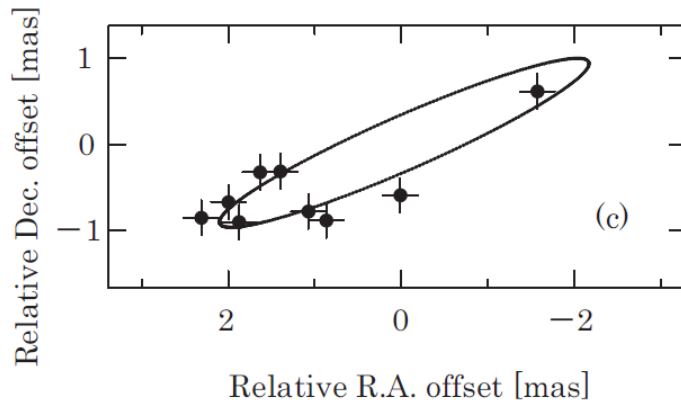


VERAを用いた晩期型星の 周期光度関係の解明

Semiregular variable “S Crateris” の年周視差計測



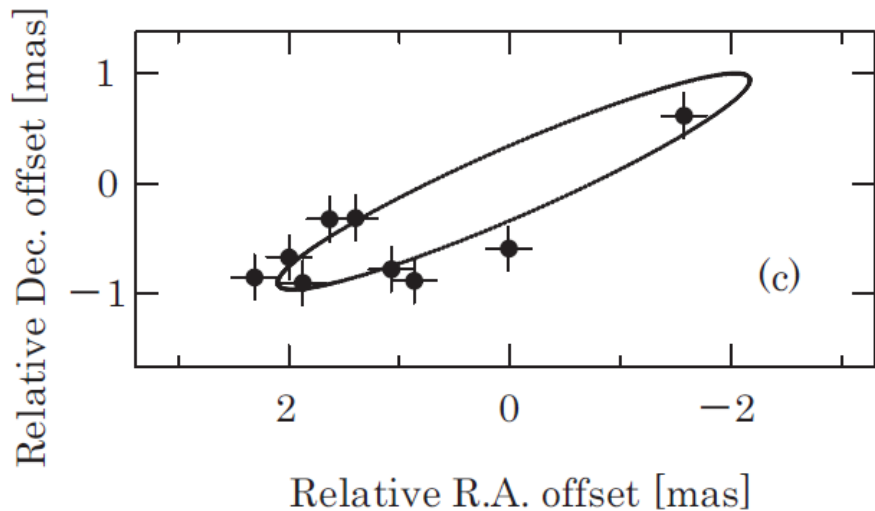
中川亜紀治、面高俊宏、柴田克典、倉山智春、今井裕、
亀野誠二、松本尚子、松井真、丹生大輔

鹿児島大学、国立天文台VERA水沢観測所

得られ始めた晩期型星の年周視差

1~2年の観測を実施

S Crt
(Semiregular)

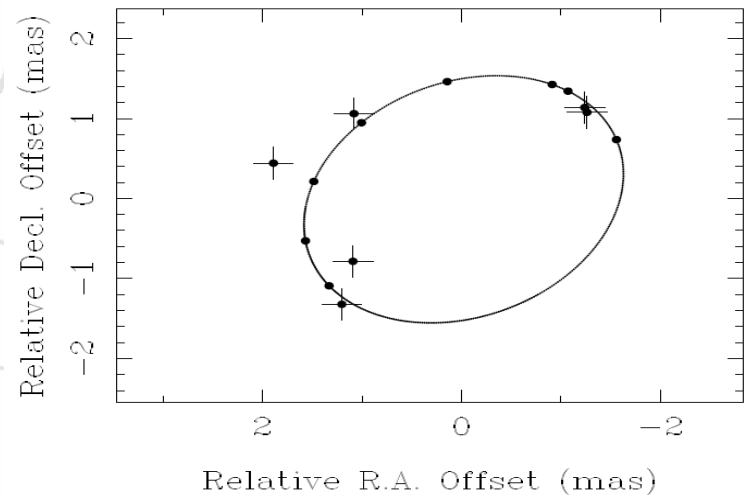


Parallax = 2.33 ± 0.13 mas



Distance = 430^{+25}_{-23} pc

R UMa
(Mira)



Parallax = 1.73 ± 0.16 mas

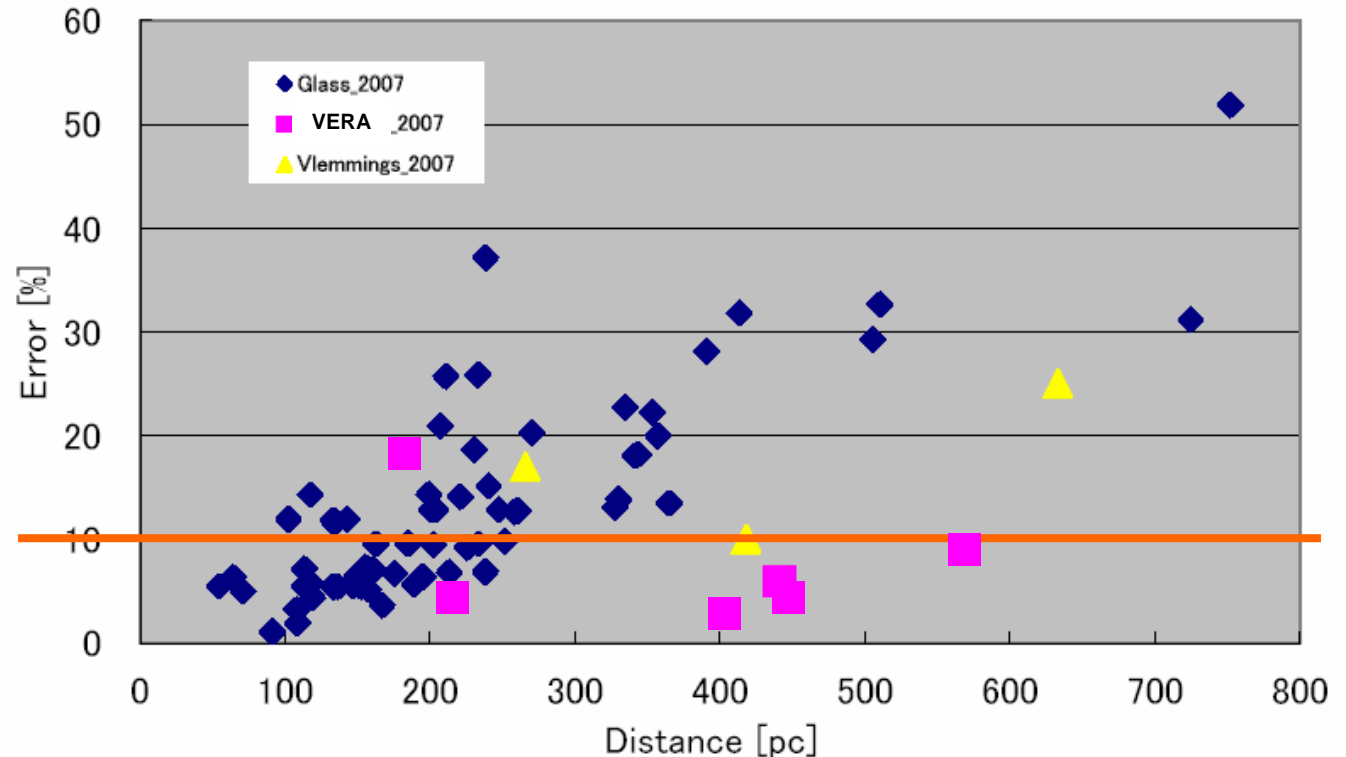


Distance = 577^{+58}_{-49} pc

距離vs誤差 (年周視差計測)

- 年周視差を用いた天体の距離決定
 - ◆ Glass et al 2007 : Revised Hipparcos
 - ▲ Vlemmings et al 2007 : VLBA (OHメーザー)
 - ■ VERA Project : VERA (主に水メーザー)

