

Wprowadzenie do interferometrii radiowej



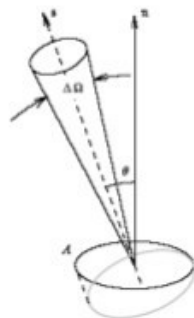
Marcin P. Gawroński

Podstawowe definicje

- natężenie

Def. Natężenie (widmowe) = jasność (powierzchniowa) (*specific intensity, brightness*) to moc odebrana w przedziale częstotliwości przez powierzchnię (składową prostopadłą) z kierunku jednostkowego kąta bryłowego

$$I_\nu = \frac{dP}{\cos\theta dA \nu d\Omega}$$



Jednostka SI: [$W m^{-2} sr^{-1} Hz^{-1}$]

Jednostka cgs: [$erg cm^{-2} sr^{-1}$]

- strumień (gęstość strumienia)

Def. (Widmowa) gęstość strumienia (często używa się tylko strumień) (*flux density*) to moc odebrana w przedziale częstotliwości przez daną powierzchnię, prostopadłą do kierunku na źródło:

$$S_\nu = \frac{dP}{Ad\nu} = \int_{source} I_\nu(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega$$

Jednostka SI: [$W m^{-2} Hz^{-1}$]

Jednostka cgs: [$erg cm^{-2}$]

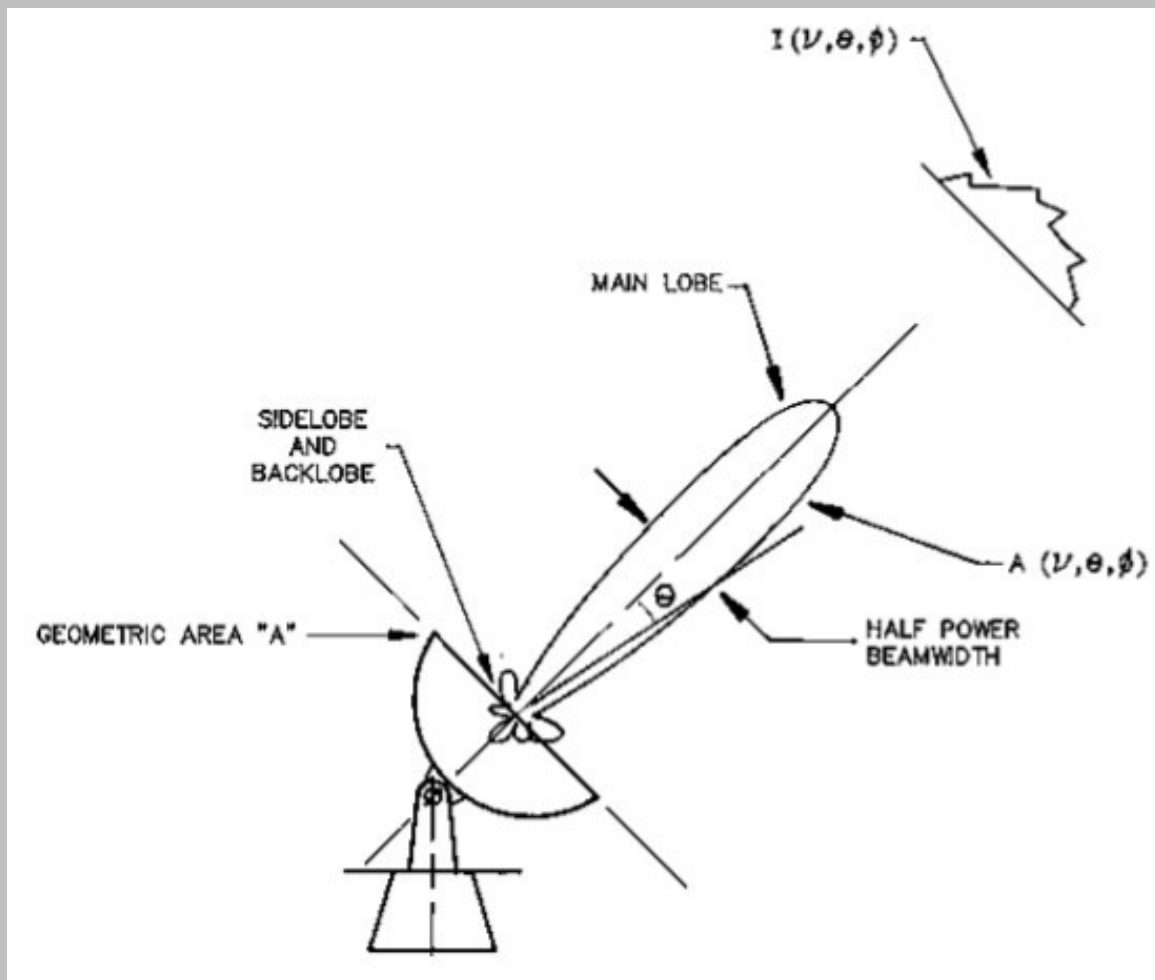
1 Janski = 1 Jy = $10^{-26} W m^{-2} Hz^{-1} = 10^{-23} erg cm^{-2}$

1 solar unit = 1 su = $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1} = 10^{-19} erg cm^{-2}$

P - moc odebrana (liczona na obie polaryzacje)

A - powierzchnia zbierająca (dokładniej: efektywna powierzchnia)

Schemat radioteleskopu



- znormalizowana charakterystyka mocy

$$P_n(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{P_{max}}$$

- wiązka „PSF”

$$\theta_{HPBW} = 1.147 \frac{\lambda}{d} \text{ [rad]}$$

- pełna szerokość wiązki

$$\Omega_A = \int_{4\pi} P_n(\theta, \varphi) d\Omega$$

- kierunkowość anteny „gain”

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

-apertura efektywna

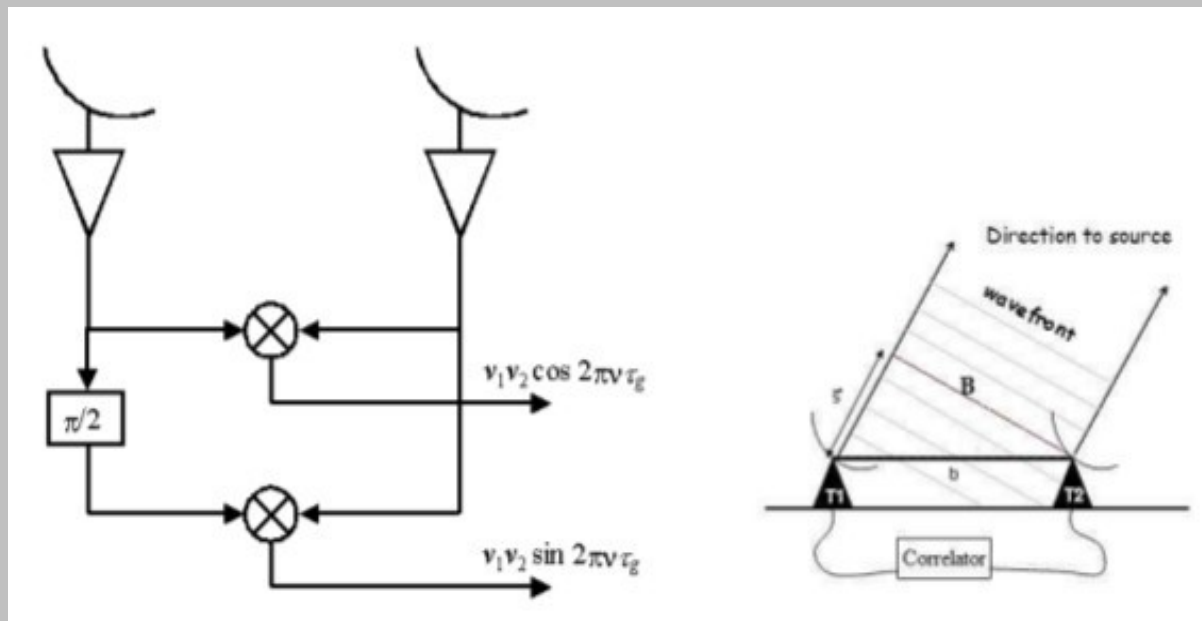
$$A_{eff} = \frac{\lambda^2 D(\theta, \varphi)}{4\pi}$$

