$$

gdzie $\vec{k} = (k_1, k_2) = \left(\frac{\cos \alpha}{p}, \frac{-\sin \alpha}{p} \right)$ to wektor falowy siatki (przedniej „f” lub tylnej „r”), p to stała siatki (pitch), α – orientacja siatki.



30 kolimatorów o różnych orientacjach siatek i 10 różnych rozdzielczościach (od 7.1 do 179 arcsec) daje następujące pokrycie przestrzeni częstotliwości kątowych (u , v) (próbki widzialności)



Możliwe jest obrazowanie źródeł o rozmiarze do ok. 180".
Zakres dynamiczny wynosi do ok. 20:1.

instrumenty

Amplituda i faza mory z każdego kolimatora dostarcza pomiaru składowej fourierowskiej rzeczywistego rozkładu kątownego emisji $I(x,y)$.

Mając pomiary widzialności $V(u,v)$ można odtworzyć rzeczywisty rozkład emisji $I(x,y)$ (rekonstrukcja obrazu)

$$I(x,y) = \int \int V(u,v) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv$$

Giordano et al. (2015) pokazali, że:

$$V(u,v) \simeq \frac{1}{4M_1} [(C - A) + i(D - B)] e^{-i\frac{\pi}{4}}$$

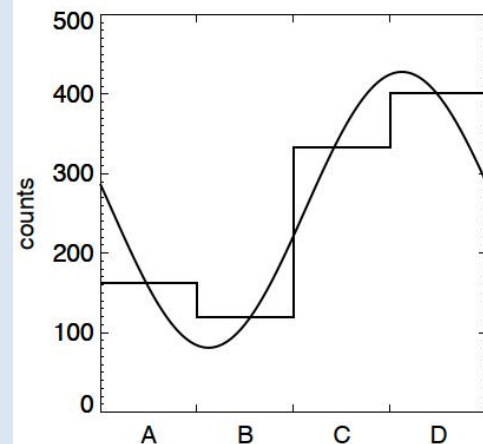
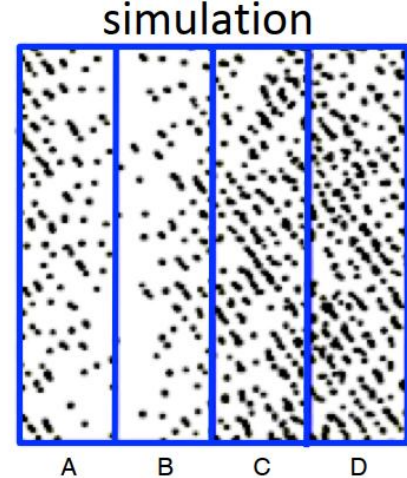
gdzie:

$$M_1 = \frac{4}{\pi^3} lh \sin\left(\frac{\pi}{4}\right), \quad A, B, C, D \text{ zliczenia na czterech paskach}$$

detektora, l i h to szerokość i wysokość detektora.

Do rekonstrukcji potrzebna jest dokładna znajomość położenia punktów próbkujących widzialność na płaszczyźnie (u, v) . A to zależy od rzeczywistej geometrii kolimatorów.

Pomiar widzialności. Góra: symulacja fotonów docierających do detektora z pewnego źródła. Dół: liczba zliczeń na paskach detektora wraz z przybliżeniem sin wzoru mory. Różnice zliczeń A, B, C, D pozwalają wyznaczyć składową rzeczywistą i urojoną widzialności. [Krucker et al. 2020]



Independent
of background:

$$\text{Real}(V) = C - A$$

$$\text{Imag}(V) = D - B$$

Independent
of source morphology:

$$\text{Flux} = A + B + C + D$$

$$\text{Check} \quad A + C = B + D$$

Dostępnych jest kilka metod rekonstrukcji obrazów STIX (lub RHESSI) bazujących na wizualnościach.

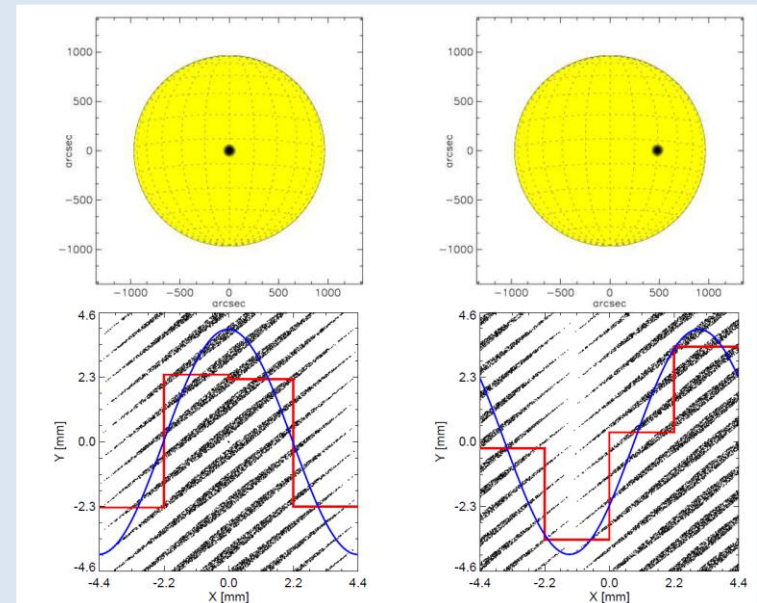
Innym podejściem jest np. algorytm MARLIN bazujący na zliczeniach na detektorach w paskach A,B,C,D (najbardziej podstawowa informacja).

Metoda opiera się na algorytmie Richardson-Lucy (Richardson, 1972; Lucy, 1974):

jaki jest najbardziej prawdopodobny rozkład emisji („obraz”) $\mathbf{im}(\mathbf{i},\mathbf{j})$ dający obserwowane zliczenia $\mathbf{F}_{\text{obs}}(\mathbf{m})$ przy znanych wzorcach transmisji $\mathbf{tr1}(\mathbf{m},\mathbf{i},\mathbf{j})$? [podejście bayesowskie]

krok 1: wyznaczenie wzorców transmisji $\mathbf{tr1}$, czyli zliczeń A,B,C,D na 30 detektorach (120 wartości) dla źródła o rozmiarze 1 piksela (np. $1'' \times 1''$) z mapy o rozmiarze (N_x, N_y) pixeli. Mapa wzorców transmisji ma rozmiar (120, N_x, N_y).

Przykład wzorców modulacji dla jednego z kolimatorów dla źródła położonego w dwóch różnych położeniach na Słońcu. Dolne wykresy pokazują jak rozkładają się zliczenia na powierzchni detektora. Czerwona linia pokazuje liczbę zliczeń A, B, C, D na 4 paskach detektora.



krok 2: iteracyjny proces wyliczenia obrazu $im(i,j)$, obrazem zerowym jest obraz płaski $im(i,j)=const$.

$$im^{k+1}(i,j) = im^k(i,j) \cdot \left(\sum_m \frac{F_{obs}(m)}{F_{cal}(m)} w1(m,i,j) \right) / \sum_m w1(m,i,j)$$

gdzie F_{cal} i F_{obs} to strumienie obliczone i obserwowane w 120 paskach A,B,C,D (4 paski x 30 detektorów).

$$F_{obs}(m) = \sum_{i,j} tr1(m,i,j) \cdot im(i,j) \quad , \quad F_{cal}(m) = \sum_{i,j} tr(m,i,j) \cdot im(i,j)$$

a w i $w1$ to normalizacja

$$w(m) = \frac{\sum_{i,j} tr1(m,i,j)}{(dim(im))^2} \quad w1(m,i,j) = \frac{tr1(m,i,j)}{w(m)}$$

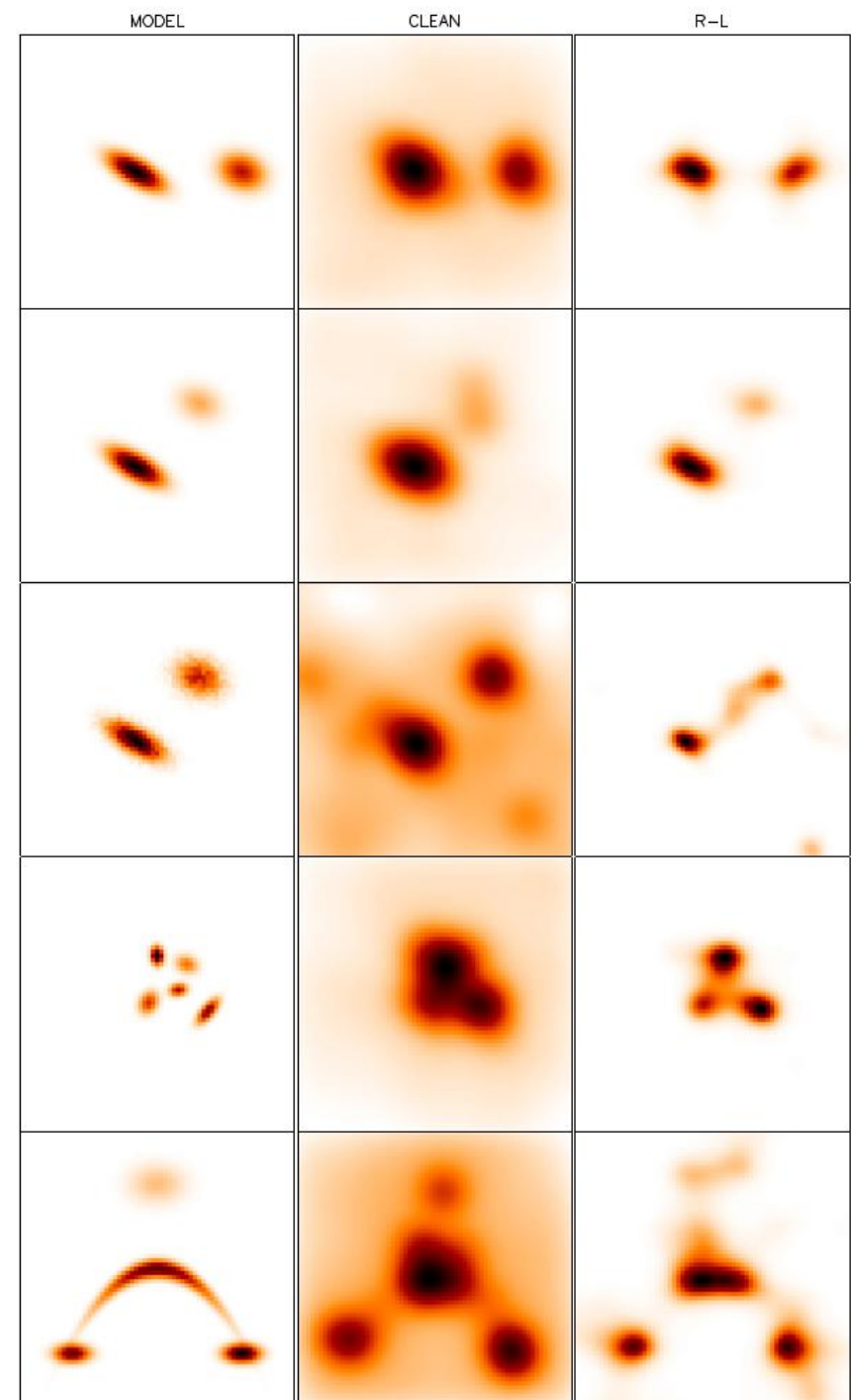
Wartości w kroku $k+1$ liczone są z wartości k przez pomnożenie ich przez ważony iloraz sum zliczeń obserwowanych do obliczonych.