Distance vs Error



天体の距離
と誤差

10%



晩期型星
プロジェクト観測

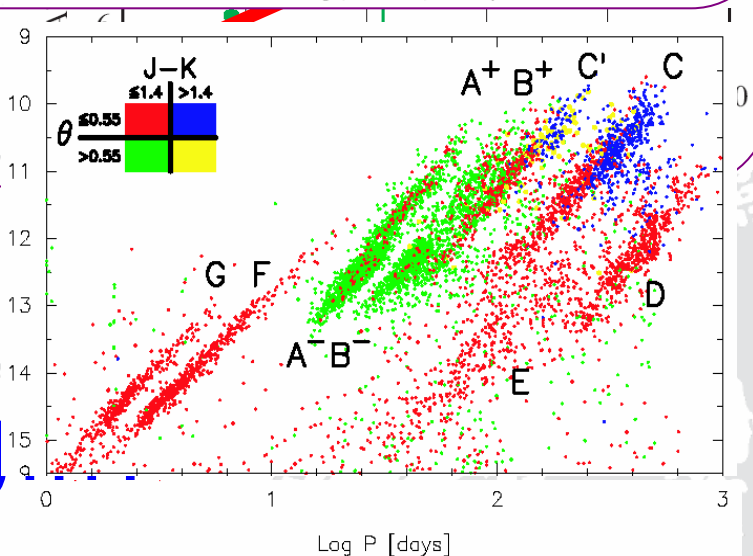
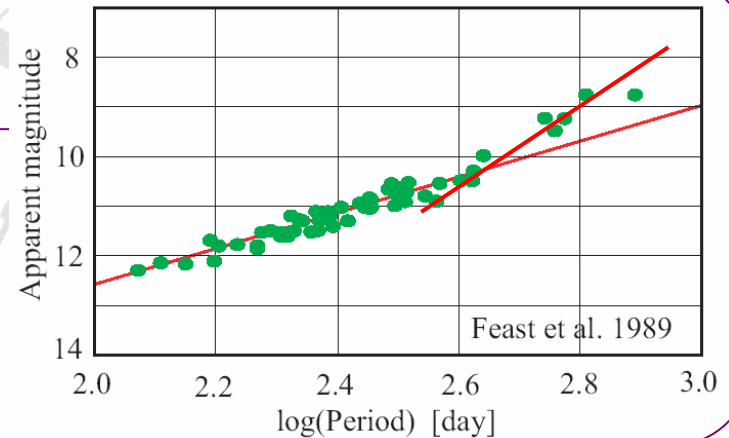


銀河系での周期光度関係

大マゼラン雲のミラ型変光星
の周期光度関係

銀河系内ミラ型の周期光度関係

- 実視等級を利用
- 周期420日での傾きの変化も見られる
- Hipparcosによる年周視差計測結果から絶対等級を決定
- 距離の誤差が大きい
- 周期光度関係がよく決まらない



→ VERAで絶対等級の
→ 距離指標としての有

AGB星

- ミラ型とSemiregular型
- GCVS (General catalog of variable stars) の分類
 - ミラ型(M)----- $\Delta V > 2.5 \text{ mag}$. P:80~1000d 周期性明瞭
 - 半規則型(SR)-- $\Delta V < 2.5 \text{ mag}$. P:20~2000d 周期性不明瞭
- SRa(規則的)
- SRb(SRaほど規則的ではない),
- SRc、SRd...
- GCVS分類は、天体の進化段階と、整合性無し。
SRVはミラより進化の前段にある？

周期光度関係 in LMC

- Feast et al. 1989, MNRAS 241, 375
- PL図(K-band等級/bolometric等級)
- LMC-49+6星
(O-rich 29+6/C-rich 20)
- P: 100~420day
- P>420dayのO-Mira 6星は、PLRに乗らない。

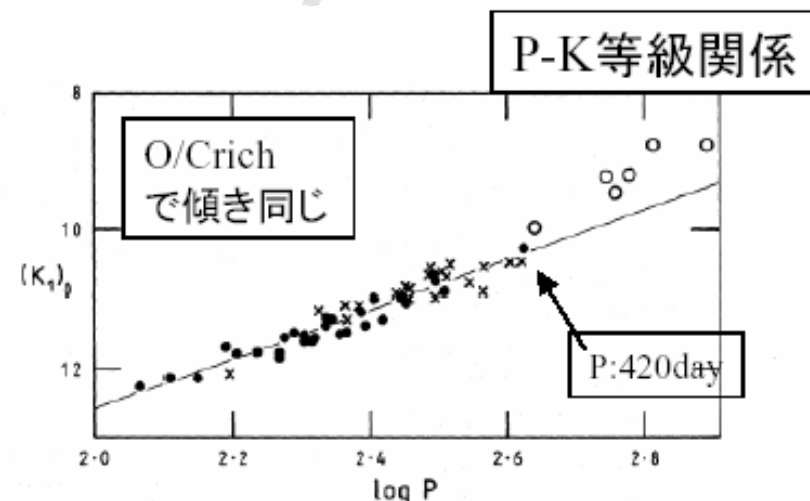


Figure 1. Period-luminosity relation at K: filled circles = O-Miras ($P < 420$ d); open circles = O-Miras ($P > 420$ d); crosses = C-Miras. The line is the least-squares fit to the O and C-Miras with $P < 420$ d.

- データ79星(884測光点)、その内、Pがよく決められた55星を使う。
 - K等級は、最大値と最小値の平均。
 - mb(JHKでblack bodyをfit)は、Fourier fitで導出。

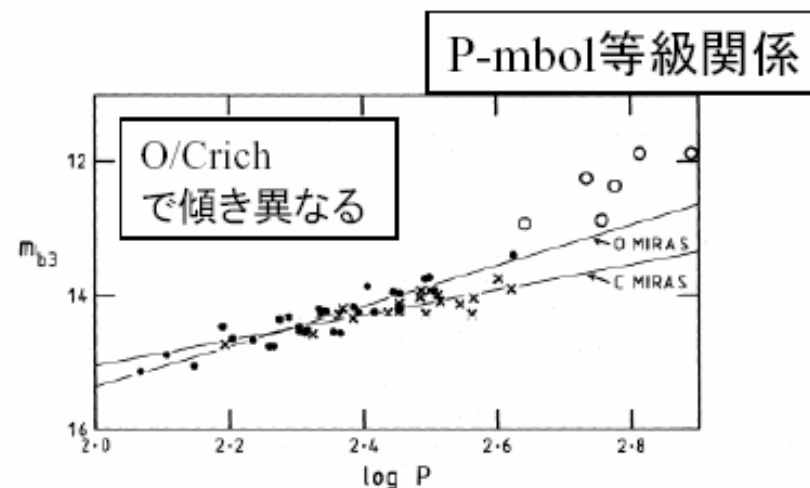


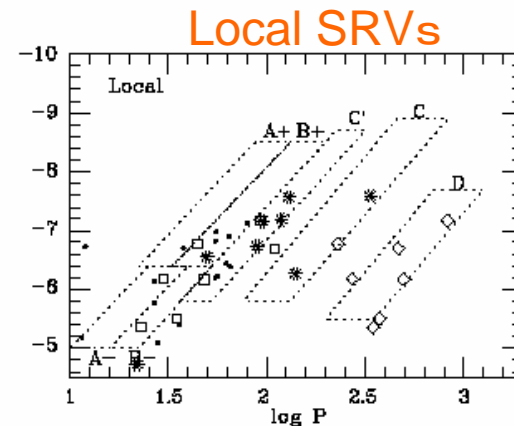
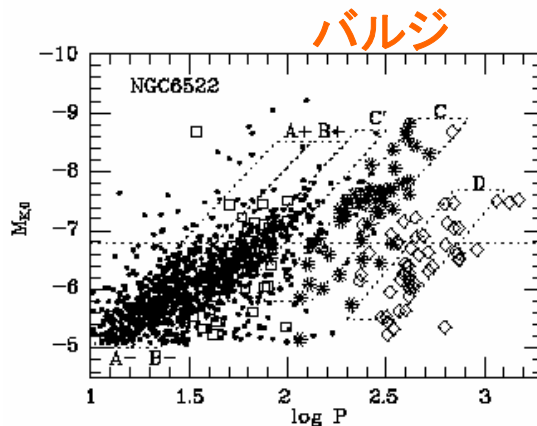
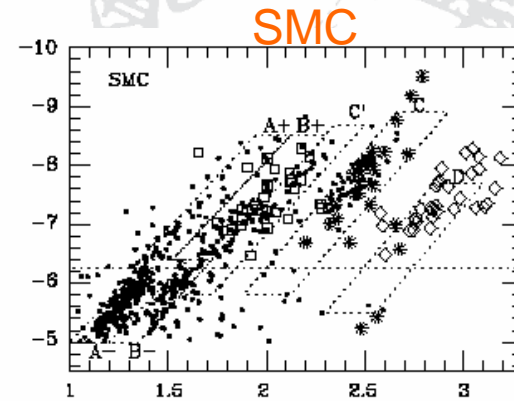
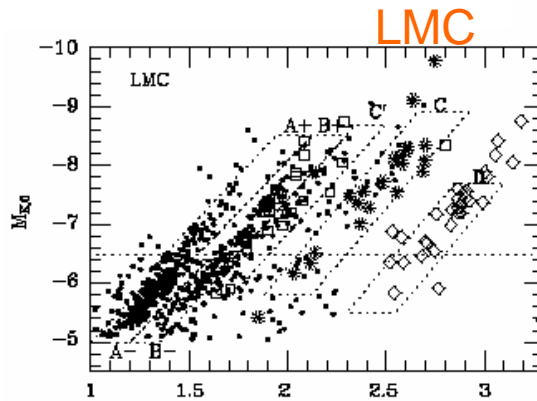
Figure 2. Period-luminosity relations in m_{b3} . Symbols as in Fig. 1. The lines are least-squares fits to the O-Miras ($P < 420$ d) and to the C-Miras.

最近の研究 銀河系での周期光度関係

<銀河系内の変光星>

Glass et al 2007:

Mk-LogP sequences of local SRVs using revised Hipparcos parallax.