-efektywność anteny

$$\eta = \frac{A_{eff}}{A_{geom}}$$

Prosty interferometr

Rozważmy promieniowanie dochodzące z kierunku \underline{s} i kąta $d\Omega$



- napięcie na I antenie

$$V = V_1 \cos(\omega t)$$

- napięcie na II antenie

$$V = V_2 \cos(\omega(t - \tau_g))$$

- zapóźnienie we fronicie fali

$$\tau_g = \vec{b}\vec{s}/c$$

Odpowiedź systemu dla rozciągniętego źródła i sygnału uśrednionego w czasie

$$R'_c = \int \int (V_1 V_2 \cos(2\pi\nu\vec{b}\vec{s}/c)) / 2 d\Omega$$

ale, $I \sim V_1 V_2$

$$R_c = \int \int I_\nu(\vec{s}) \cos(2\pi\nu\vec{b}\vec{s}/c) d\Omega$$

I dla przesuwника fazy:

$$R_s = \int \int I_\nu(\vec{s}) \sin(2\pi\nu\vec{b}\vec{s}/c) d\Omega$$

Prosty interferometr

- funkcja widzialności (połączone obie składowe odpowiedzi systemu na sygnał)

$$V = R_c - iR_s = Ae^{-i\varphi}$$

- amplituda i faza fali

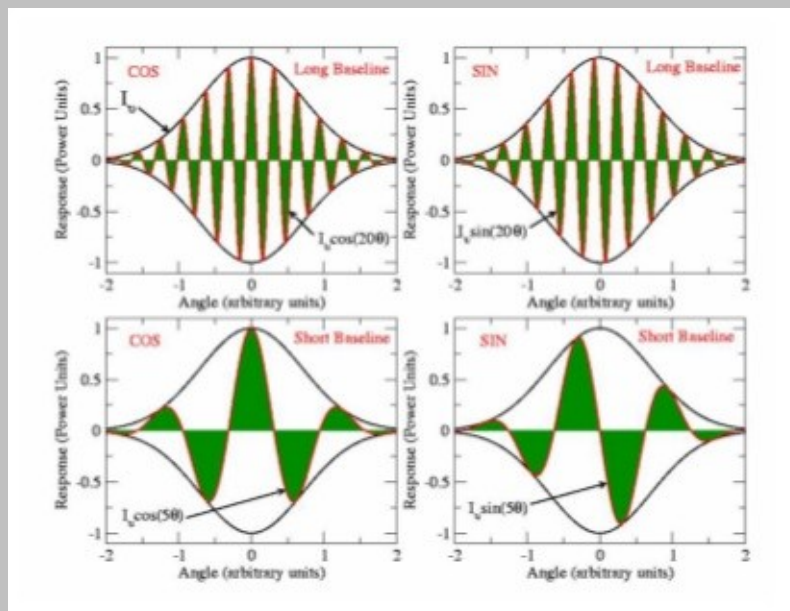
$$A = \sqrt{R_c^2 + R_s^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1}(R_s/R_c)$$

- wartość funkcji dla wybranej bazy \underline{b}

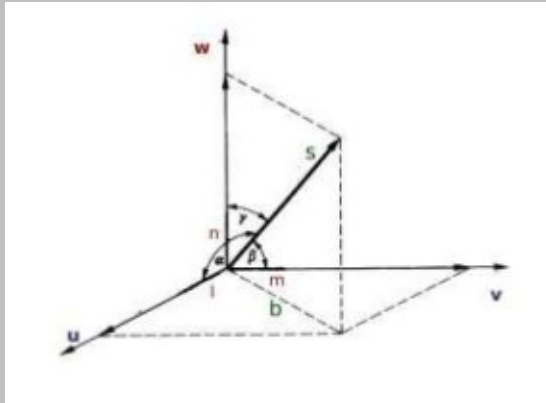
$$V(\vec{b}) = \int \int I_\nu(\vec{s}) e^{-2\pi i \nu \vec{b} \vec{s} / c} d\Omega$$

- przykłady funkcji widzialności (ciemna zieleń) wraz z funkcją jasności I_ν i listkami (czerwień)



Płaszczyzna $u-v$

Zdefiniujmy układ współrzędnych (u, v, w) związany z aperturą



wektor \underline{s} możemy zapisać za pomocą składowych

$$\begin{aligned} l &= \cos(\alpha) \\ m &= \cos(\beta) \\ n &= \cos(\gamma) \end{aligned}$$

$$\vec{s} = (l, m, n) = (l, m, \sqrt{1 - l^2 - m^2})$$

kąt bryłowy

$$d\Omega = \sqrt{1 - l^2 - m^2} dl dm$$

wektor bazy \underline{b}

$$\vec{b} = (\lambda u, \lambda v, \lambda w) = (\lambda u, \lambda v, 0)$$

Wtedy funkcja widzialności ma postać (2-dim transformata Fouriera z funkcji jasności)

$$V_\nu(u, v) = \iint \frac{I_\nu(l, m)}{\cos(\gamma)} e^{-2i\pi(ul+vm)} dl dm$$

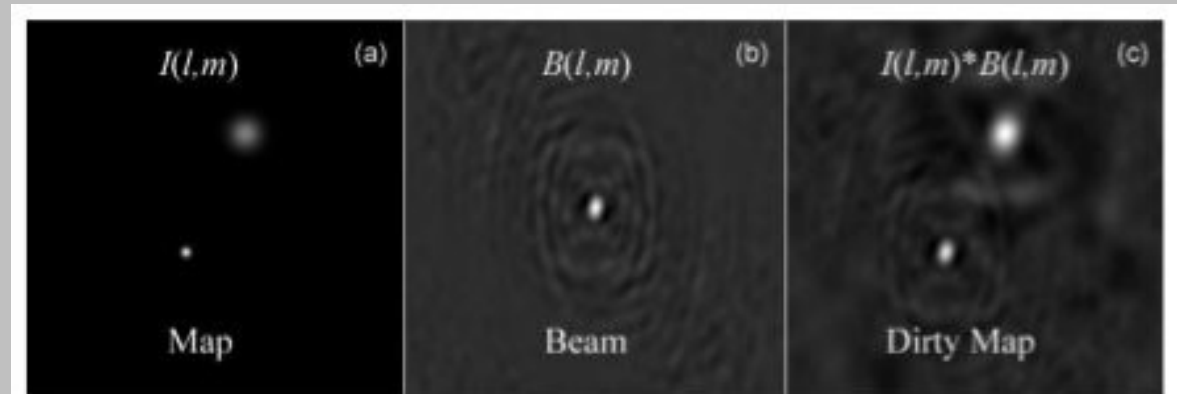


$$I_\nu(l, m) = \cos(\gamma) \iint V_\nu(u, v) e^{2i\pi(ul+vm)} du dv$$

Brudny obraz - efekt funkcji próbkowania $S(u, v)$

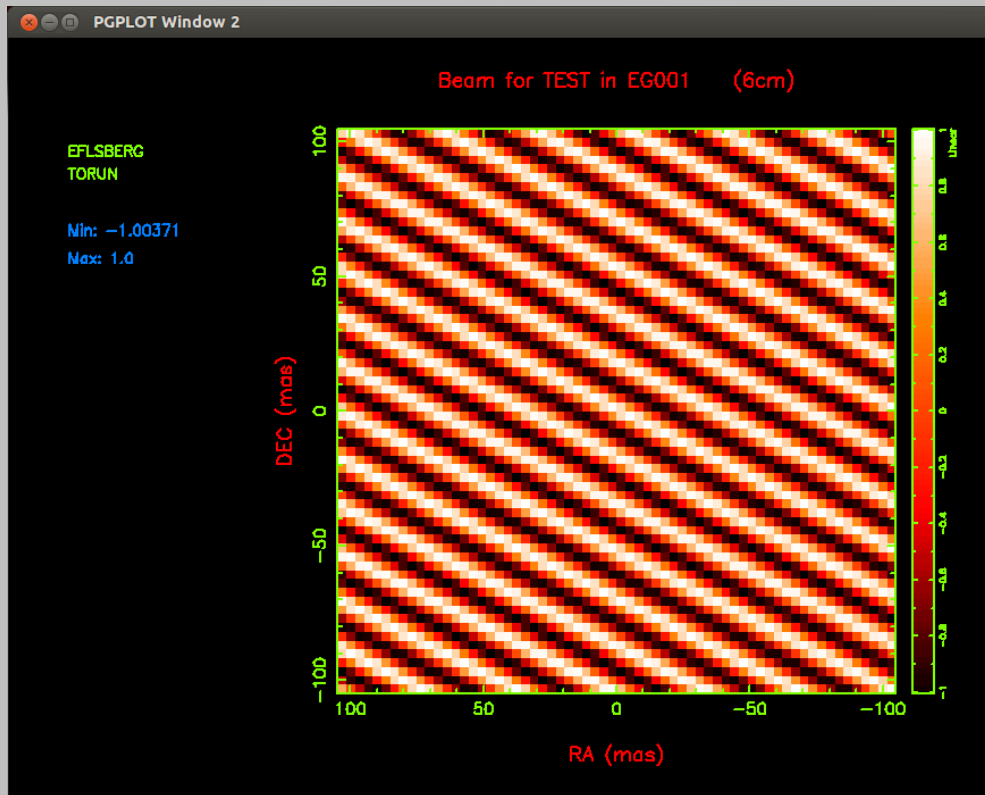
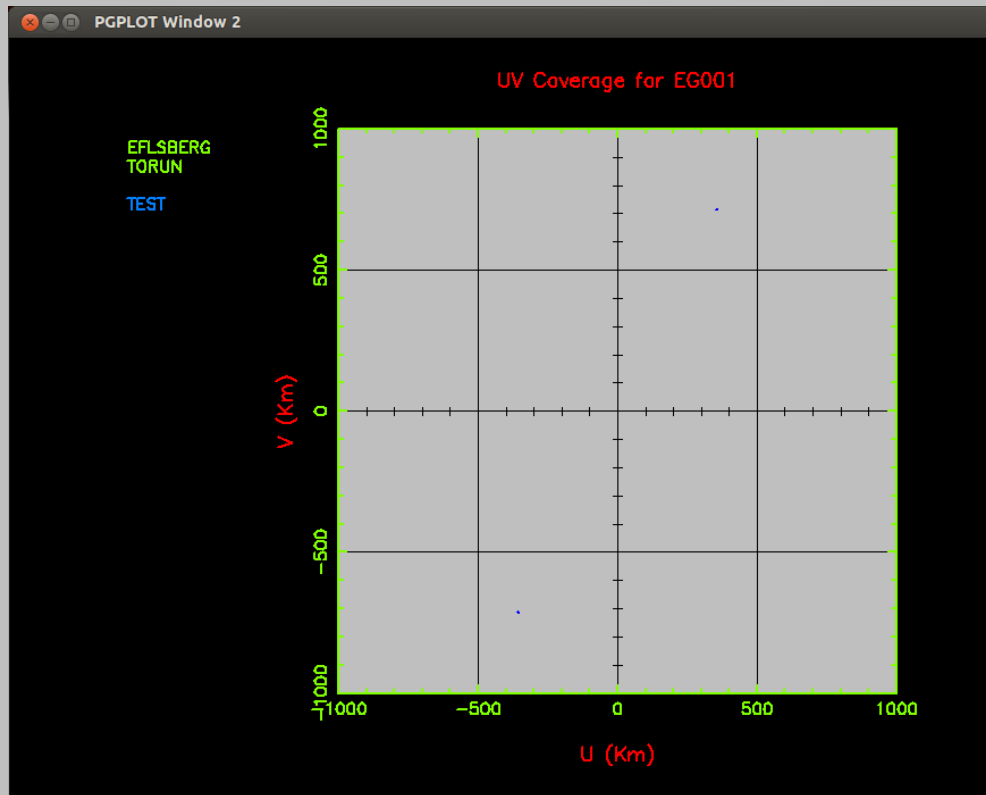
$$I_D(l, m) = \iint S(u, v) V_\nu(u, v) e^{2i\pi(ul+vm)} du dv$$