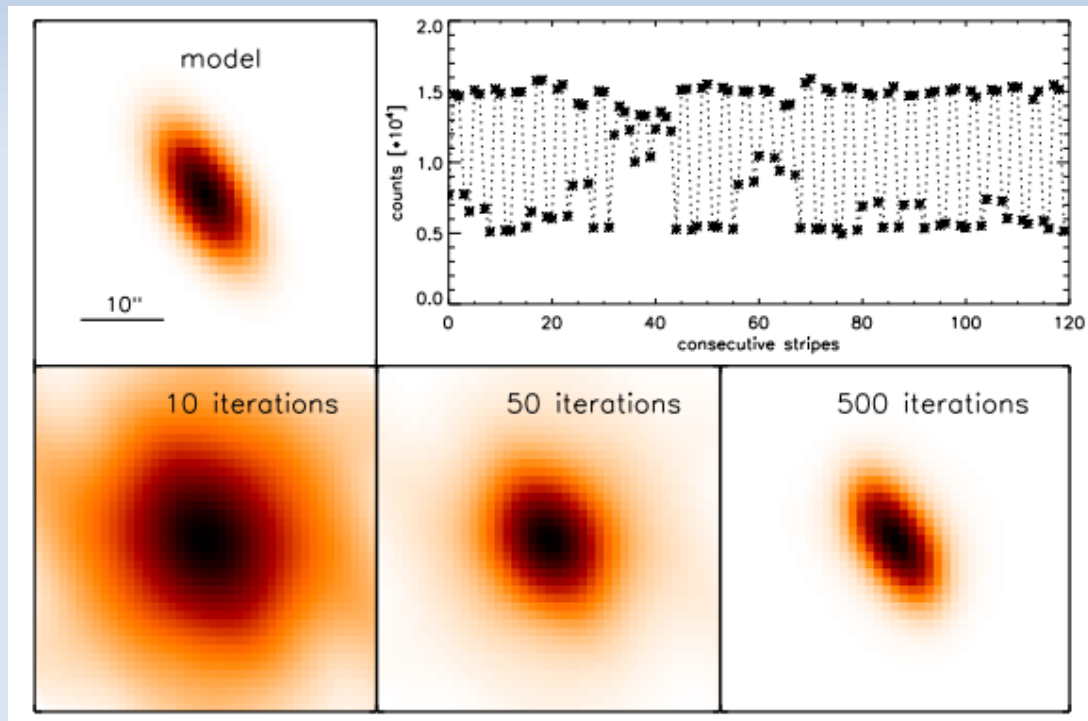
Zalety:

- wzorce transmisji uwzględniają obecność mostków
- pozwala uwzględnić rzeczywistą geometrię instrumentu (bez uproszczeń i ograniczeń analitycznych)
- dość szybki (*)
- położenia, rozmiary i jasności źródeł są dobrze rekonstruowane

wady: (*) wyliczenie wzorców transmisji jest bardzo zasobo- i czasochłonne

Symulowane konfiguracje źródeł emisji (lewa kolumna) oraz obrazy zrekonstruowane za pomocą algorytmów CLEAN-Vis (środkowa kolumna) i MARLIN (prawa kolumna). [Siarkowski et al. 2020]



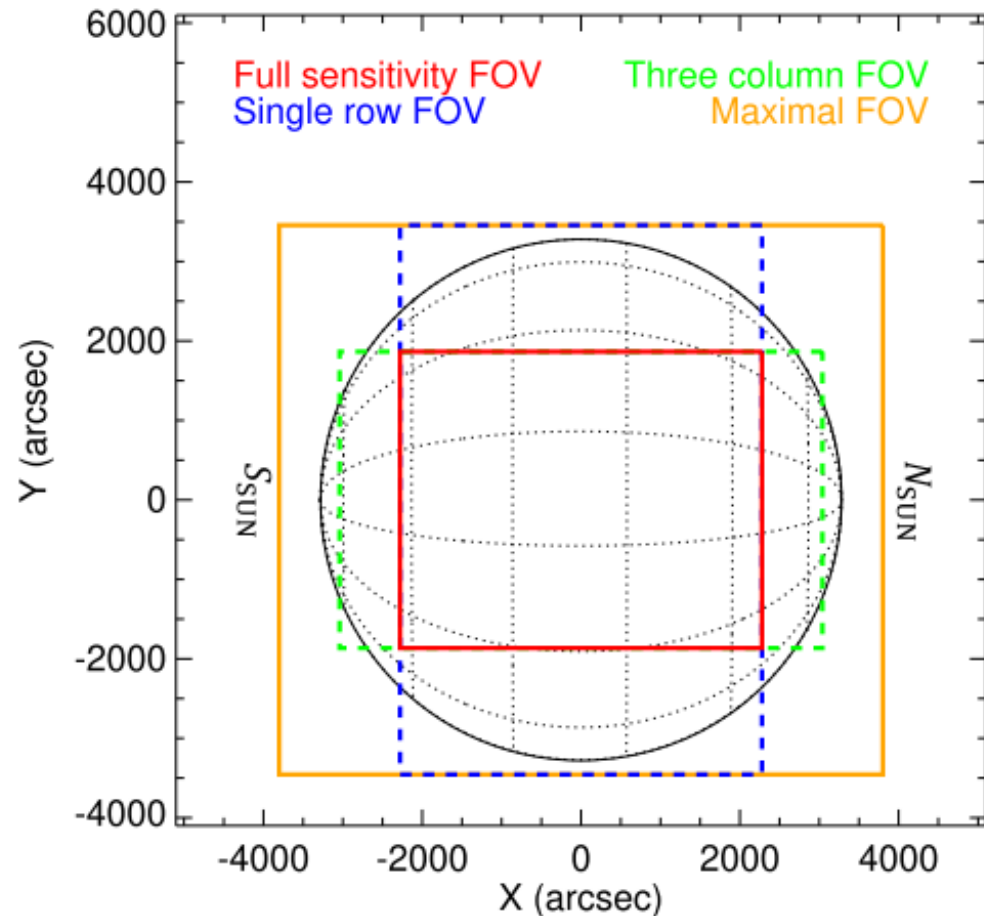
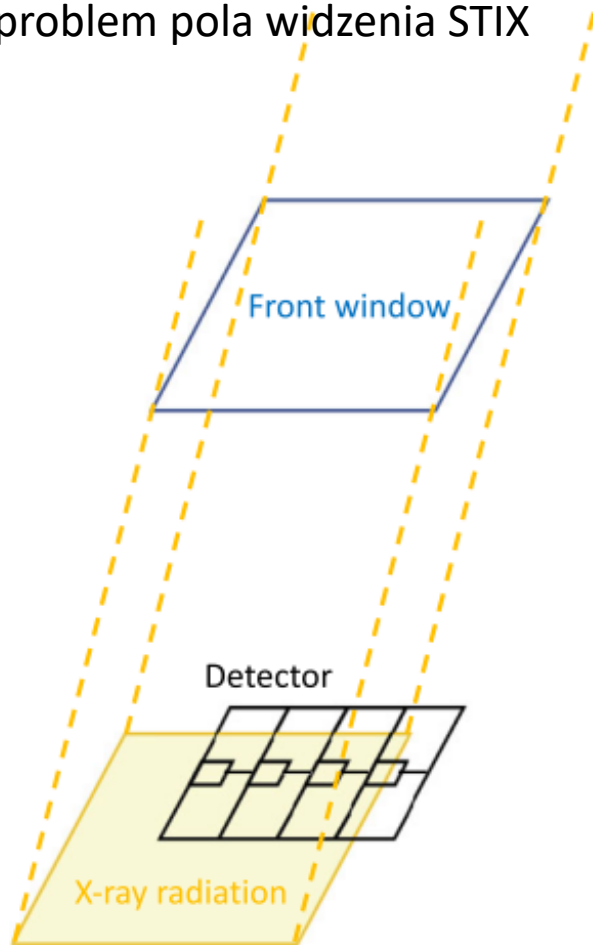


Przykład symulowanego źródła (górny lewy panel) oraz odpowiadających mu zliczeń zmierzonych w paskach A,B,C,D (panel po prawej). Dolny rząd przedstawia rekonstrukcję za pomocą algorytmu MARLIN po 10, 50 i 500 krokach iteracji [Siarkowski et al. 2020]

There is no one, universal algorithm that is robust for all source configurations, count statistics etc.