最近の研究 銀河系での周期光度関係

<Recent study - Local variable stars>

- Mk-LogP sequences of local SRVs using revised Hipparcos catalogue (Glass et al 2007)
- Mk-LogP sequences of local AGB stars using parallax measured with VLBA (Vlemmings et al 2007)

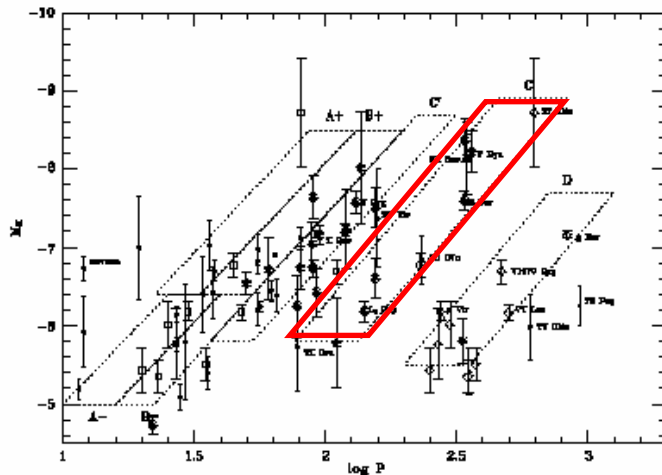


Figure 2. K_s , $\log P$ diagram for local M giants with parallaxes greater than 3 times the probable error. The positions of the LM sequence as dotted boxes and the positions of the AGB stars as boxes (short periods) and diamonds (long-periods).

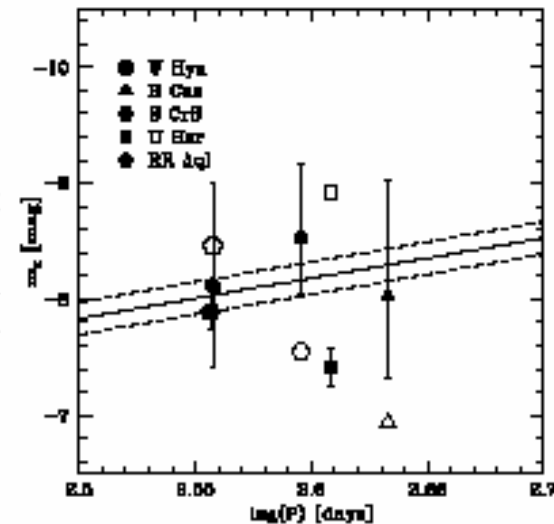


Fig.4. Period vs. K_s magnitudes for the OH maser stars with VLBA interferometric distances including those from 1993. The solid line is the P-L relation determined by Whitelock & Feast (2000) on the oxygen rich Mira stars observed with Hipparcos, the dashed lines are the spread in the relation due to the error in the P-L relation zero-point.