Każda wartość funkcji widzialności to jeden punkt na płaszczyźnie $u-v$



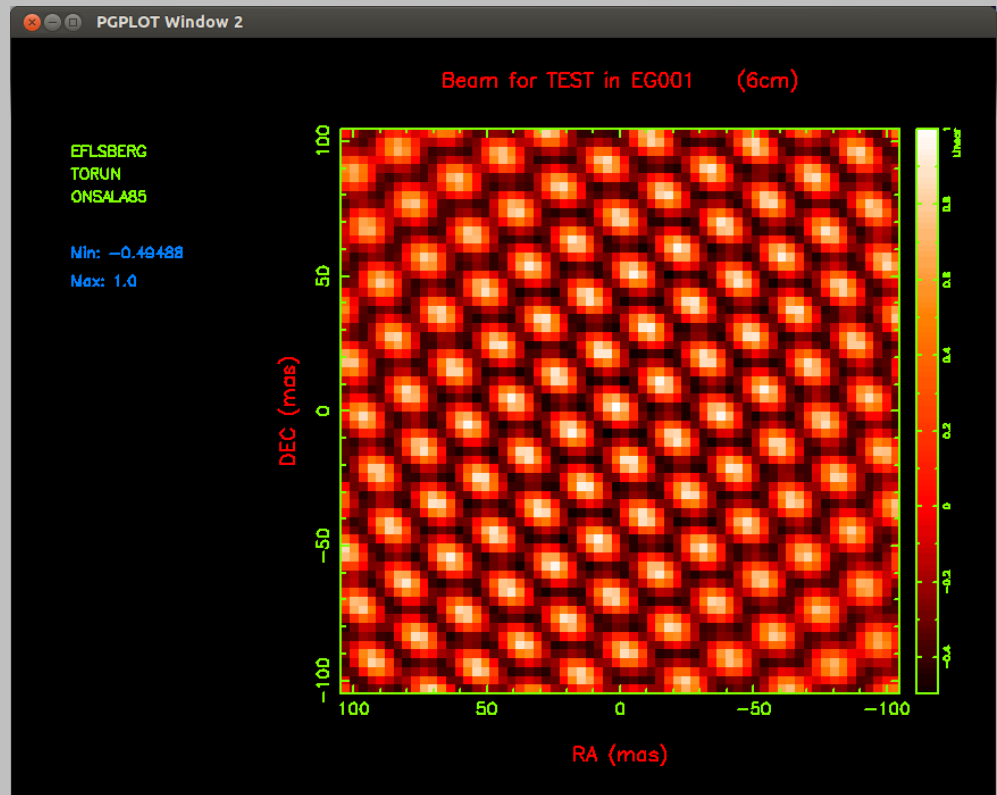
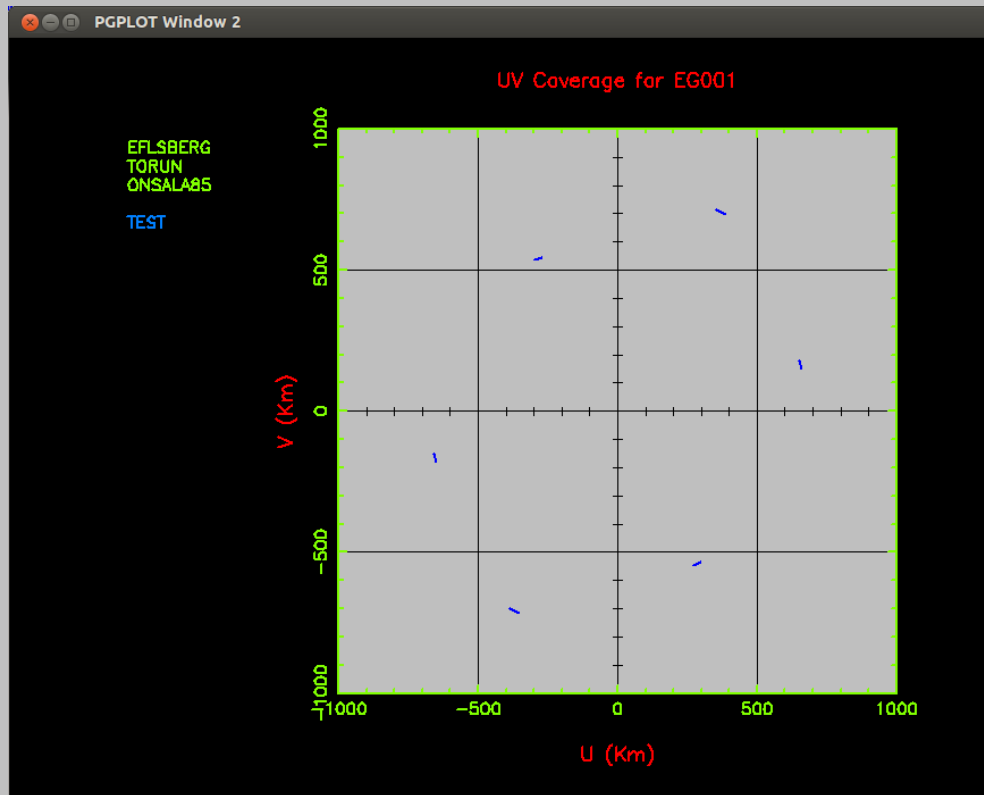
Płaszczyzna u-v