[Siarkowski et al. 2020]

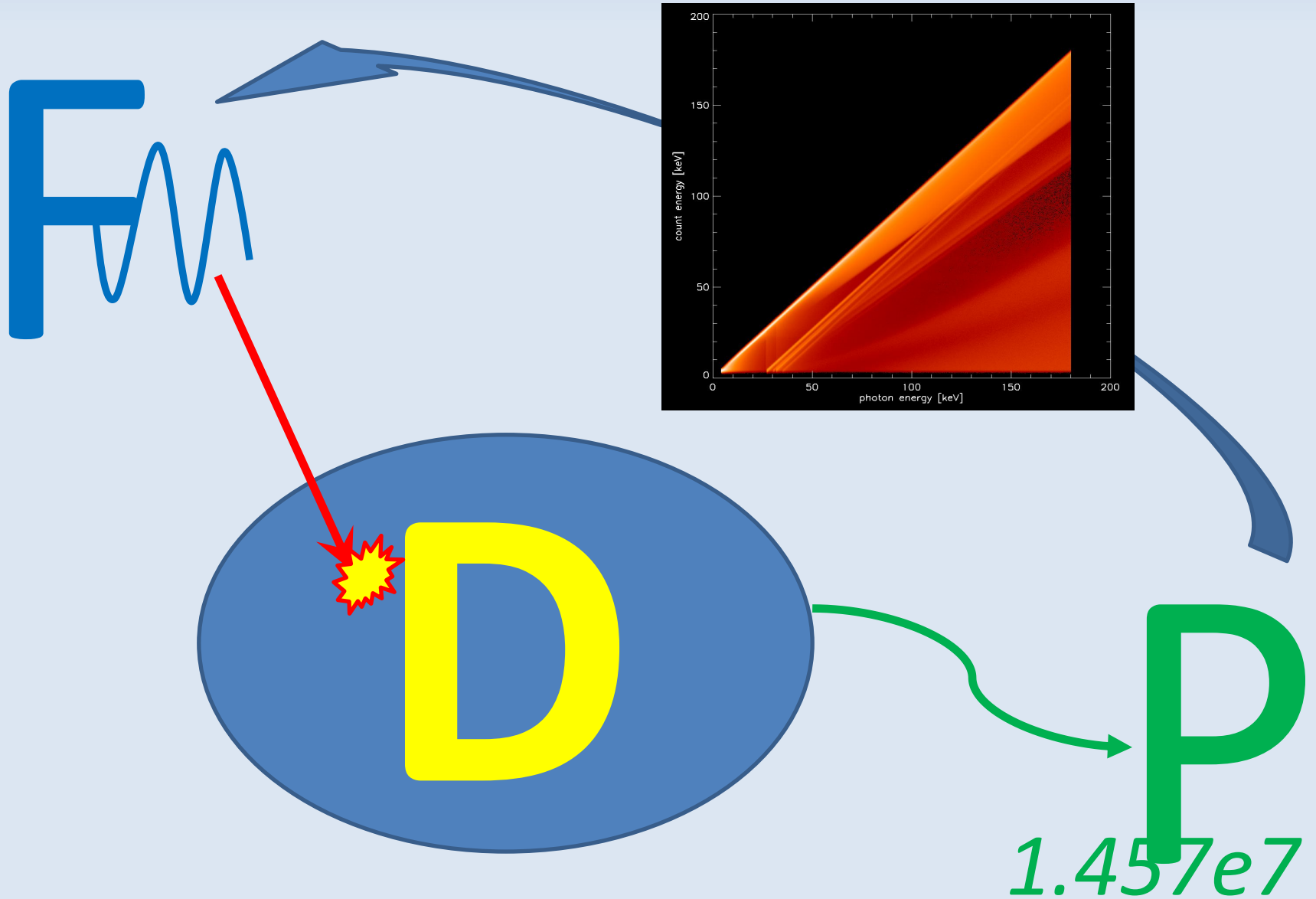
problem pola widzenia STIX



Lewa: schematyczne przedstawienie prostokątnego obszaru przedniego okna, który jest rzutowany przez rozbłyiskowe promieniowanie rentgenowskie na płaszczyznę detektora w przypadku źródła sporo poza oś optyczną. Należy zauważyć, że detektor nie jest w pełni oświetlony przez promieniowanie (detektor nie dostarcza pełnego wzorca modulacji).

Prawa: różne pola widzenia instrumentu STIX nałożone na tarczę Słońca o promieniu kątowym 3280'' (perihelium sondy Solar Orbiter 12.10.2022). Prostokąty pokazują obszary, w których źródła zlokalizowane tam dają: pełne oświetlenie detektora (czerwony), w pełni oświetlane tylko piksele górne lub dolne pasków A,B,C,D (niebieski), oświetlane są tylko 3 z 4 pasków A,B,C,D (zielony), maksymalne pole widzenia (żółty). Massa et al. [2023]

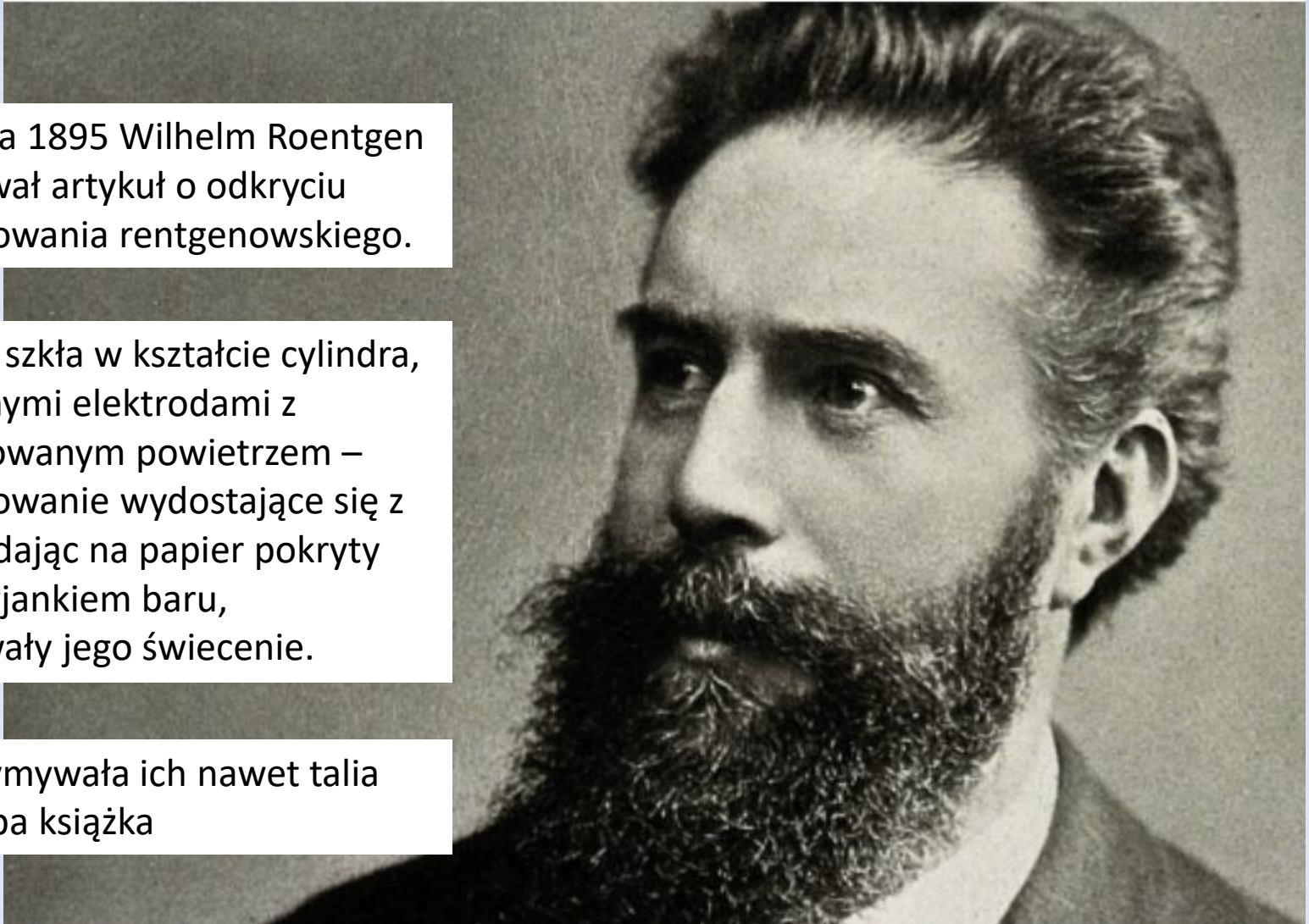
Detektory



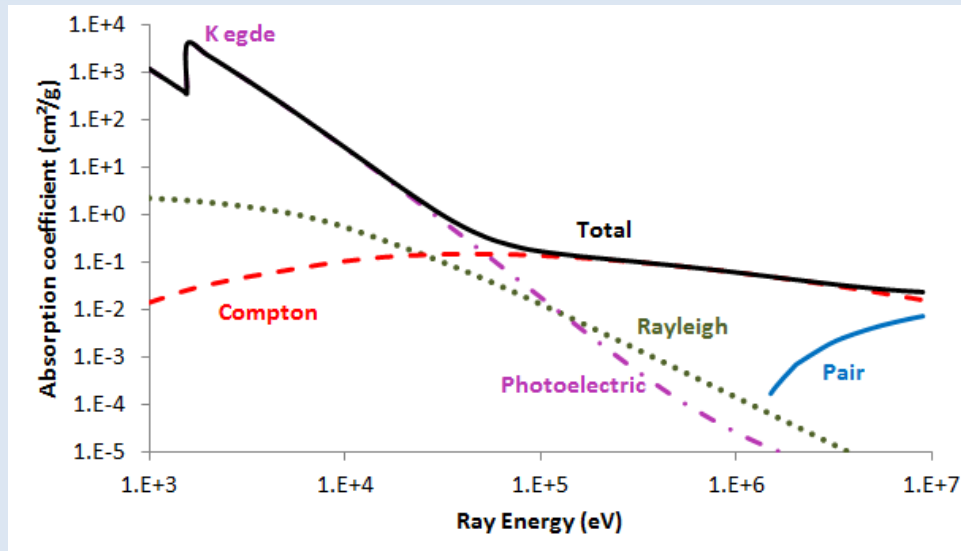
28 grudnia 1895 Wilhelm Roentgen opublikował artykuł o odkryciu promieniowania rentgenowskiego.