VERAによる観測

- ・ Fundamental modeで変光するミラ型変光星の年周視差を決定し、絶対等級を求める
 - ・ 観測天体の周期が均等に分布するような天体選択

年周視差の計測

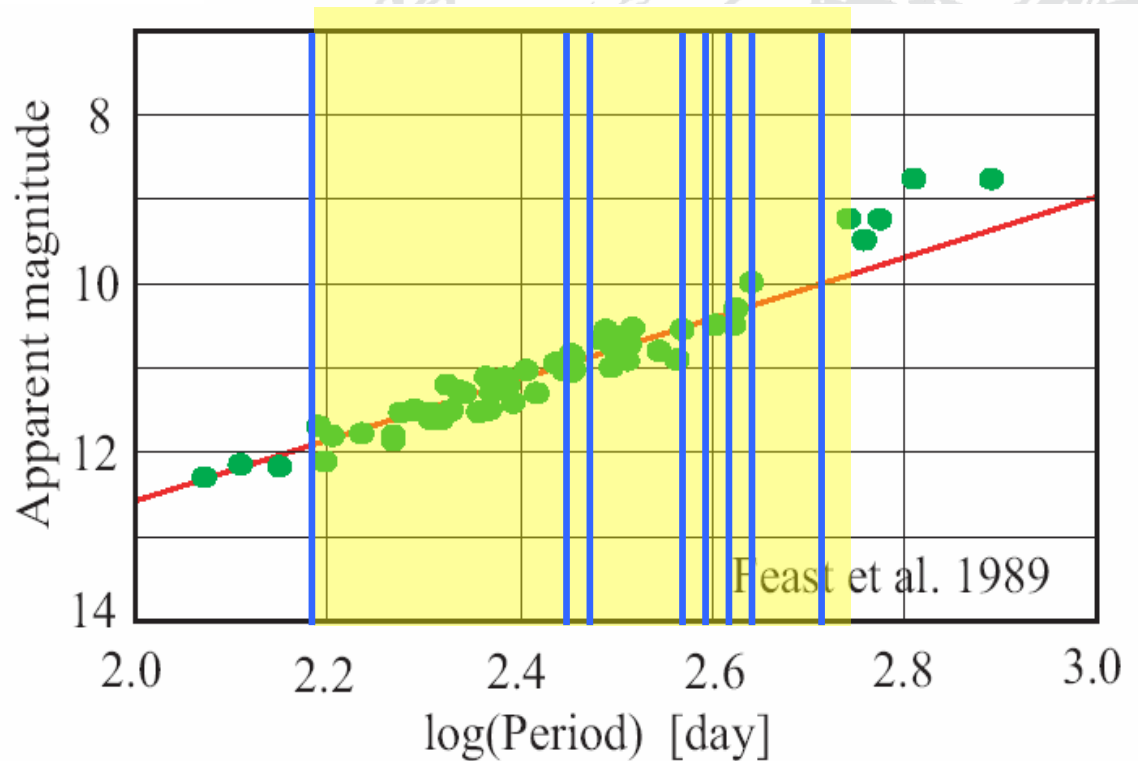
- ・ S Crt
- ・ R UMa

位相補償イメージングの成功

- ・ WX Psc、T Lep、
W Hya、SY Scl

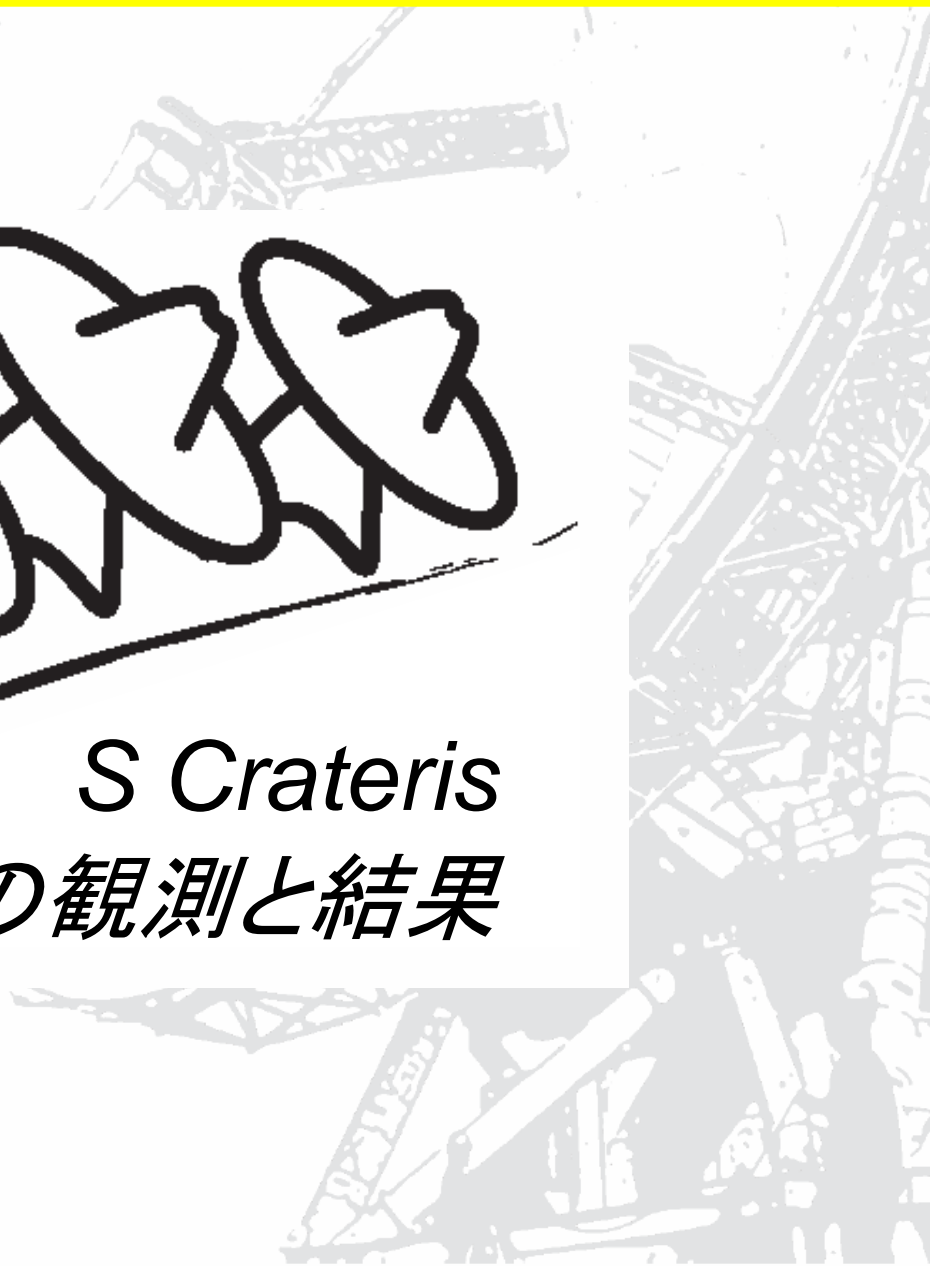
解析中

- ・ AP Lyn

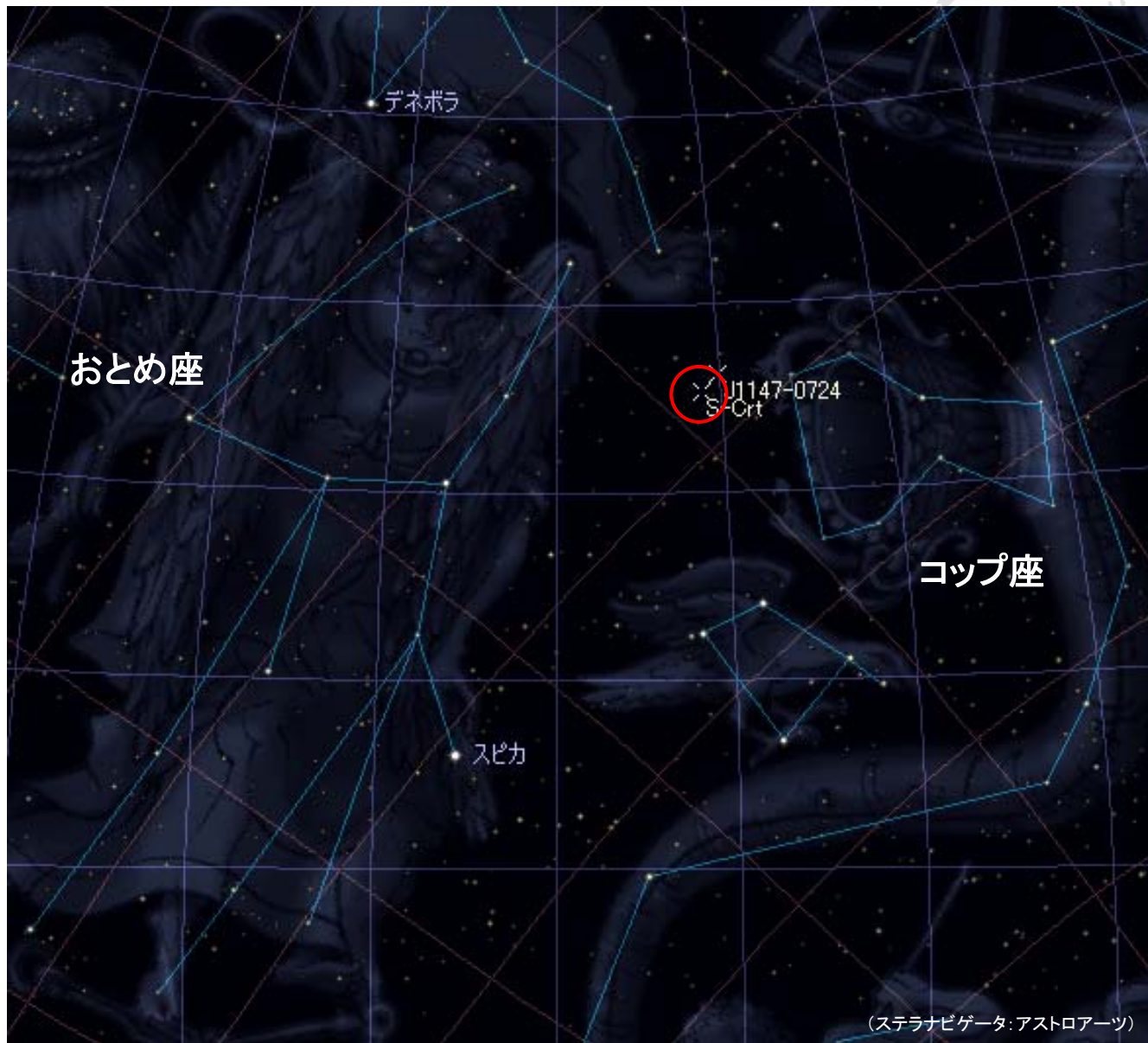




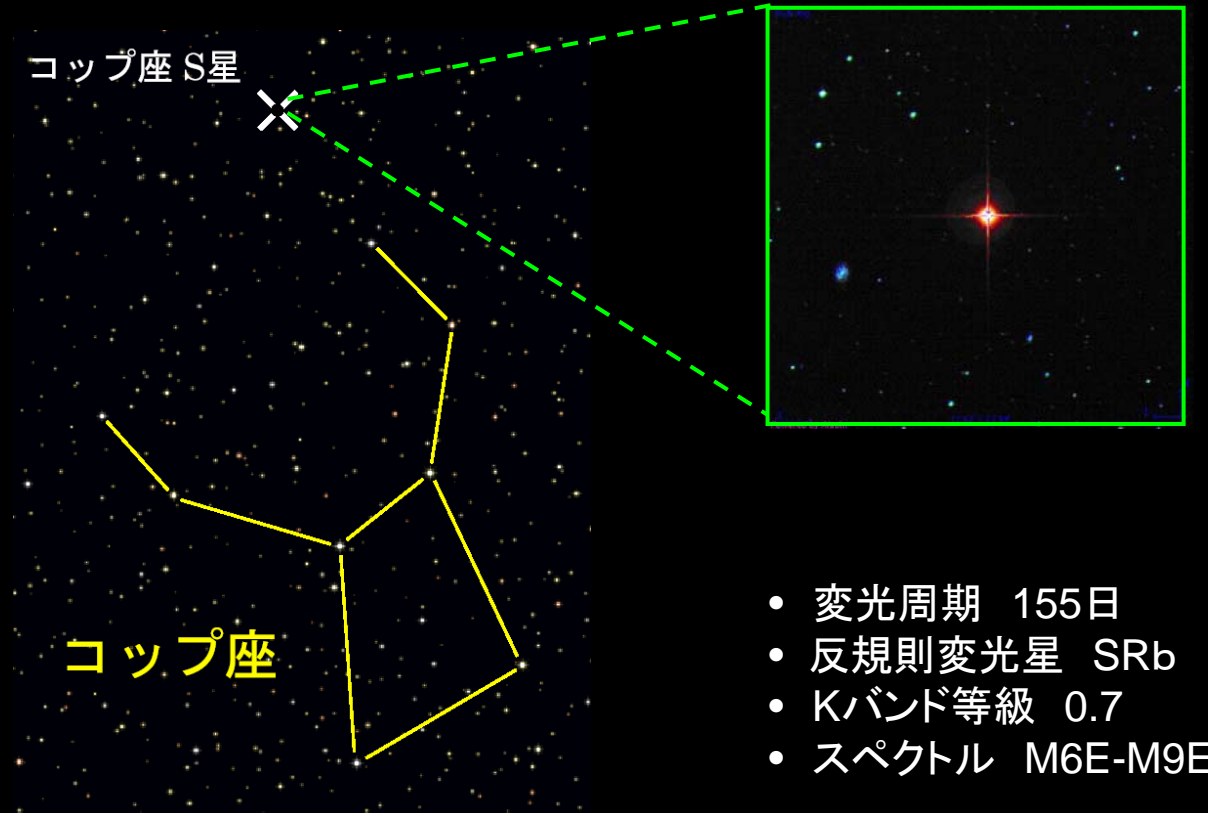
S Crateris
の観測と結果



SRV S Crateris (S Crt)