2 anteny - krótki skan



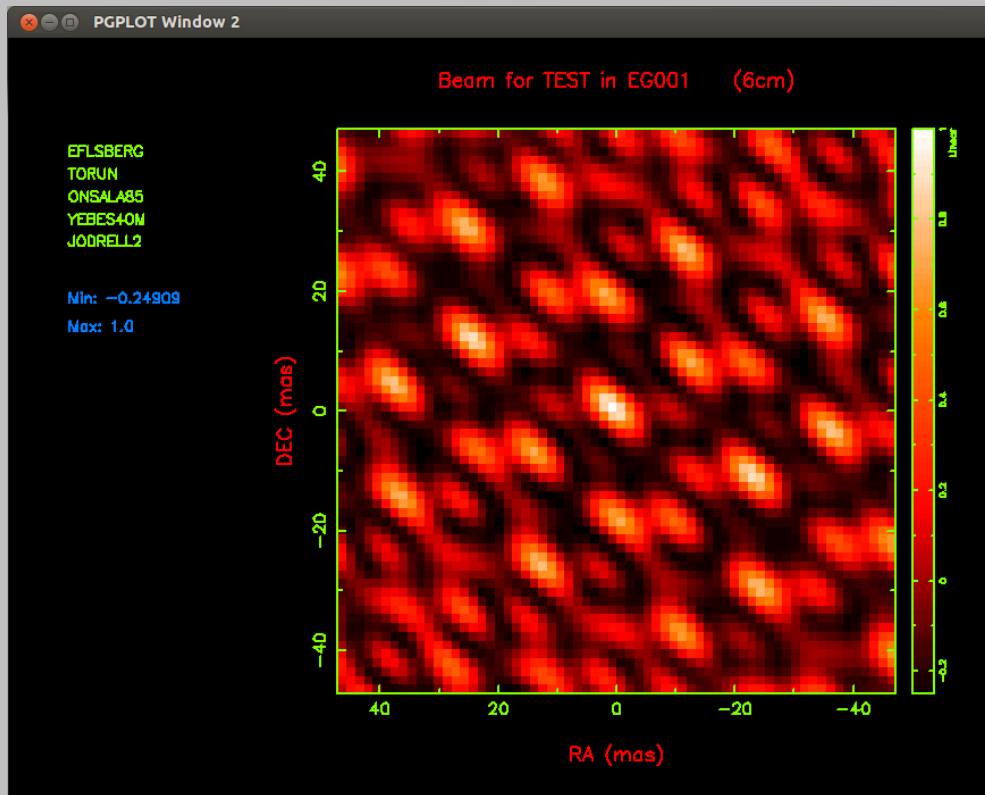
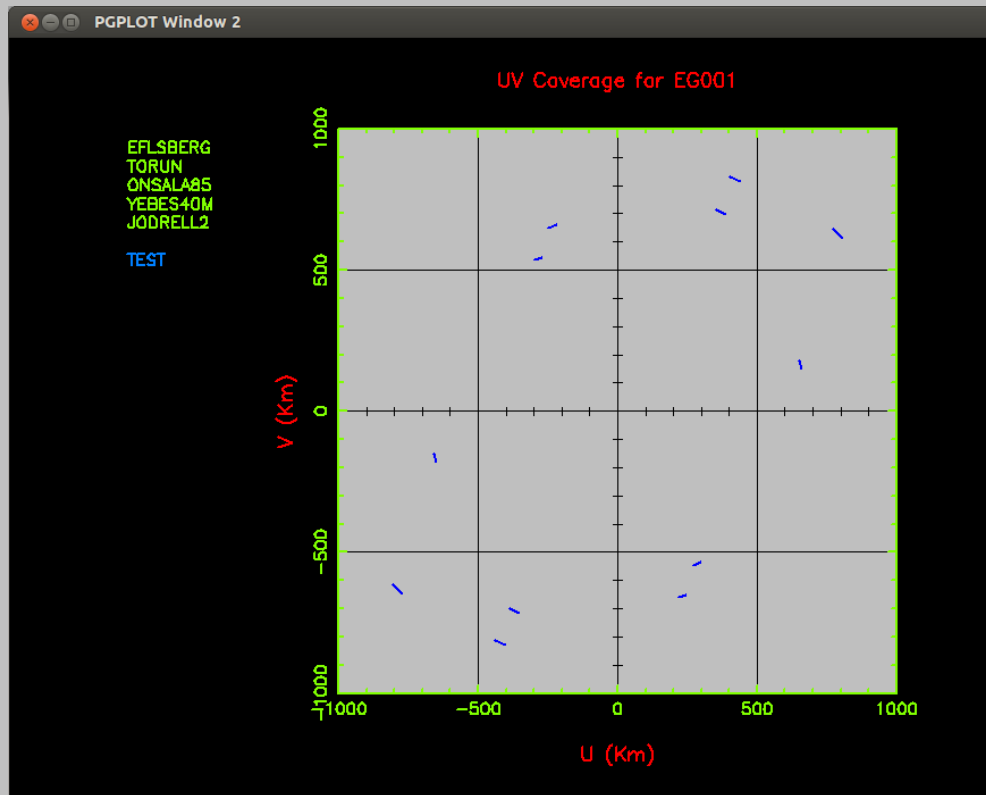
Płaszczyzna u-v

3 anteny - krótki skan



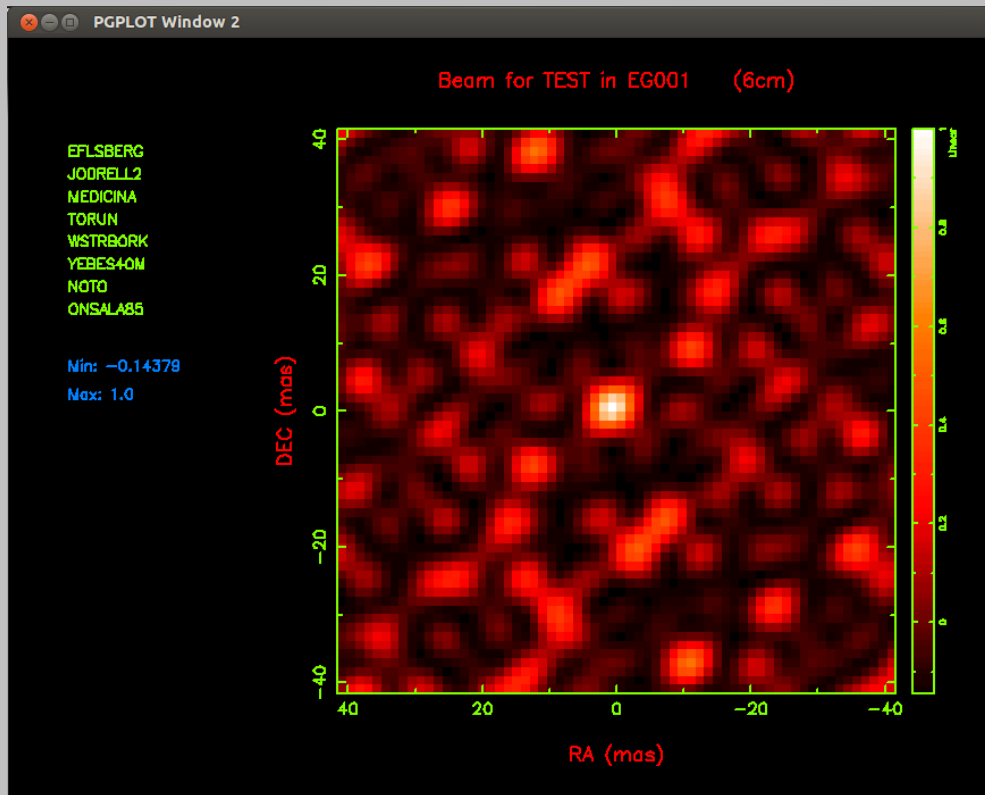
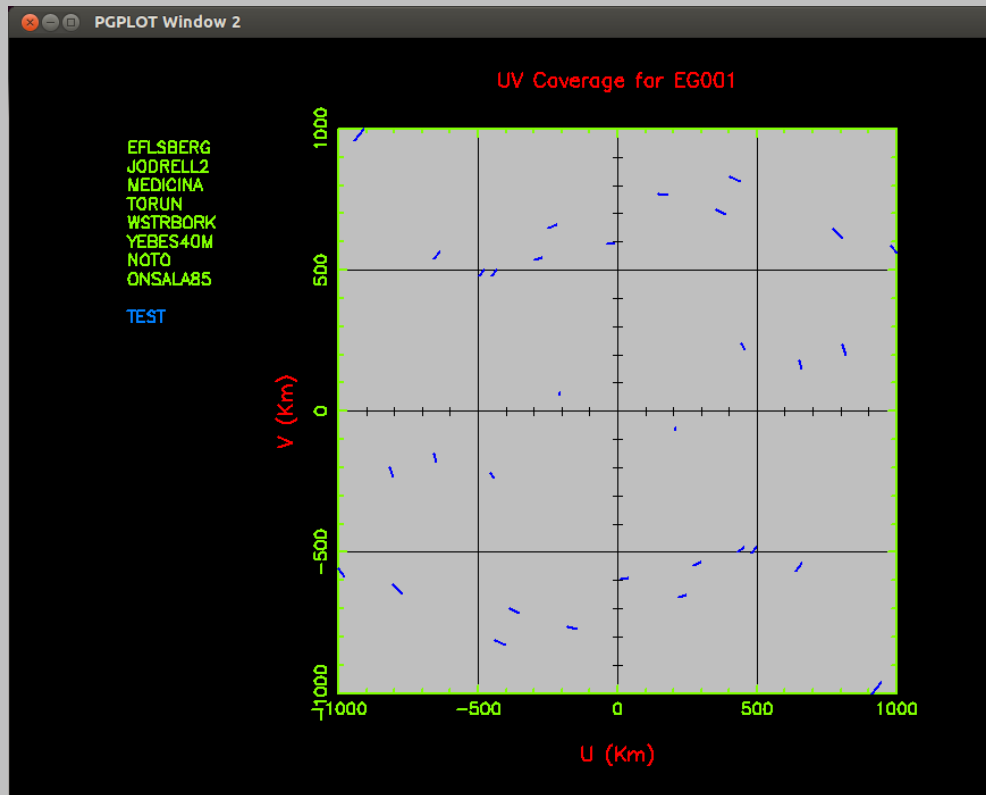
Plaszczyzna u-v