Lampa ze szkła w kształcie cylindra, z wtopionymi elektrodami z wypompowanym powietrzem – promieniowanie wydostające się z lampy padając na papier pokryty platynocyjankiem baru, powodowały jego świecenie.

Nie zatrzymywała ich nawet talia kart i gruba książka

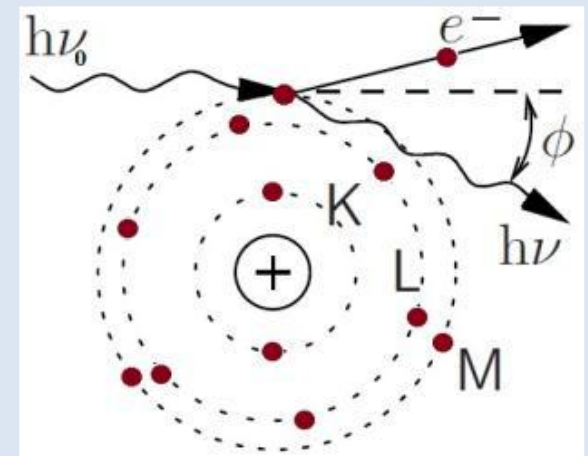
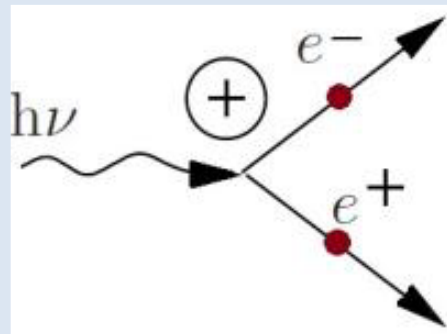
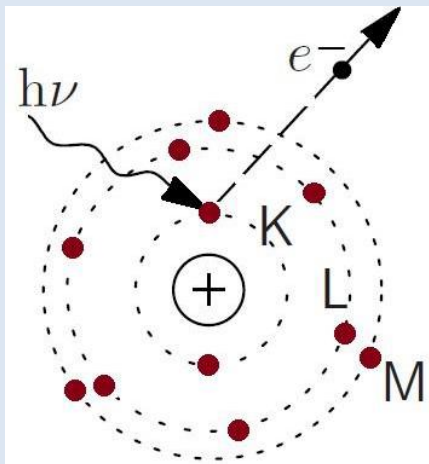


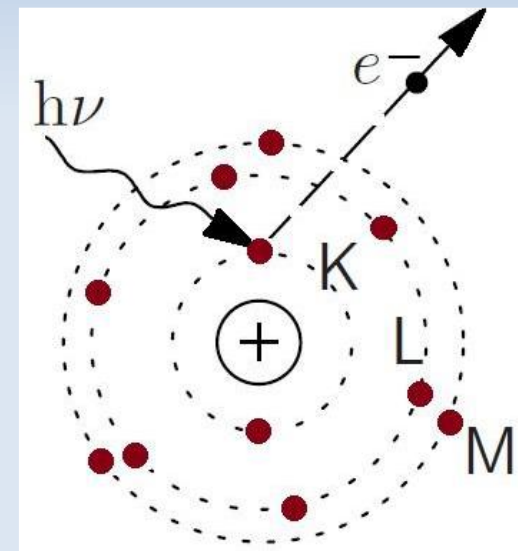
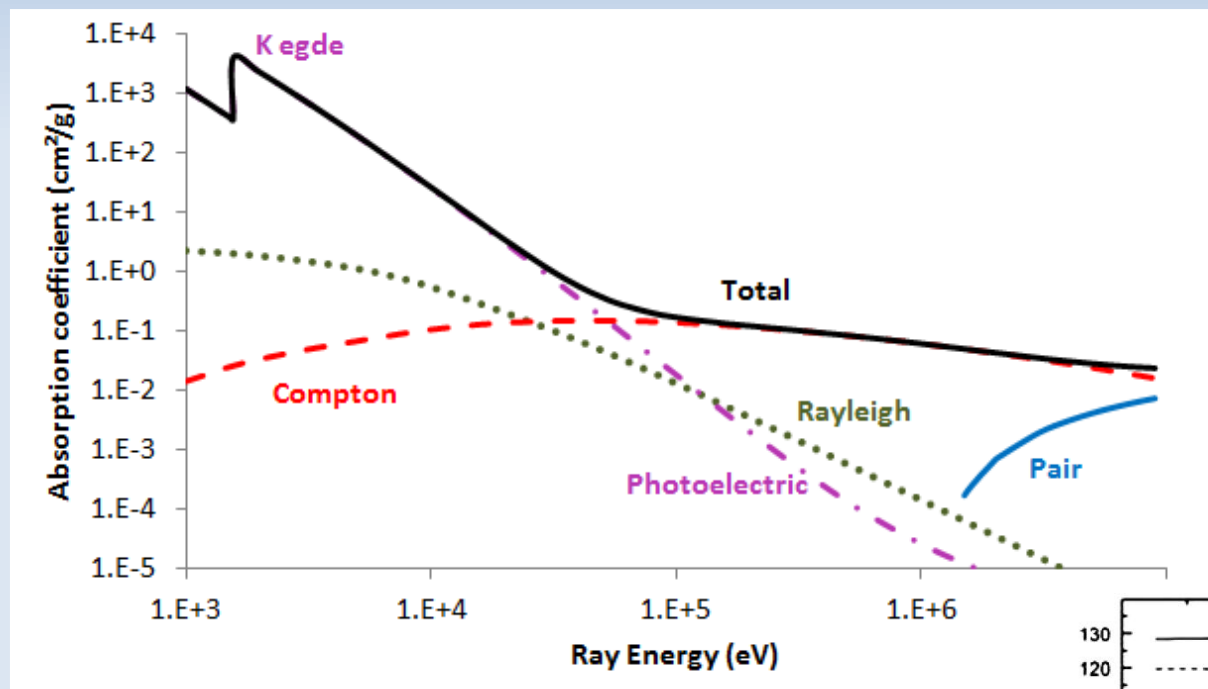
Oddziaływanie promieniowania z materią



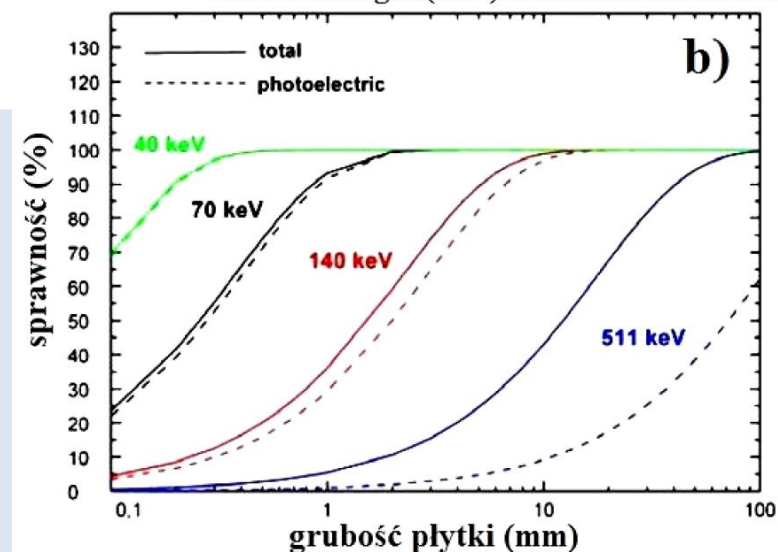
Z każdym procesem związane jest prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia określone przez przekrój czynny na dane zjawisko zależny od materiału i energii fotonu.

- absorpcja fotoelektryczna
- kreacja par
- rozpraszanie Comptona





absorpcja fotoelektryczna – cała energia fotonu zostaje przekazana elektronowi (jonizacja, duża prędkość elektronu). Przekrój czynny proporcjonalny do $Z^{4.5}/E^3$. Rekombinacja produkuje fotony rentgenowskie (pr. charakterystyczne) lub elektron Augera.



sprawność detektora CdTe w funkcji grubości płytki detekcyjnej i energii fotonu

rozpraszanie Comptona – nieelastyczne rozpraszanie fotonu rentgenowskiego przez elektron z powłoki zewnętrznej o charakterystyczny kąt. Proporcjonalne do Z/E .