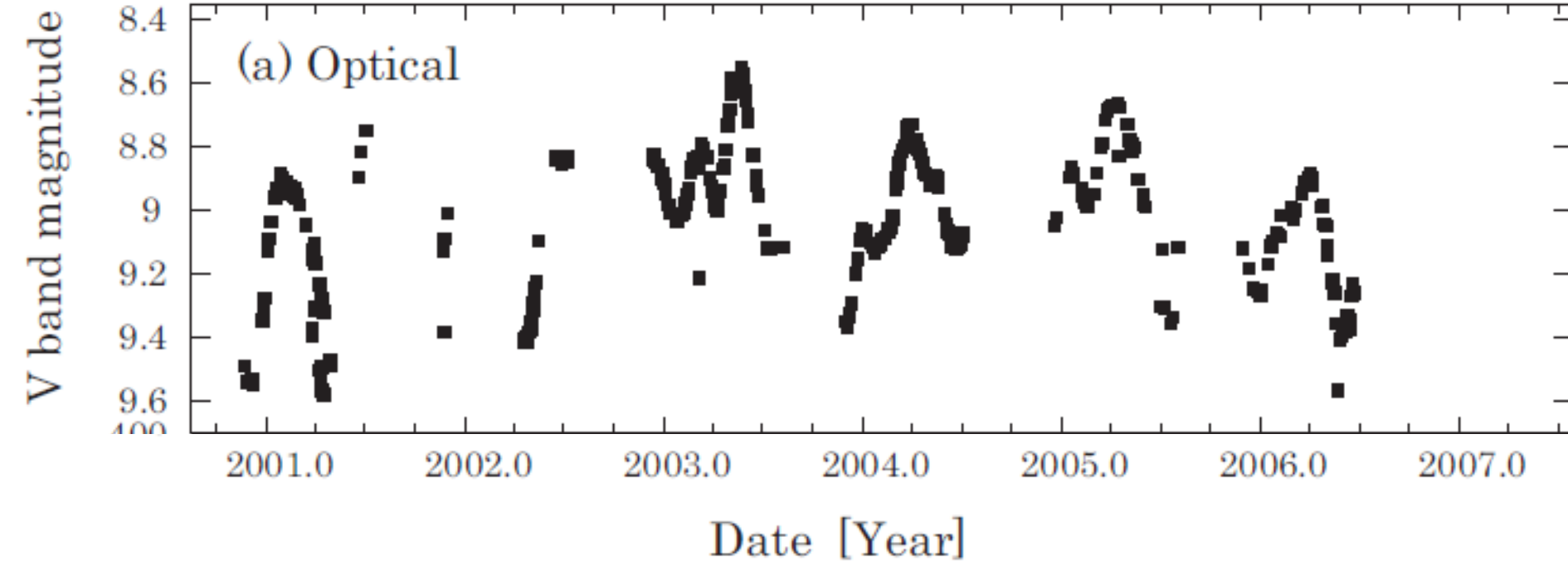


SRV S Crateris (S Crt)



- 変光周期 155日
- 反規則変光星 SRb
- Kバンド等級 0.7
- スペクトル M6E-M9E

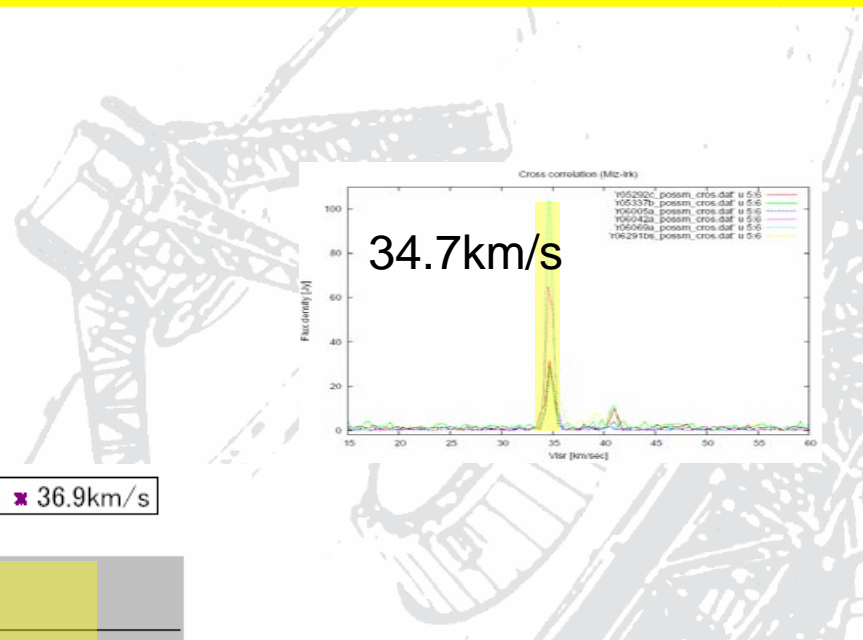
SRV S Crateris (S Crt)



- First over-tone pulsation mode.
- 変光周期 = 155日
- $\Delta m_K = 0.8$ mag

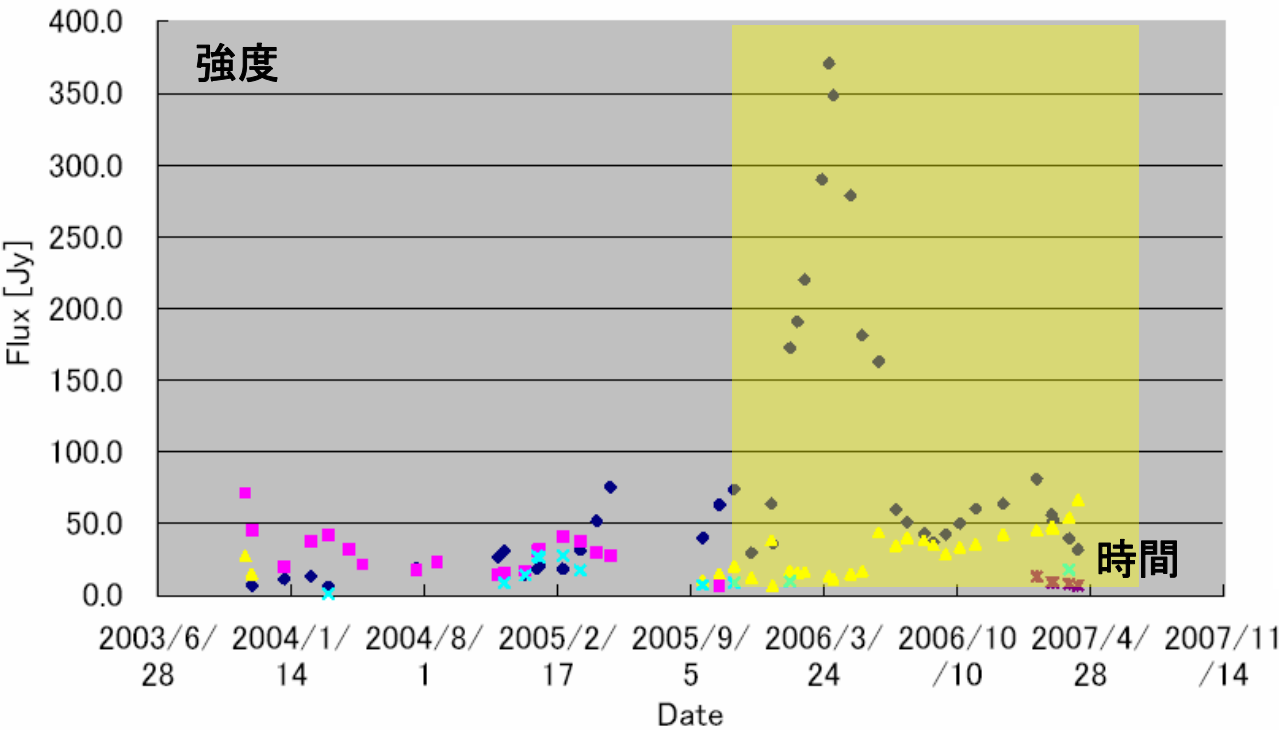
S Crtの観測、解析

- 22GHz 水メーザー、Dual beam観測
- 1つの参照電波源
- 1.6年のモニター観測 (1観測/月)
- 34.7km/sの速度成分を利用
- AIPSを利用
- 各種補正テーブルを外部で



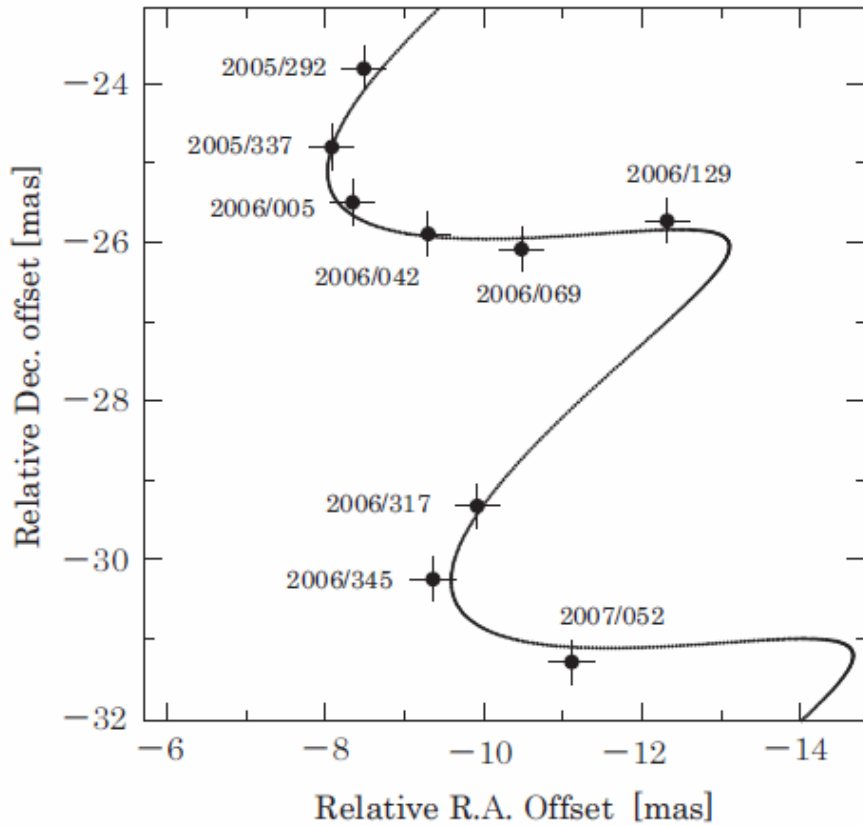
単一鏡観測FLUX(速度別)