5 anten - krótki skan



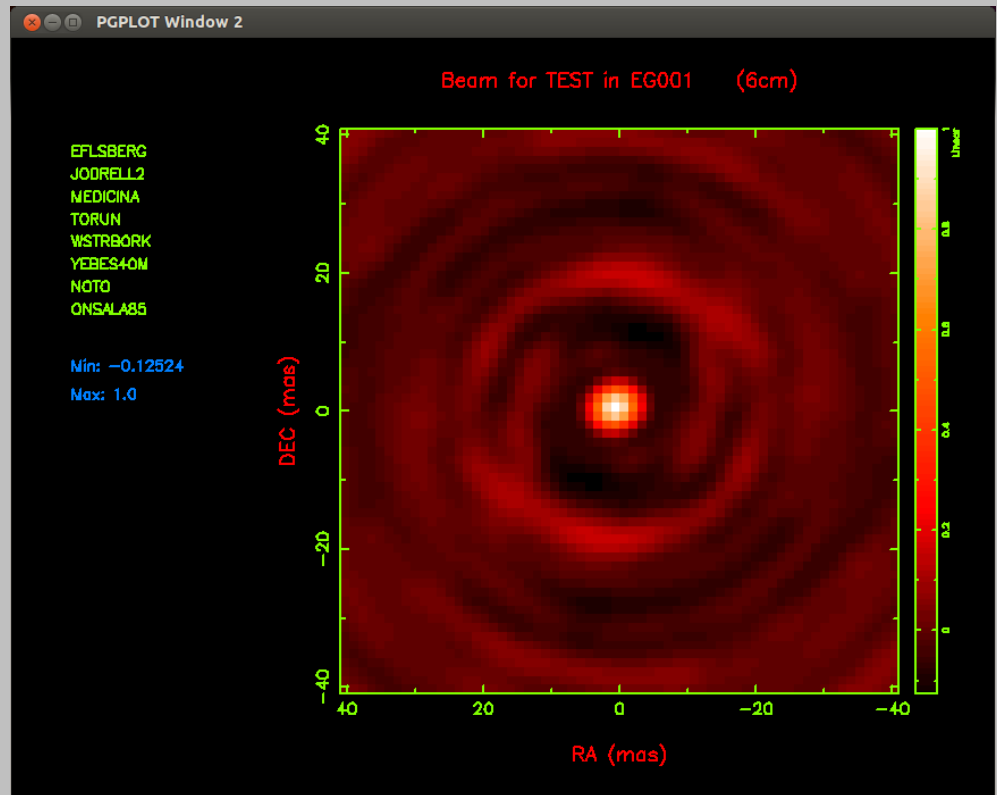
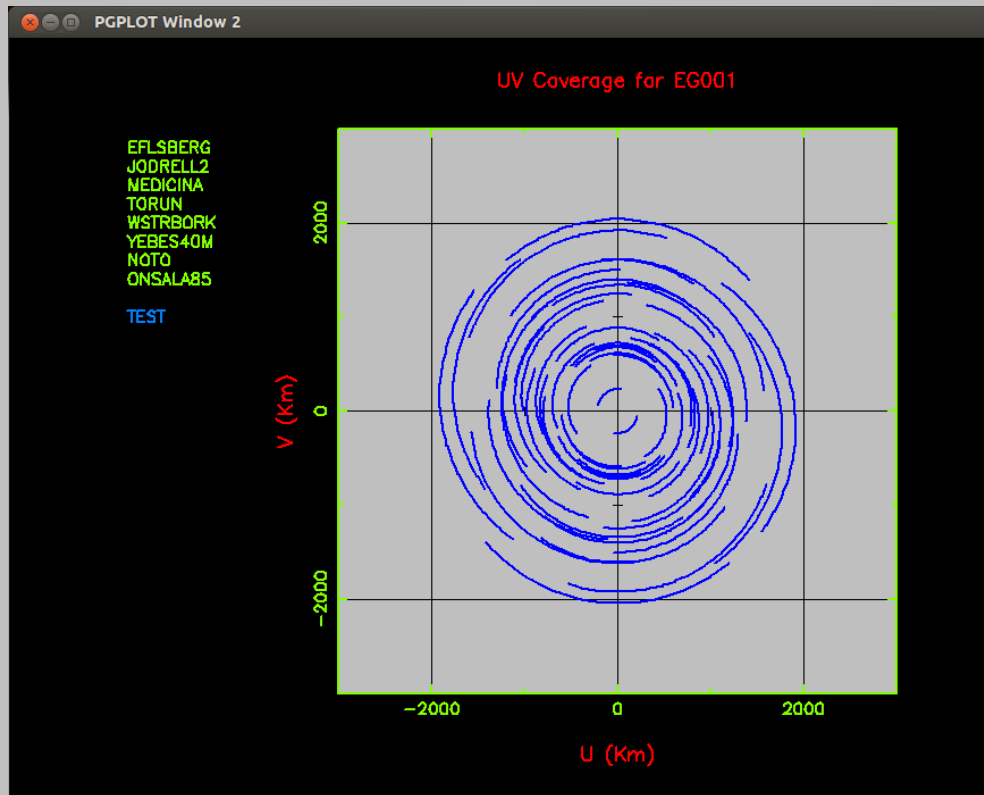
Plaszczyzna u-v

8 anten - krótki skan



Plaszczyzna u-v

8 anten - 6hrs obserwacji



Właściwości interferometru

Czułość interferometru złożonego z 2 anten

$$\Delta S_{ij} = \frac{1}{\eta_s} \sqrt{\frac{SEFD_i \cdot SEFD_j}{2 \Delta \nu \tau_{int}}} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{\frac{k T_{sys,1}}{\eta_1 A_1}} \sqrt{\frac{k T_{sys,2}}{\eta_2 A_2}}}{\sqrt{\tau_{int} \Delta \nu N}}$$

$$SEFD_i = T_{sys,i} / K_i$$

η_1, η_2, η_s - efektywność anteny pierwszej, drugiej i obu

$T_{sys,i}$ - temperatura systemowa danej anteny

τ_{int} - czas integracji

N - ilość baz (dla 2 anten $N=1$)

$\Delta \nu$ - przedział częstotliwości

A_1, A_2 - opertury poszczególnych anten

Czułość interferometru złożonego z n identycznych anten

$$\Delta S_m = \frac{1}{\eta_s} \frac{SEFD}{\sqrt{N(N-1) \Delta \nu \tau_{int}}} = \frac{\sqrt{2} k T_{sys}}{\sqrt{\tau_{int} \Delta \nu A \eta_s \sqrt{N}}}$$

maksymalna zdolność
rozdzielcza (arcsec)

$$\theta_{max} = 1.4 \frac{\lambda}{B_{max}}$$

maksymalna rozmiary źródła
zaobserwowane przez system (arcsec)

$$\theta \lesssim \lambda / (2 \cdot B_{min})$$

Podstawy tworzenia map

Algorytm „CLEAN” (Högbom 1974):