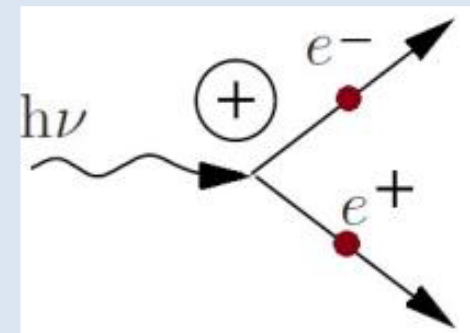
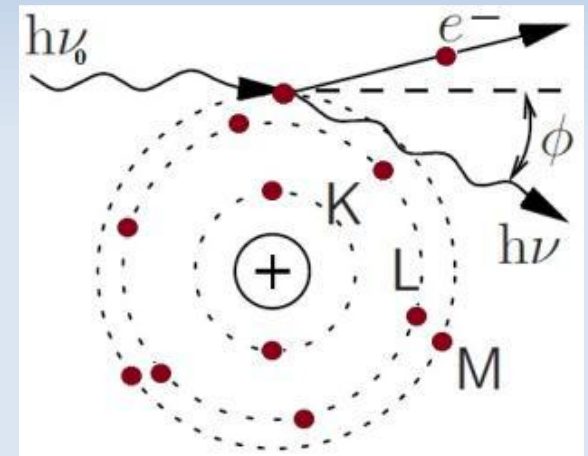
Zmiana długości fali fotonu:

$$\Delta\lambda = \left(\frac{h}{m_e c} \right) (1 - \cos \phi)$$

[**rozpraszanie Rayleigha** – elastyczne rozpraszanie przez elektron z powłoki wewnętrznej]

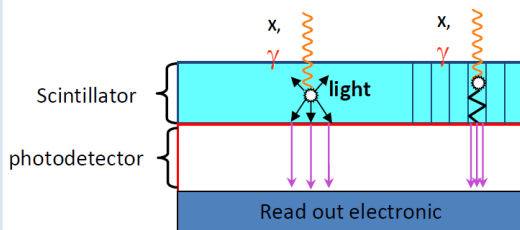
kreacja par – powstanie pary elektron-pozyton. Pozyton anihiluje i produkuje dwa fotony gamma 511 keV. Proporcjonalne do Z^2 .

Zasada detekcji: fotony oddziałują z materią i produkują fotoelektrony, które tracą swą energię w wyniku jonizacji atomów (uwalnianie elektronów) na krótkiej odległości (powstaje chmura elektronów i dziur). **Pomiar polega na rejestracji tej chmury.** W dziedzinie pr. rentgenowskiego dominuje zjawisko fotoelektryczne więc uprzywilejowane są półprzewodniki o wysokiej liczbie atomowej.

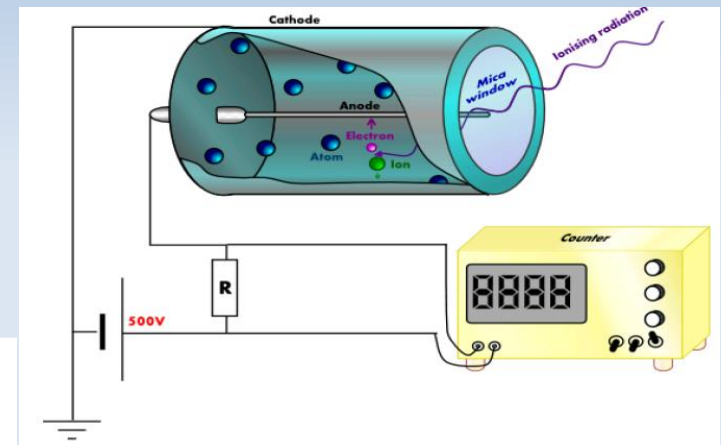
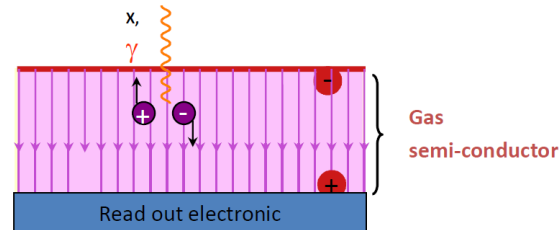


Podstawową zasadą pomiaru w astronomii rentgenowskiej jest określenie dla każdego zarejestrowanego fotonu: **kierunku, energii, czasu przybycia, kąta polaryzacji (nie dla pojedynczego fotonu).**

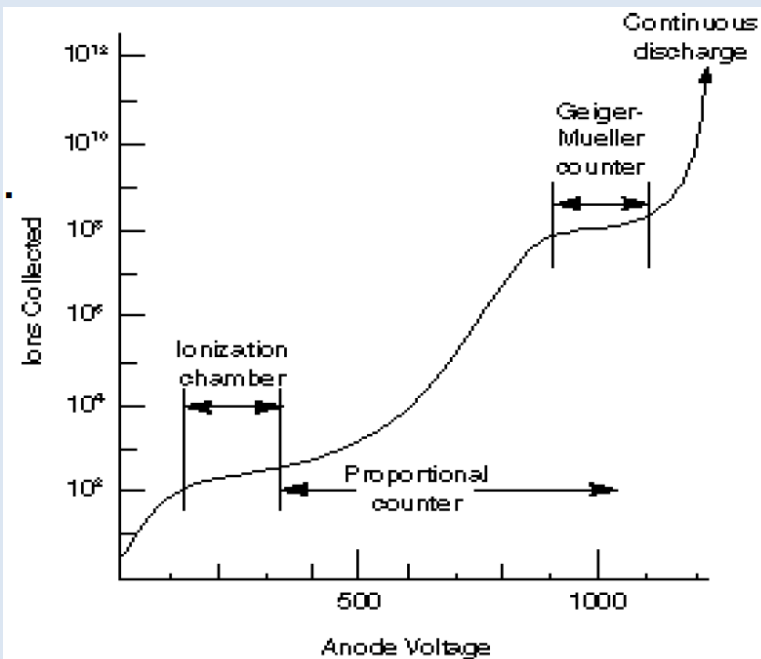
1. Indirect detection



2. Direct detection

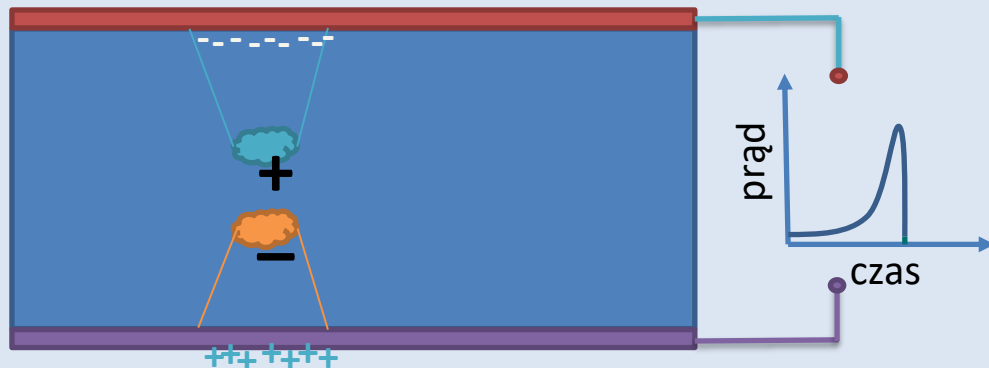
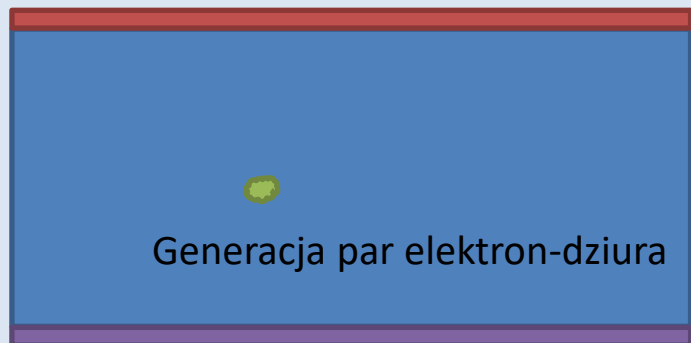
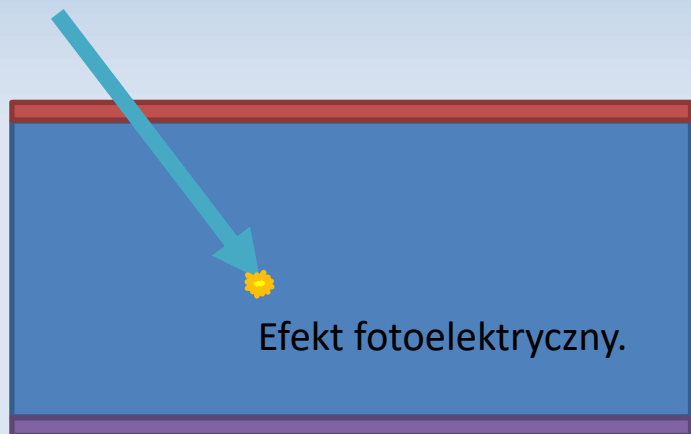


1. detektory gazowe:
 - komora jonizacyjna
 - licznik Geigera-Müllera
 - licznik proporcjonalny
2. detektor półprzewodnikowy
3. emulsja jądrowa
4. licznik scyntylny



Wg rosnącego napięcia:

- Komora jonizacyjna
- Gazowy scyntylny proporcjonalny
- Geiger Mueller (kaskady)
- Komora iskrowa



Działanie detektorów półprzewodnikowych opiera się na zbieraniu ładunków (elektronów i dziur separowanych przyłożonym polem elektrycznym) wygenerowanych w wyniku oddziaływania promieniowania z ośrodkiem przy zastosowaniu zewnętrznego pola elektrycznego.