◆ 34.7km/s ■ 39.5km/s ▲ 40.0km/s × 38.5km/s ✖ 36.9km/s

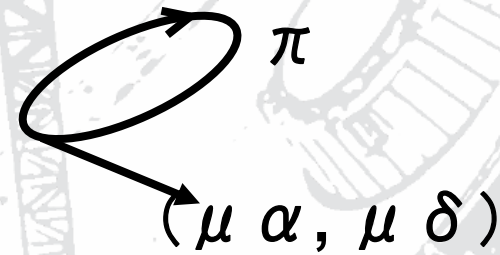


Epoch	Date	DOY	Flag
1	2005 October 19	292	1
2	2005 December 3	337	1
3	2006 January 5	005	1
4	2006 February 11	042	1
5	2006 March 10	069	1
6	2006 May 9	129	1
7	2006 November 13	317	1
8	2006 December 11	345	1
9	2007 January 13	013	0
10	2007 February 21	052	1
11	2007 April 06	096	0
12	2007 May 10	130	0

年周視差の推定



- 観測量と年周視差
 $(\alpha, \delta) \rightarrow \pi, \mu_\alpha, \mu_\delta$



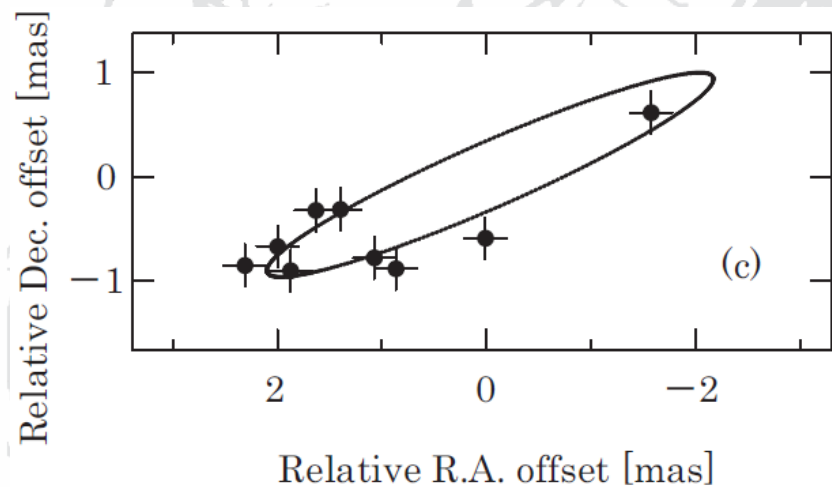
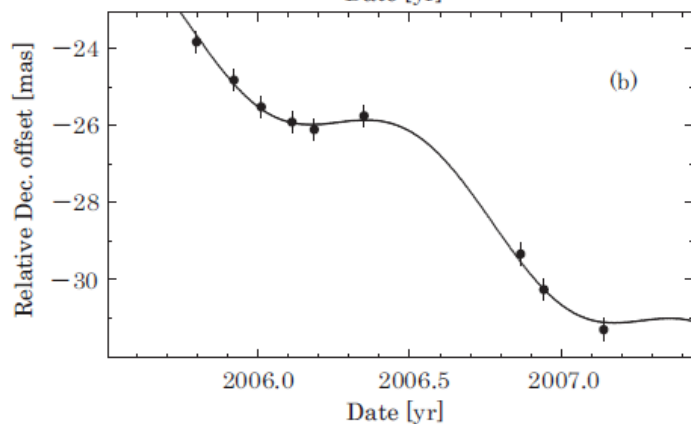
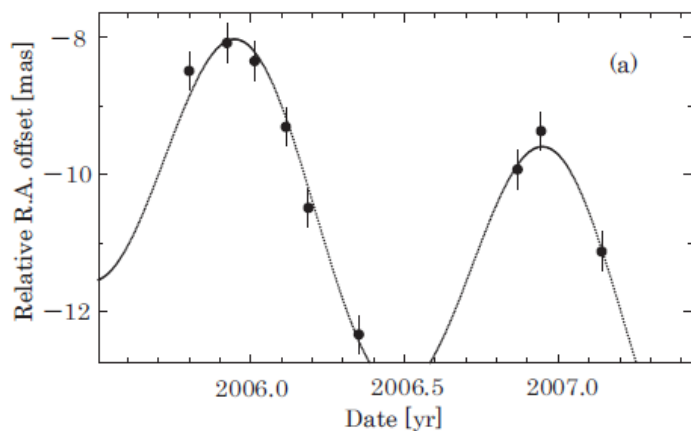
$$\Delta \alpha \cos \delta = \pi r (\sin l \cos \alpha \cos \epsilon - \cos l \sin \alpha)$$

$$\Delta \delta = \pi r (\cos \delta \sin \epsilon - \sin \delta \cos \epsilon \sin \alpha) \times \sin l - \pi r \sin \delta \cos \alpha \cos l$$

α : Right Ascension of the source, δ : Declination of the source, r : Radius vector of the sun
 l : Celestial longitude of the sun, ϵ : Obliquity of the ecliptic, g : Mean anomaly of the sun

S Crtの年周視差、距離

- Parallax = 2.33 ± 0.13 mas (6%)
→ Distance = 430^{+25}_{-23} pc



S Crt (メーザースポット)の絶対座標

Absolute coordinate		μ_X	μ_Y
R.A.	Dec.	(mas yr ⁻¹)	(mas yr ⁻¹)
11 h 52 m 44.96969 s	-07 d 35' 48.0958"	-1.56 ± 0.22	-5.16 ± 0.22

内部運動 (expansion) を考慮すると...

絶対運動がHIPPARCOSの結果と食い違う

VERA

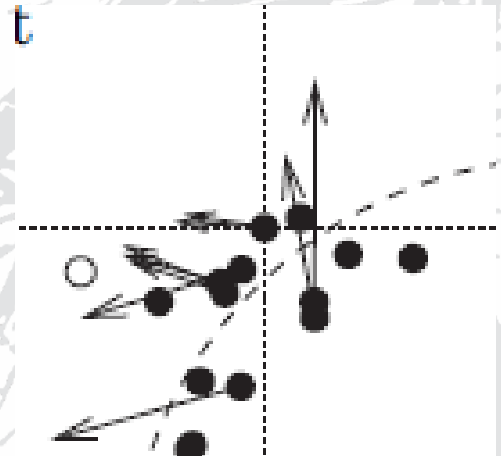
(-3.17±0.22, -5.41±0.22) mas/yr

HIPPARCOS

(-4.28±1.32, -3.66±1.02) mas/yr

RA方向はエラー内で一致。

Dec方向は不一致 → スポットの運動



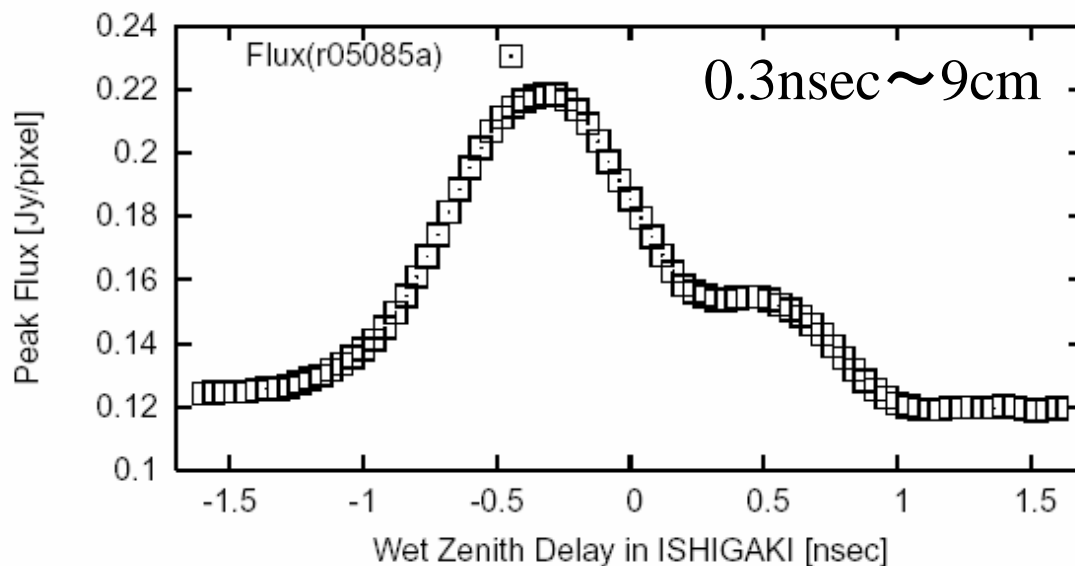
絶対位置の誤差推定

天頂での水蒸気オフセット成分が L_0 [cm]

大気誤差 ΔL を試行的に振る
($-15\text{cm} \sim +15\text{cm}$)

典型的に $l_0 = 3$ [cm]