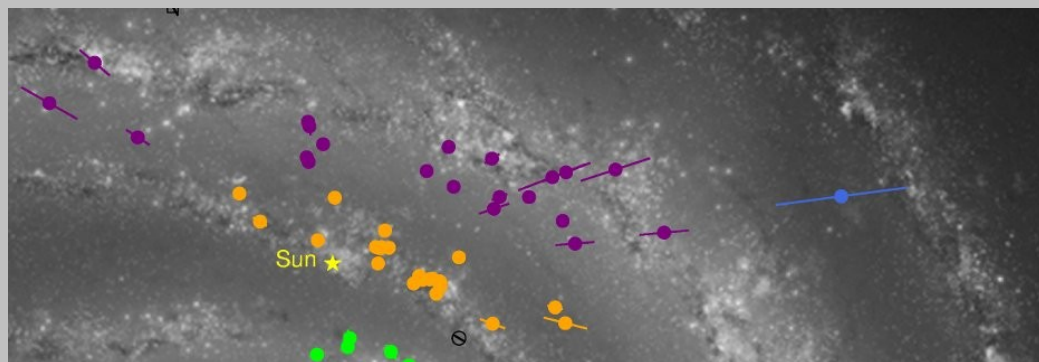
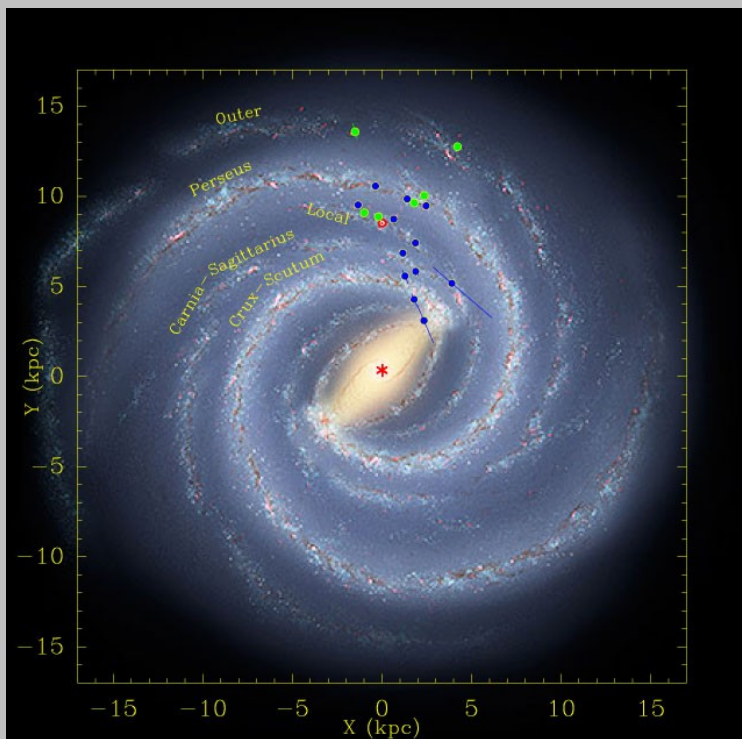
- 1) lokalizacja najjaśniejszego elementu obrazu w zadanym polu
- 2) splecenie go z „brudną wiązką” i odjęcie od brudnej mapy
- 3) splecenie z „czystą wiązką” i umieszczenie w mapie wynikowej („czystej”)
- 4) mapa uzyskana w 2 przechodzi na kolejnego etapu iteracji
- 5) pętlę 1-4 wykonuje się aż do uzyskania „satysfakcjonującego” szumu na „brudnej” mapie
- 6) mapa końcowa jest sumą mapy „czystej” z końcową mapą „brudną”

Matematycznie proces jest źle zdefiniowany ze względu na pewną uznaniowość podczas wykonywania map (nakładanie okienek, kończenie iteracji). Szczególnie jest to uwidocznione w przypadkach gdy pokrycie płaszczyzny u-v jest ubogie a źródło ma skomplikowaną strukturę - można otrzymać różne mapy z tych samych obserwacji!

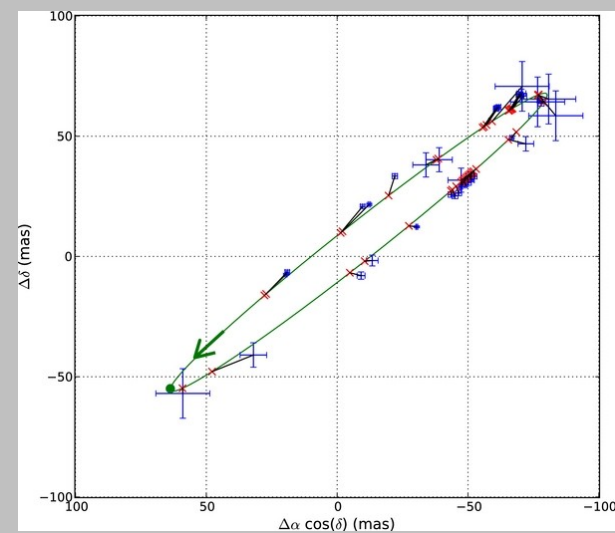
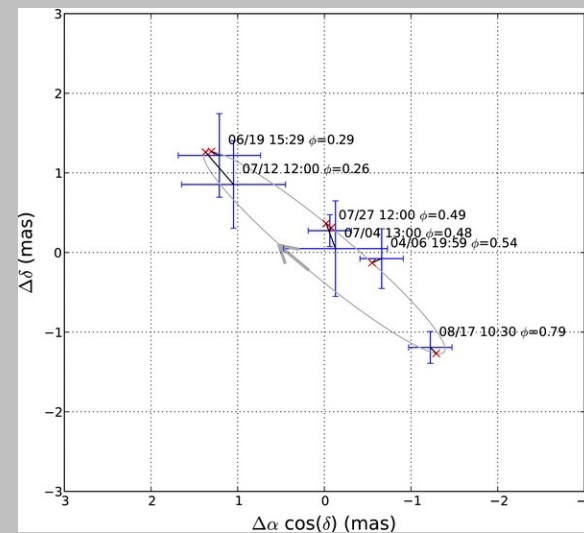
Astrofizyka a interferometria radiowa

Astrometria

BeSSel - Bar and Spiral Structure Legacy Project

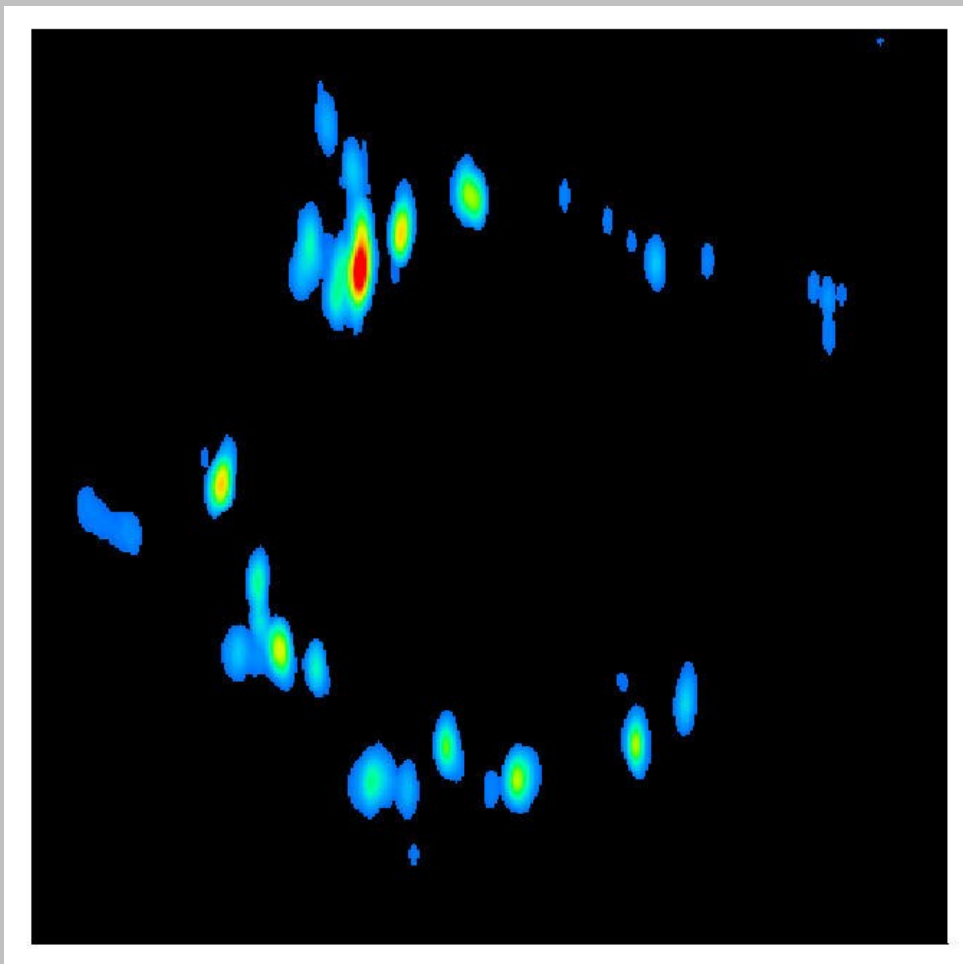


Układ Algola (β Per)

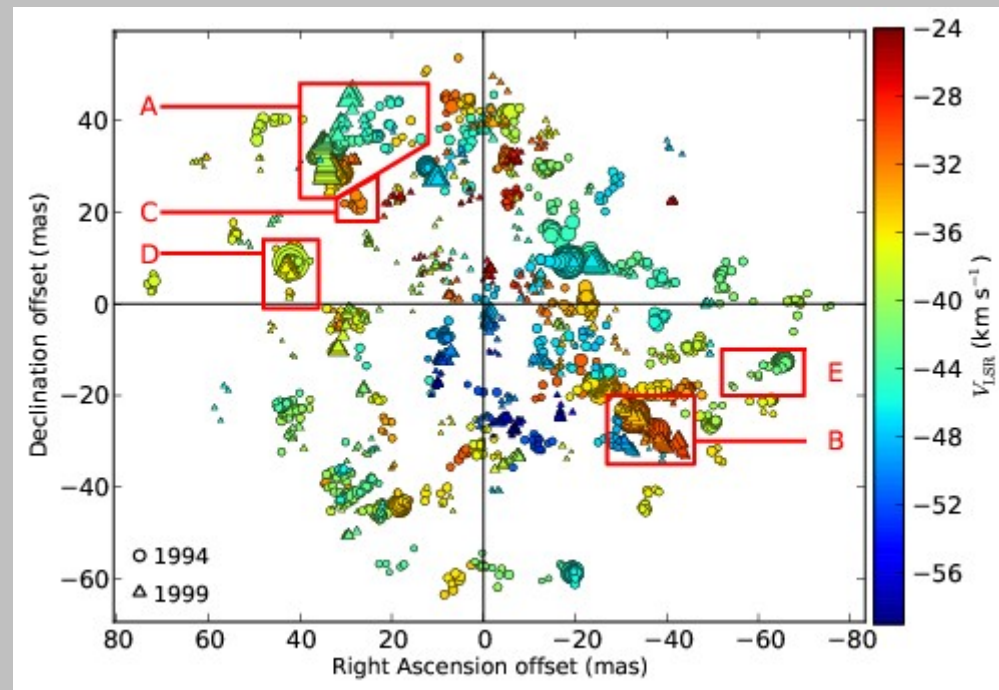


Astrofizyka a interferometria radiowa

Masery (wodny i metanolowy)