Przebieg czasowy impulsu opisuje **twierdzenie Ramo-Shockley:**

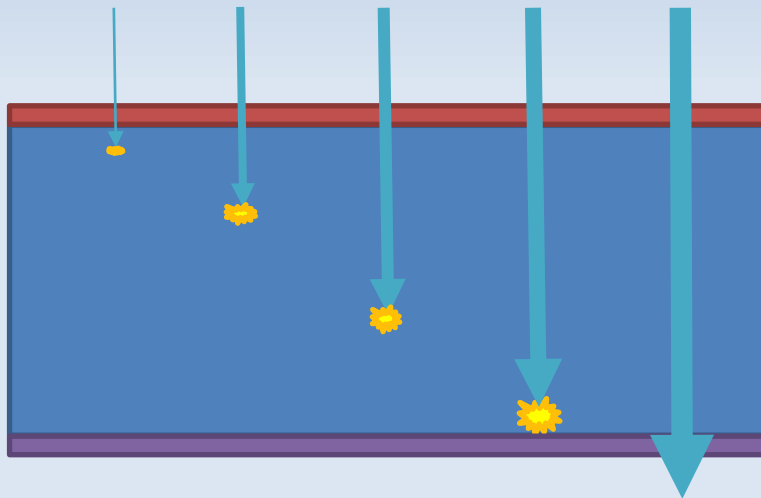
indukowany impuls prądowy =
ładunek

x

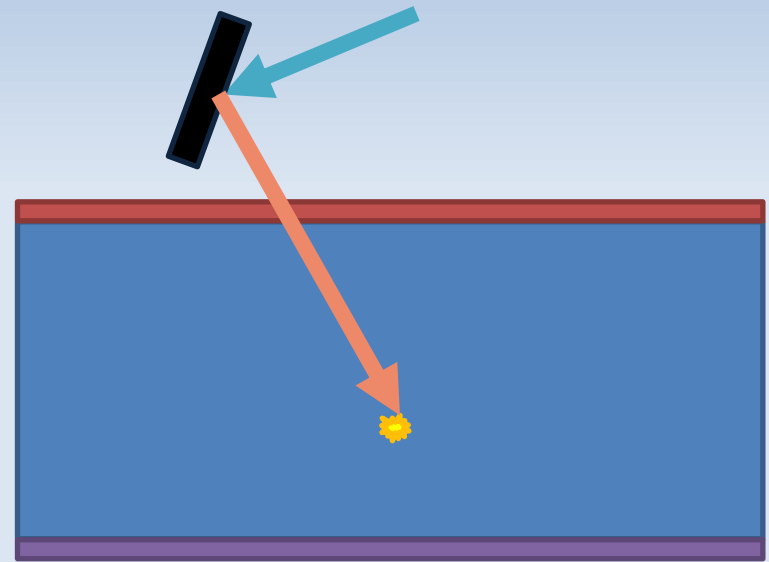
natężenie pola elektrycznego w kierunku chwilowego wektora prędkości (tzw. weighting field)

x

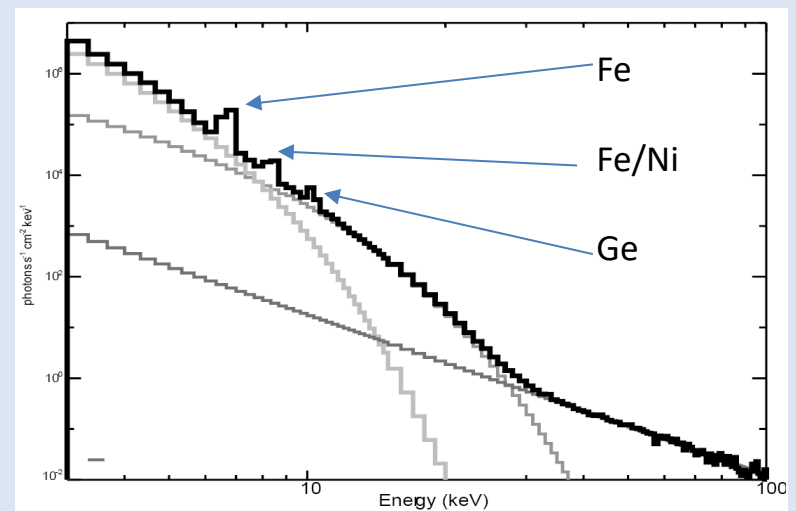
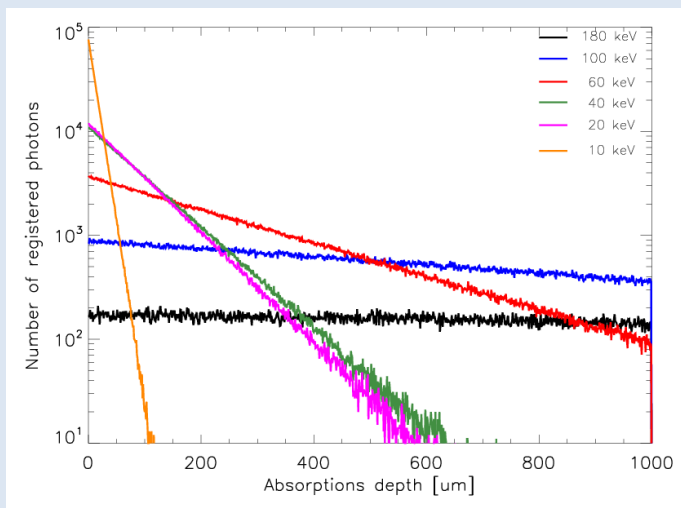
prędkość chwilowa wymuszonego ruchu ładunków

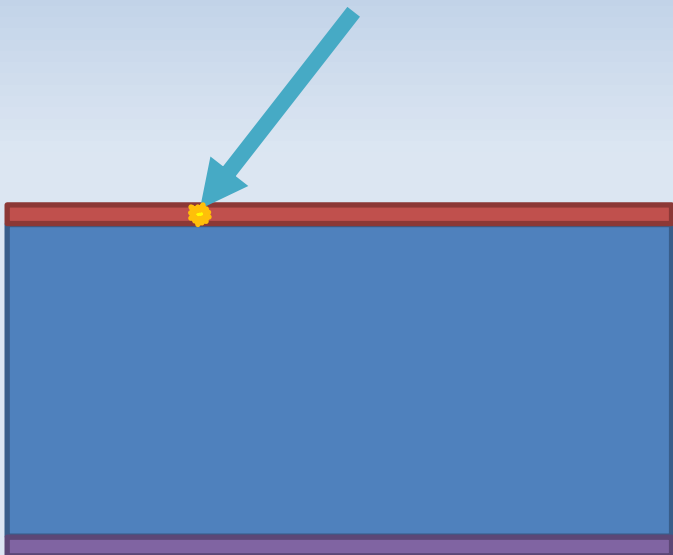


Efektywność pochłaniania fotonów zależy od ich energii.

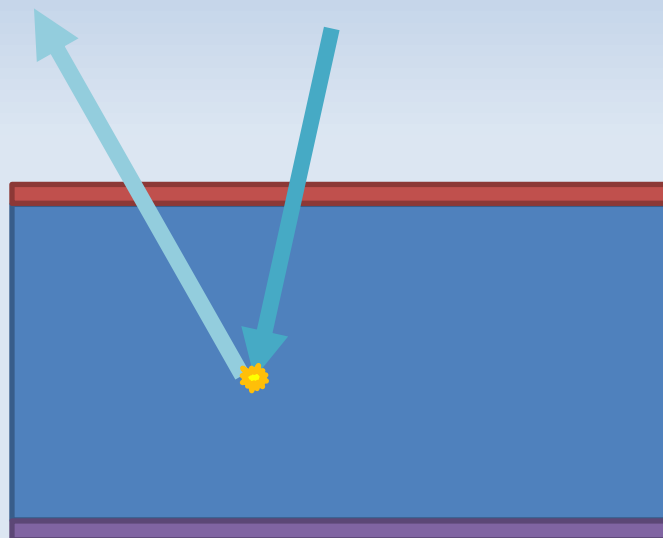
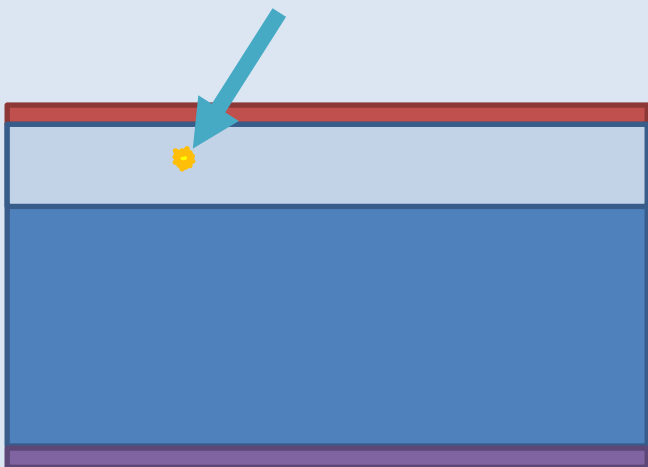


Promieniowanie wtórne od konstrukcji.
Dodatkowe linie w obserwowanych widmach.