大気



絶対位置の誤差推定

- 2つの要因を考慮

- ①天頂大気遅延残差 $l_0 = 3\text{cm}$

- GPSによる測定値に乘るオフセット

- ②基線長誤差 ①の1/10の寄与

- 測地観測から得られている誤差

$$\Delta \text{SecZ effect estimation : } \Delta l = l_0 \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{1}{\cos Z} \right) \theta$$
$$\sigma_Z = \theta_b \times \frac{\Delta l}{\lambda_{H_2O}}$$

$$\text{Baseline error estimation : } \sigma_D = \sigma_Z \times 1/10$$

Z: Source zenith angle
 θ : Pair separation angle
 l_0 : Assumed delay residual
 λ_{H_2O} : Wave length of H₂O maser

S Crt 観測

$$\text{位置の誤差} = \sqrt{(\sigma_Z^2 + \sigma_D^2)} = 281 \mu \text{ asec}$$

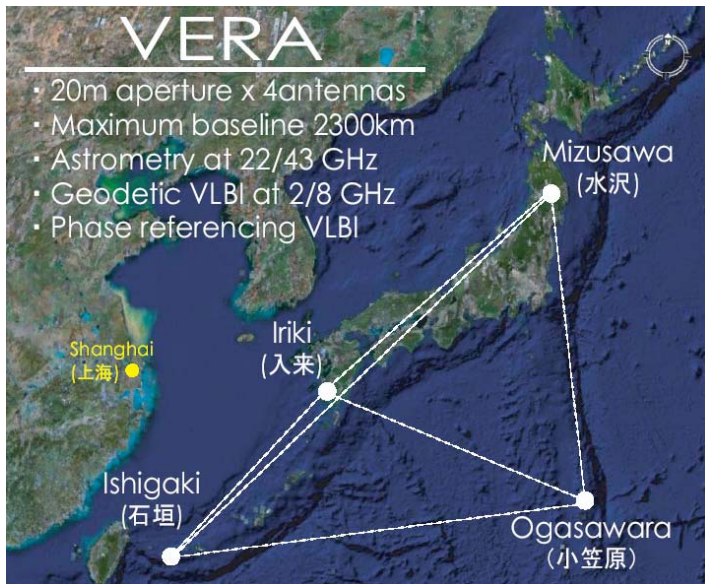


位置天文の
結果から導く天体の属性

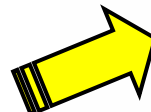
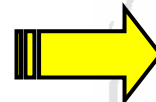
位置天文から星の属性へ

最終目標： 周期光度関係の傾き、ゼロ点の決定

位置天文観測



視差、距離



他波長の観測データ
IRAS, 2MASS

星の属性



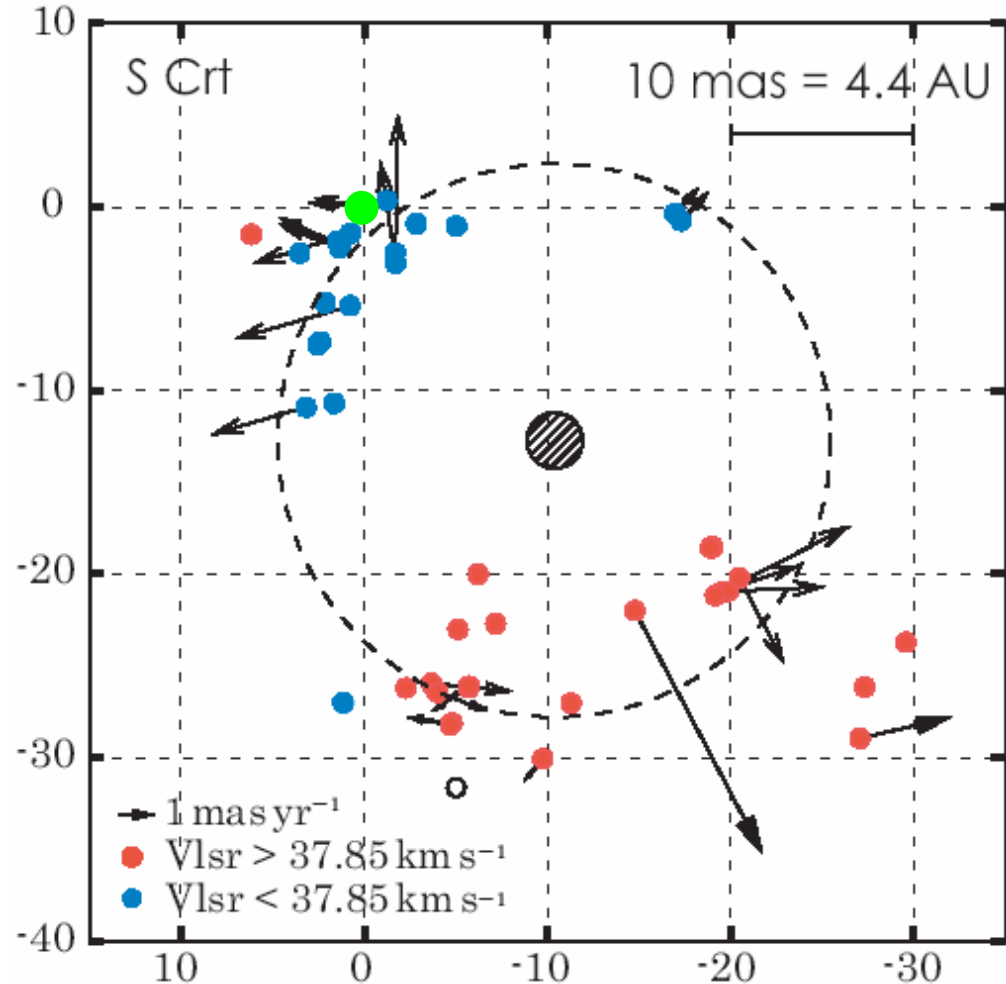
リング状分布と運動

星周メーザー半径
15mas = 6.5AU

ミラ型変光星を含めた
AGB星一般の観測例
(>20AU)に比べて
コンパクトなサイズ

内部固有運動を得る際の
Offset運動

$$v_{x\text{offset}} = \overline{v_x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{xi}$$
$$v_{y\text{offset}} = \overline{v_y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{yi}$$



S Crt on M_K -LogP diagram

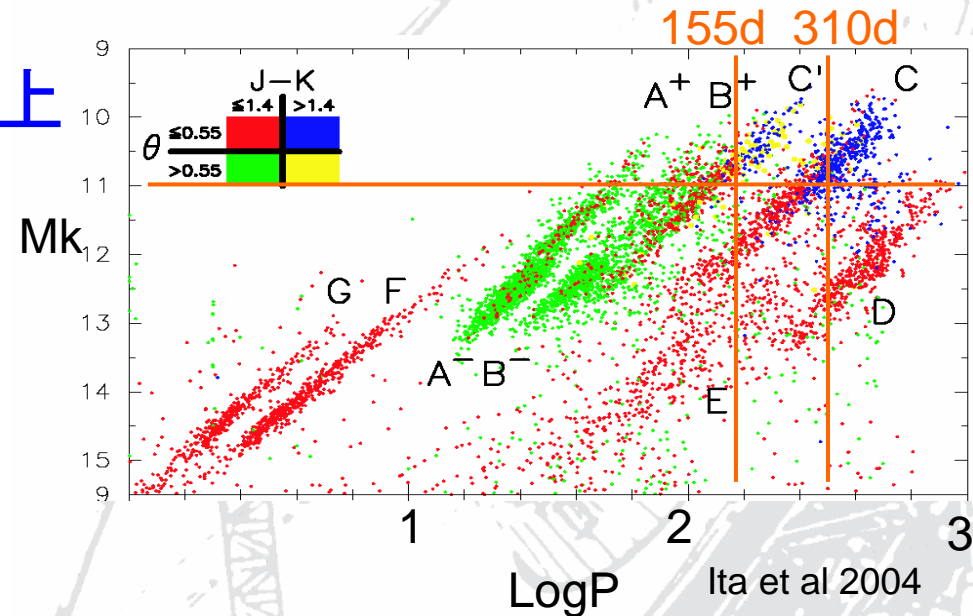
- M_K -LogP ダイアグラム上での S Crt の位置

- 実視等級 $m_k = 0.7$



絶対等級 $M_k = -7.5 \pm 0.1$

- Periods of **155** days and **310** (=155x2) days were used.
($\text{Log}[155\text{days}] = 2.19$, $\text{Log}[310\text{days}] = 2.49$)
- S Crt falls on the edges of sequences **C** and **C'**.