Anna's ring

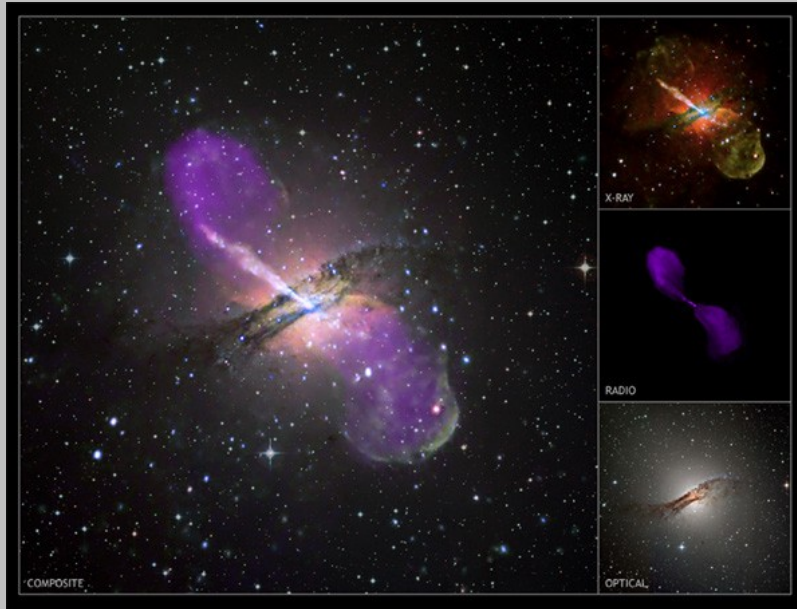


Otoczka S Per

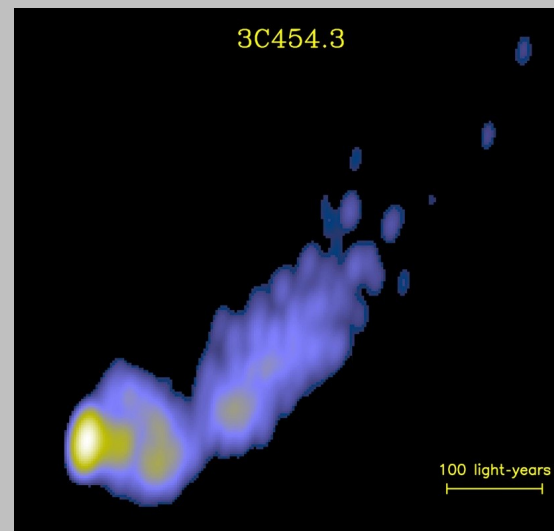
Astrofizyka a interferometria radiowa

Radiogalaktyki i kwazary

Cen A

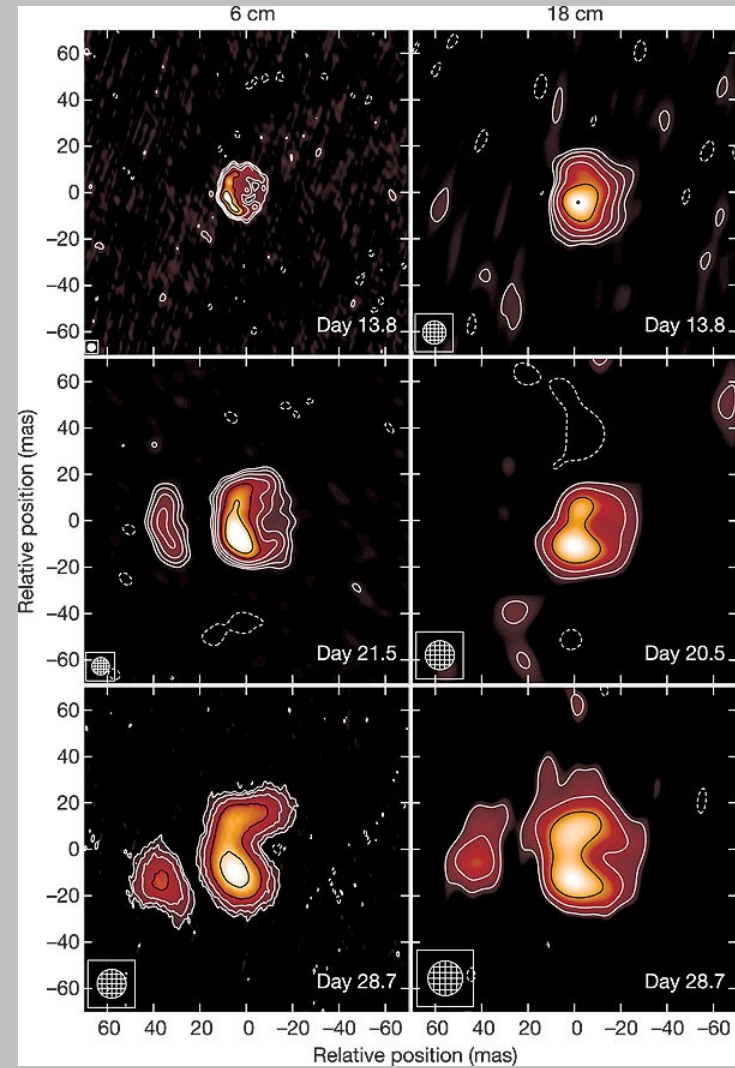
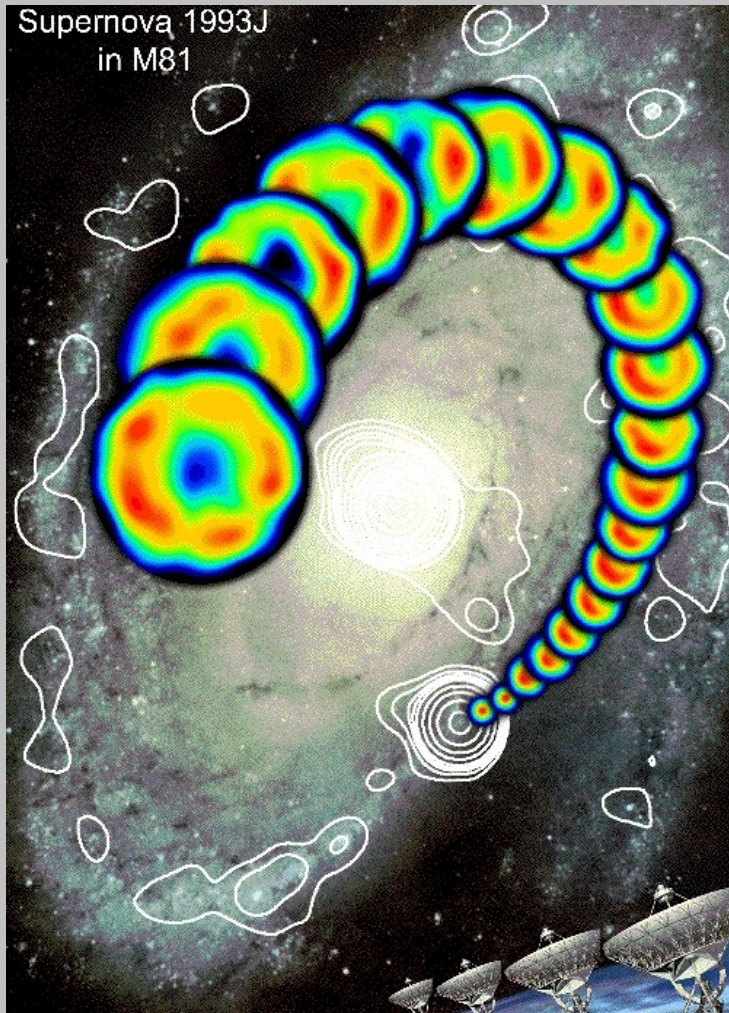