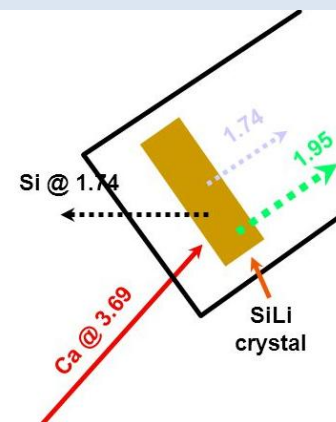
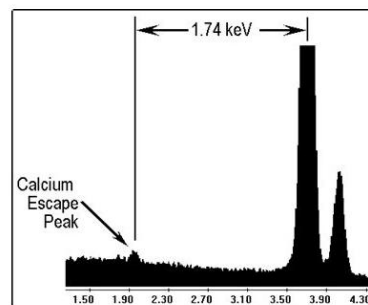


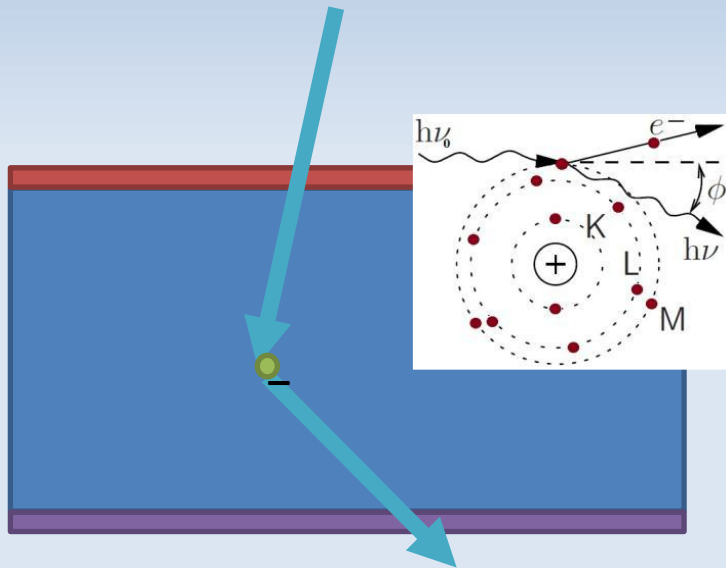


Pochłonięcie fotonów na elektrodach, filtrach, w warstwie martwej – brak zliczenia.

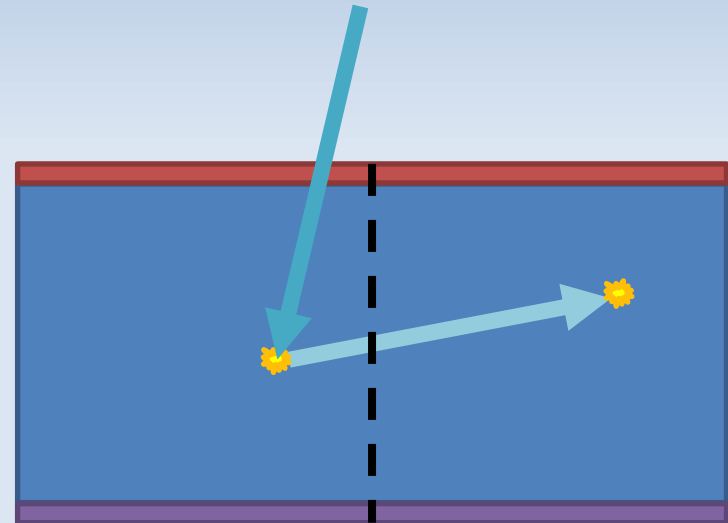
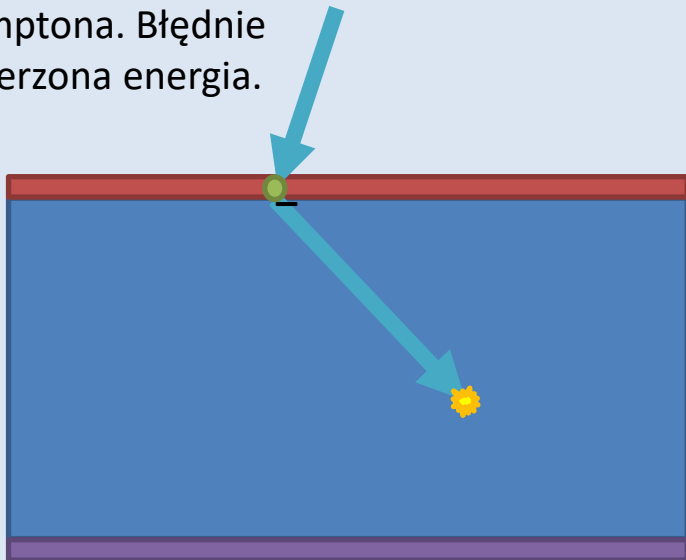


Ucieczka na zewnątrz promieniowania wtórnego (rekombinacje po zjonizowaniu elektronu na poziomie podstawowym) – escape peak. Błędnie zmierzona energia, dodatkowe linie w mierzonym widmie.

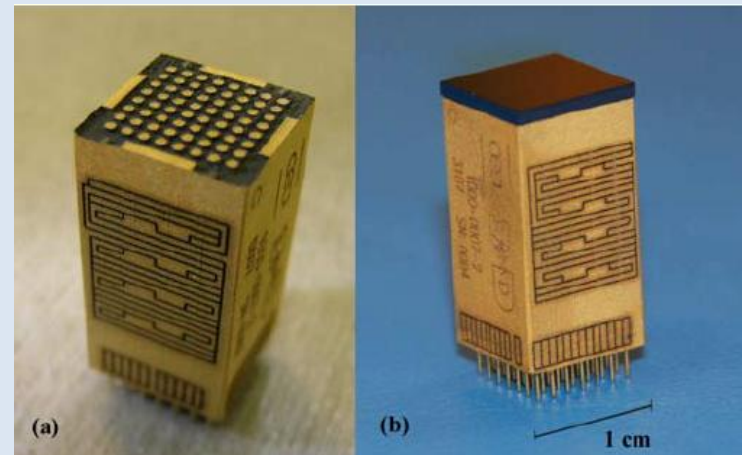


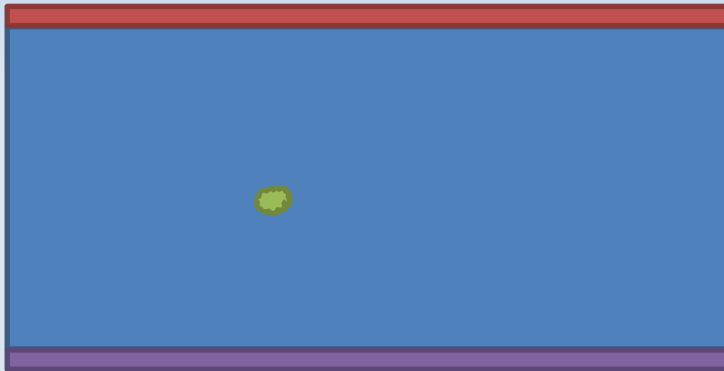


Rozpraszanie
Comptona. Błędnie
zmierzona energia.



Jednoczesne zliczenie w dwóch pikselach
(podział chmury ładunków, absorpcja
fotonów uciekających itp.). Dotyczy
detektorów pikselizowanych.

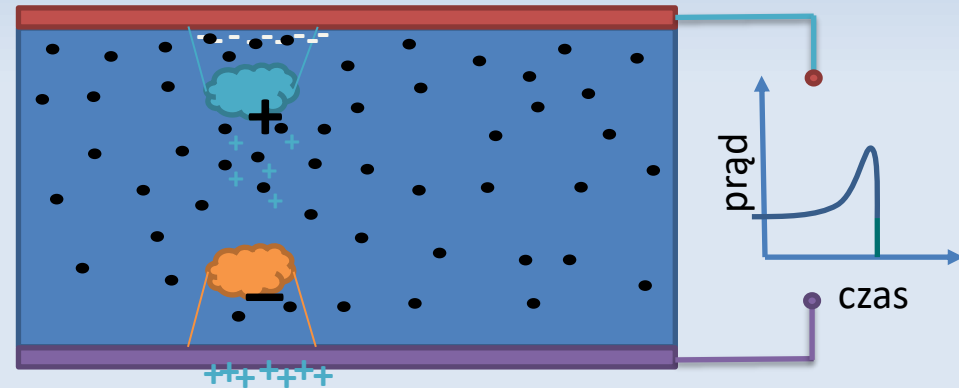




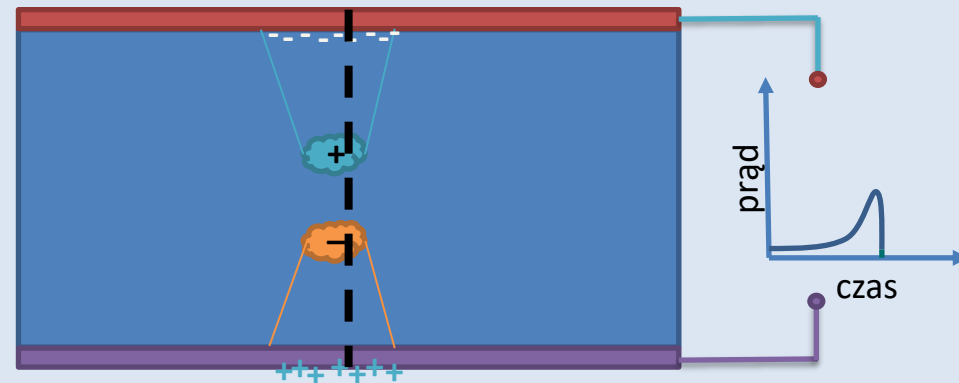
Szum układu elektronicznego i szum Fano (w przypadku cienkiego detektora statystyka Poissona). Poszerzenie linii promieniowania charakterystycznego:

$$FWHM(E) = \frac{1}{\sqrt{\frac{Fw}{E}}}$$

F – czynnik Fano
w – energia powstania pojedynczej pary elektron-dziura
E – energia fotonu