PKS 2356-61



Astrofizyka a interferometria radiowa

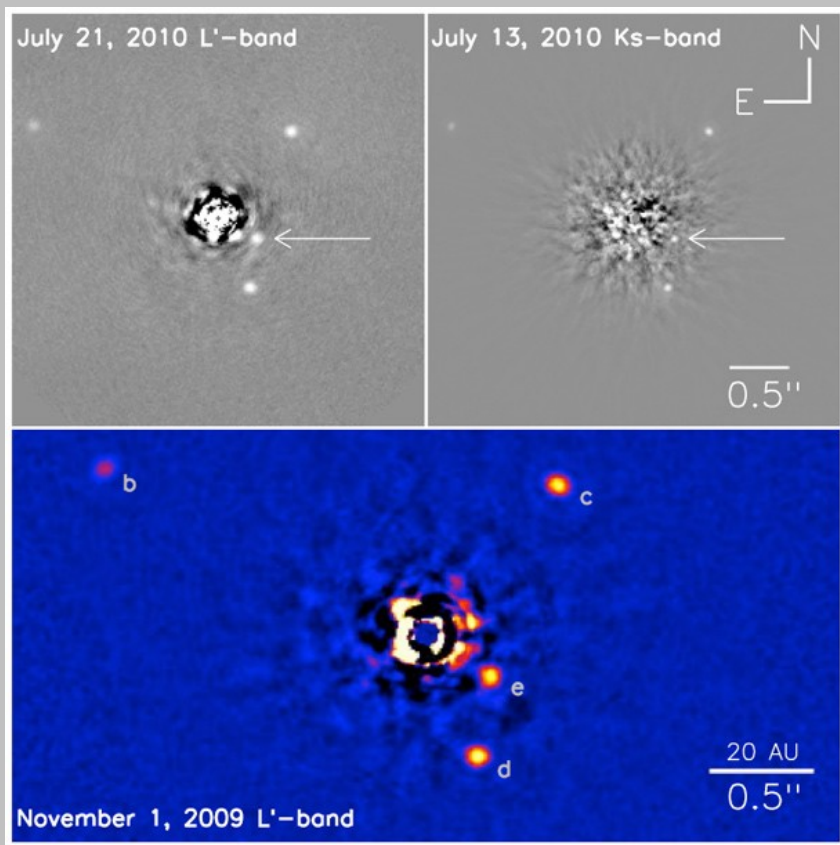
Supernowe i nowe



Astrofizyka a interferometria radiowa

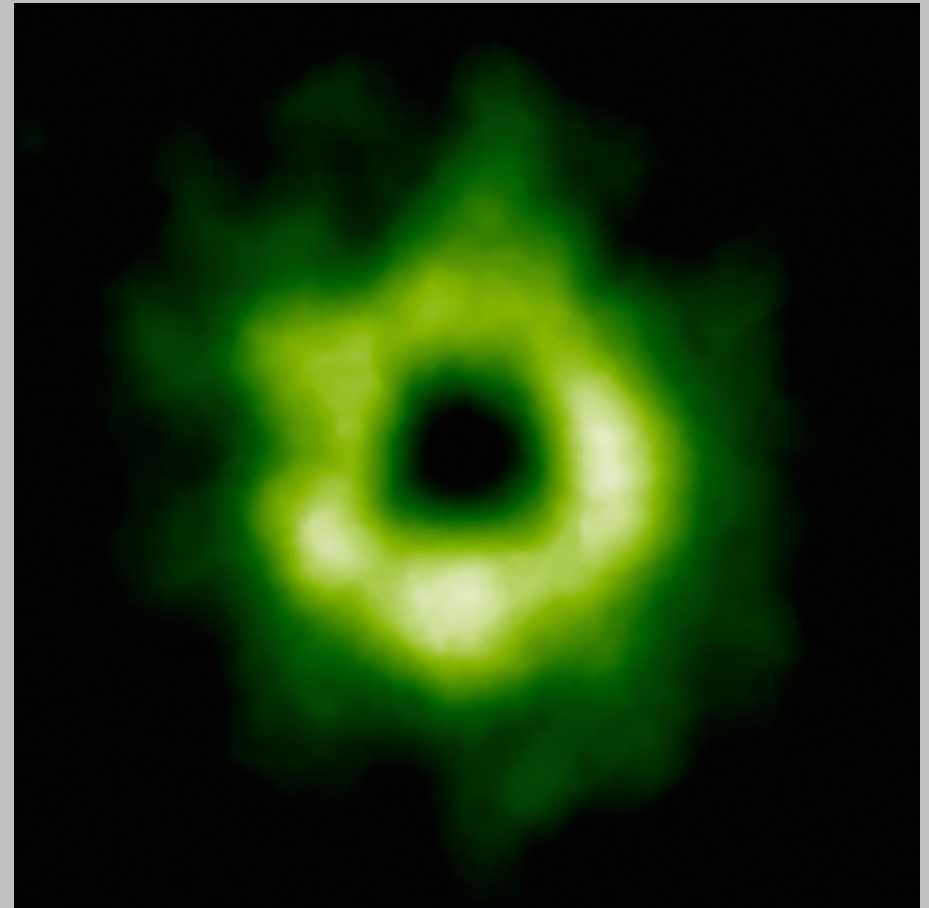
Exoplanety i dyski protoplanetarne

HR8799

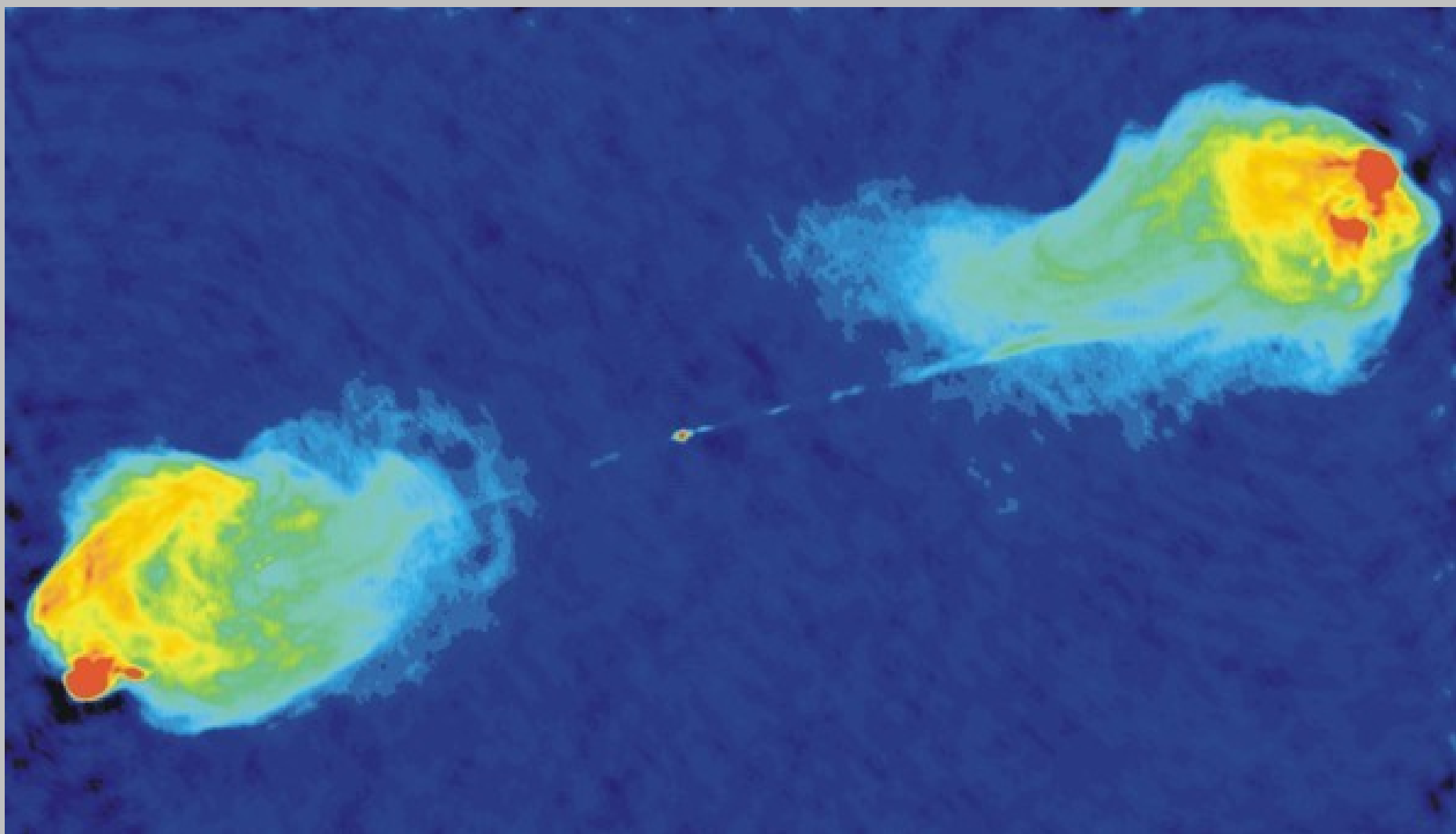


Na razie tylko optyczny ...

TW Hya



ALMA



Dziękuję za uwagę