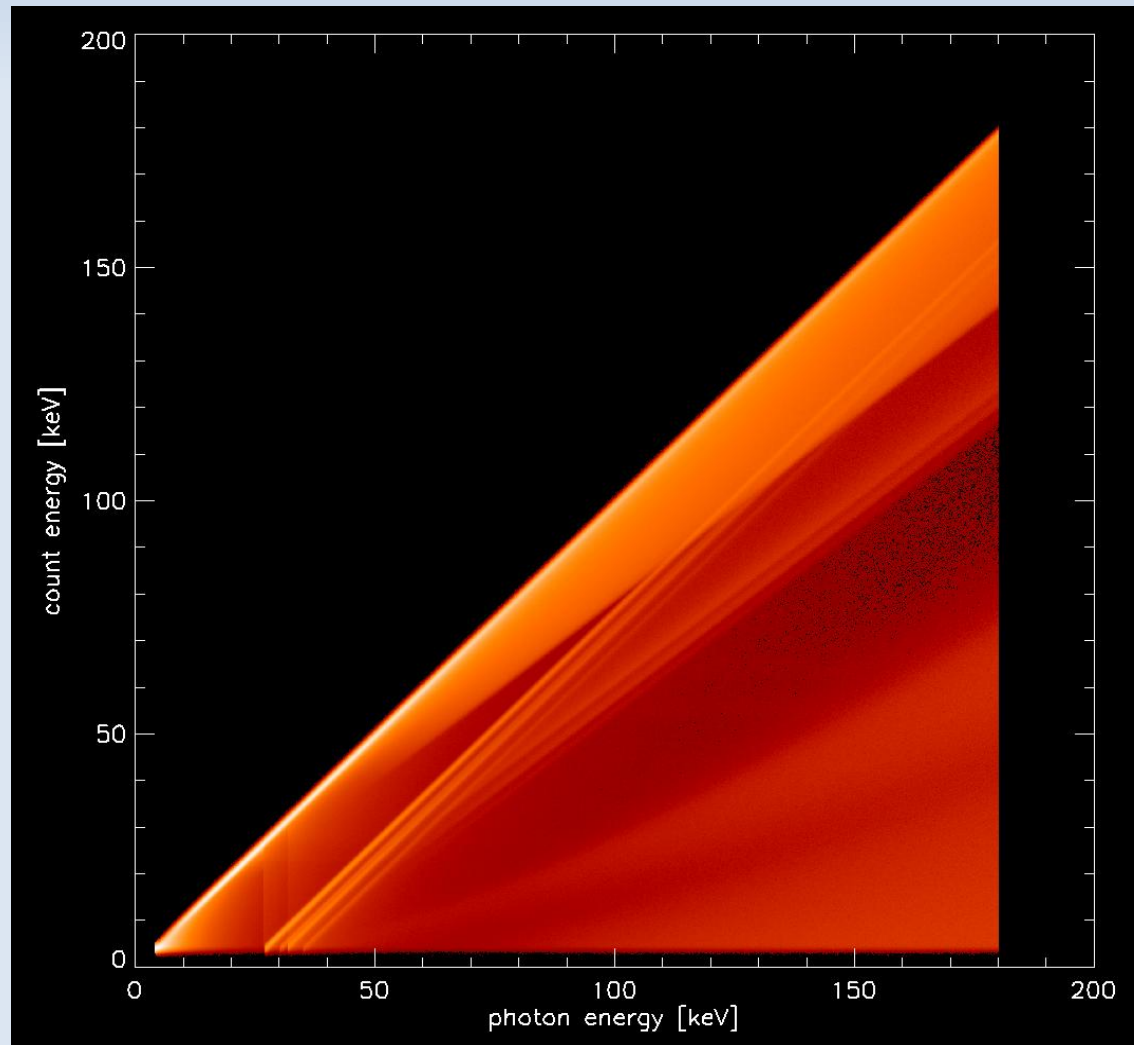
Pułapkowanie dziur – hole tailing. Błędnie zmierzona energia (asymetria w kierunku niskich energii).



Podział ładunku pomiędzy dwa piksele (charge sharing)

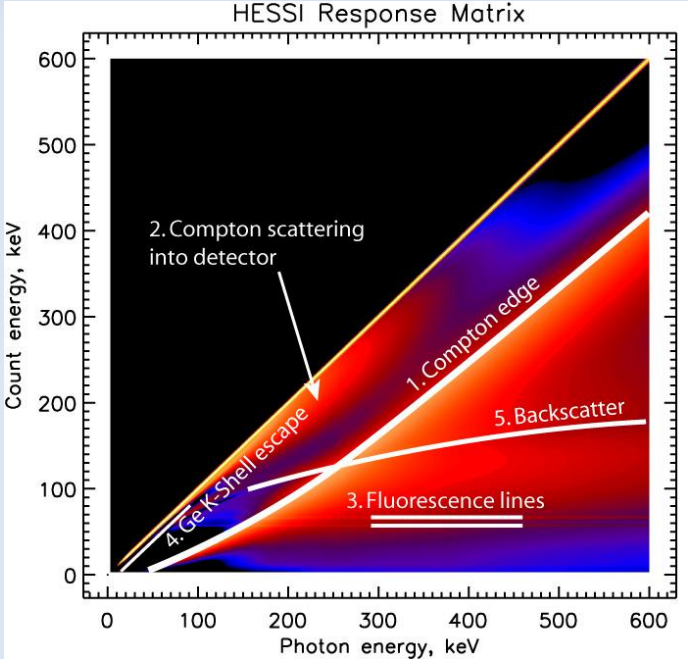
Material	Si	Ge	GaAs	CdTe	Cd _{0,9} Zn _{0,1} Te	HgI ₂
Struktura krystalograficzna	kubiczna	kubiczna	kubiczna (ZB)	kubiczna (ZB)	kubiczna (ZB)	tetragonalna
Metody wzrostu	C	C	CVD	THM	HPB, THM	VAM
Z -liczba atomowa	14	32	31,33	48,52	48,30,52	80,53
Gęstość (g/cm ³)	2,33	5,33	5,32	6,2	5,78	6,4
Przerwa energetyczna E _g (eV)	1,12	0,67	1,4	1,51	1,6	2,13
Energia kreacji pary elektron-dziura	3,62	2,96	4,2	4,43	4,6	4,2
Oporność właściwa ρ (Ωcm)	10 ⁴	50	10 ⁷	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ¹³
ruchliwość nośników	μ _e (cm ² /Vs)	1400	3900	8600	1100	1000
	μ _h (cm ² /Vs)	1900	1900	400	100	120
czas życia nośników	τ _e (s)	>10 ⁻³	>10 ⁻³	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁶
	τ _h (s)	10 ⁻³	2·10 ⁻³	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵
droga dryfu nośników	u _e τ _e (cm ² /V)	>1	>1	8·10 ⁻⁵	10 ⁻³	10 ⁻³ - 10 ⁻²
	μ _h τ _h (cm ² /V)	~1	>1	4·10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵

Tabela 2.2.1. Właściwości fizyczne głównych związków półprzewodnikowych w T = 25°C wykorzystywanych do budowy detektorów X i gamma. (ZB - zinc blend, C – Czochralski, CVD - chemical vapor deposition, THM – travelling heater method, HPB – high-pressure Bridgman, VAM – vertical ampoule method) [3,9].



Monoenergetyczne wiązki z krokiem 0.1 keV. Uwzględnione efekty instrumentalne.
Następny krok: model całego instrumentu (Spectral Response Matrix)

10 x mniejsza energia kreacji pary elektron-dziura (elektron-jon w gazie) niż w gazowych, co oznacza dziesięciokrotny wzrost liczby ładunków i lepszą energetyczną zdolność rozdzielczą.



Pomiar zależy od:

- Grubość kryształu
- Czas martwy
- Pile-up
- Szумы
- Hole trapping
- Escape peak
- Fluorescencja
- Detector Response Matrix

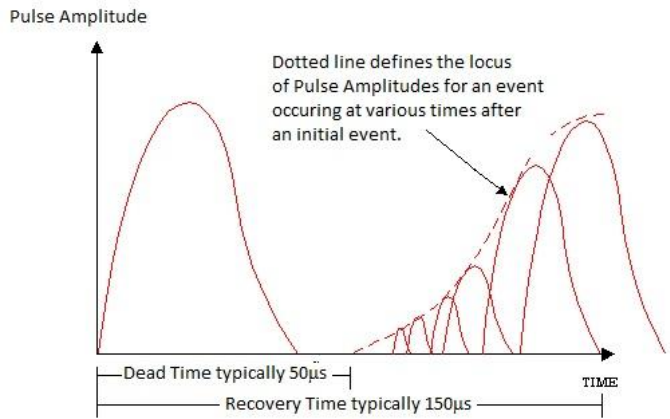
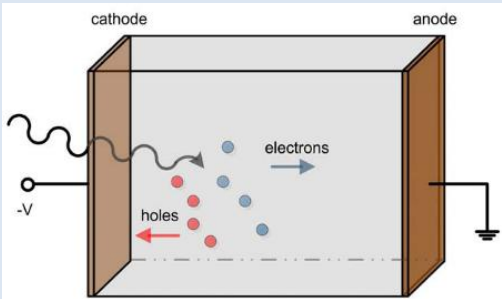
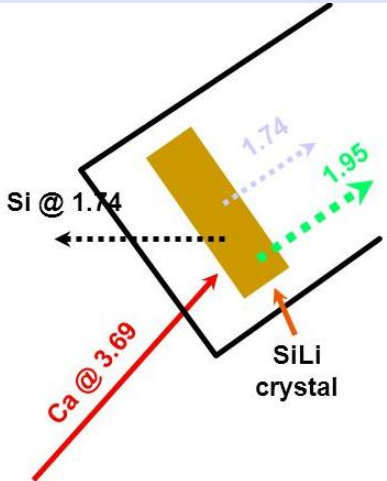
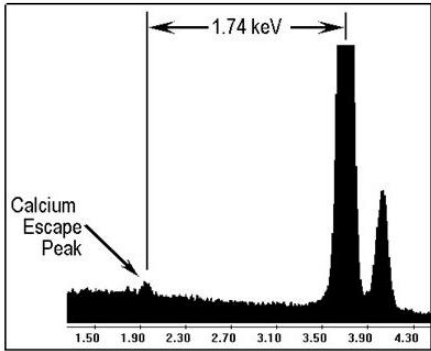


Figure 4



Pile-up istnieje zawsze, ale powyżej pewnego tempa zliczeń może w istotny sposób zniekształcić mierzone widmo.