C : Mira variables
C' : 1st overtone Mira-like variables

S Craterisの物理パラメーター

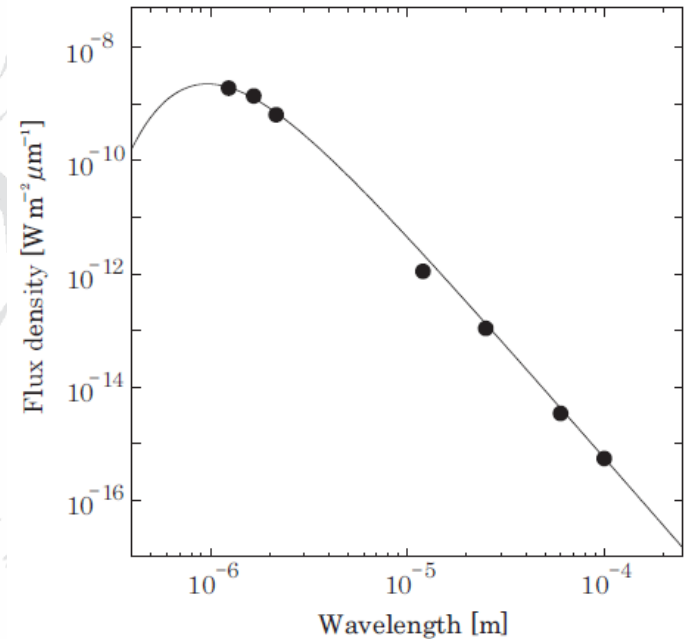
赤外線のFlux density を黒体近似



$$T = 3000 \pm 163 \text{K}$$



$$\begin{aligned} \text{光球の半径} &= 0.65 \text{AU} \\ &= 140 \text{太陽半径} \end{aligned}$$



R_m (AU)	R_{in} (AU)	R_{out} (AU)	R_* (AU)	R_m/R_*	R_*/R_\odot	L_* (W)	L_*/L_\odot	T_{BB} (K)
6.5	3.7	9.8	0.65	10	140	5.46×10^{29}	1430	3000 ± 163

ミラ型変光星に対して、高温、コンパクト

Fin

更にプロジェクト観測に
乗せる天体を選択中。

VLBI astrometry of semiregular variable S Crateris with VERA

晩期型星プロジェクト 1本目の論文を準備中

S Crt 距離の不定性と理由

絶対等級にばらつきがあるため距離もばらける

任意の周期光度関係を仮定する場合

- 絶対等級や距離は
 - 採用するモデル (PL sequences differ in each study)
 - 採用する変光周期 (fundamental or first overtone mode) に依存してしまう。
- S Crtでは
 - Distance 285pc, 420pc (difference of adopted PL relation)
 - 490pc (Hipparcos parallax, large error=50%)

周期光度関係 in LMC

- Feast et al. 1989, MNRAS 241, 375
- PL関係 $m_0 = \rho \log P + \delta$, で、fittingした結果 ↓

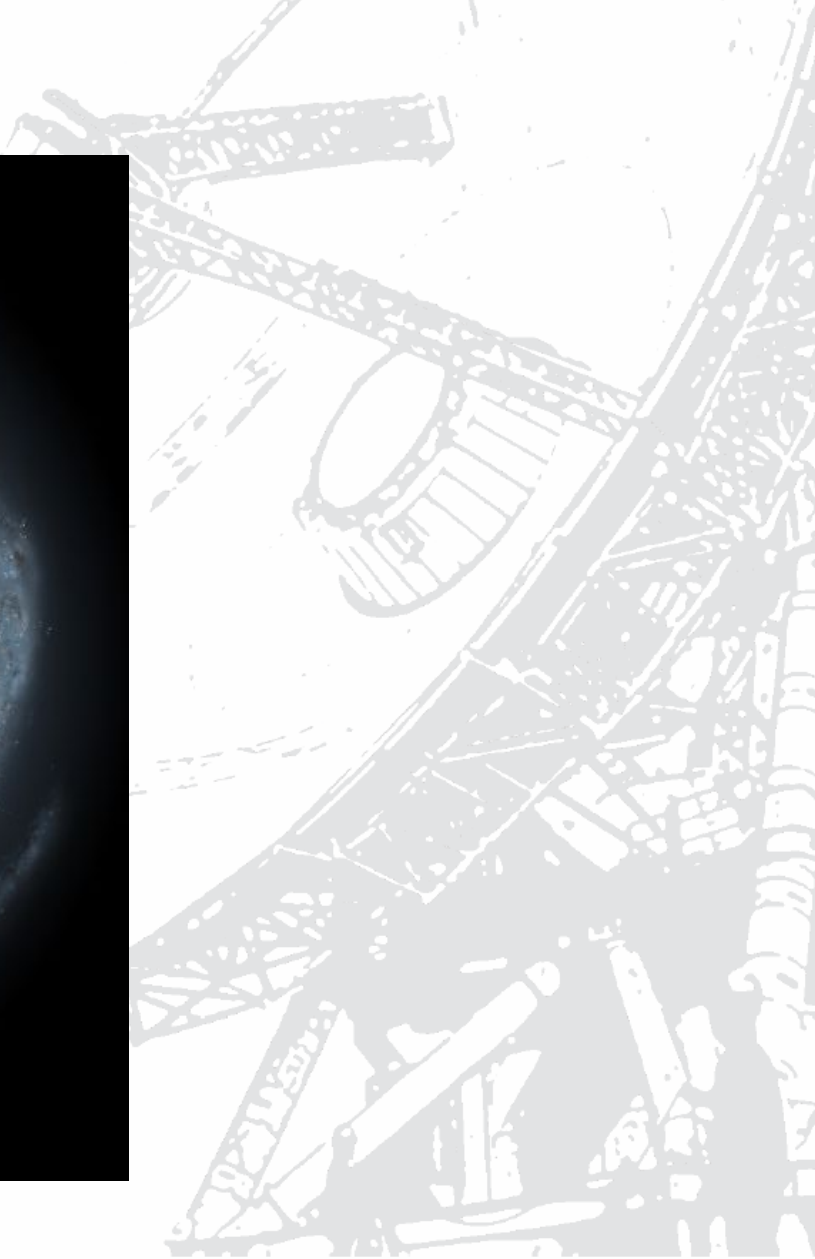
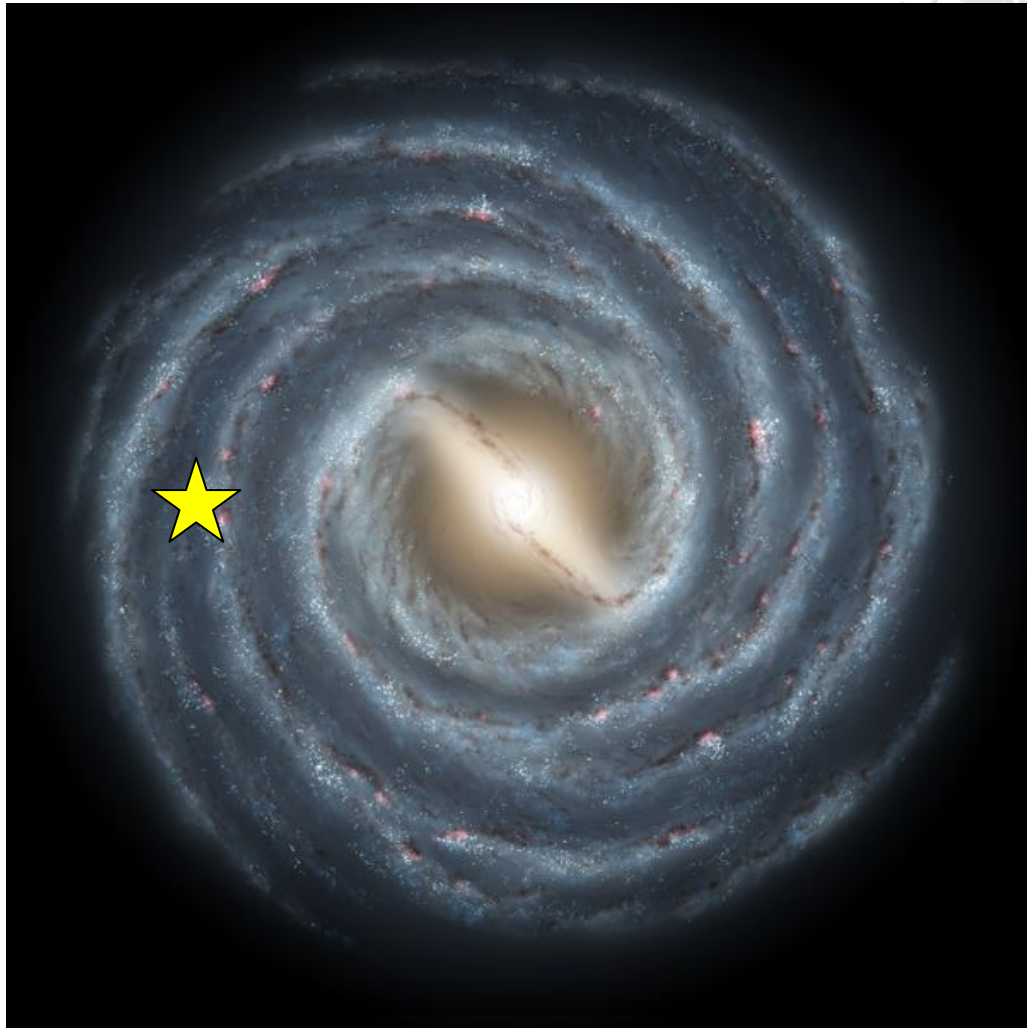
Table 2. Period–luminosity relations (equation 1).

Group	Mag	N	$\rho \pm \text{s.e.}$	$\delta \pm \text{s.e.}$	σ	Solution	
O-Miras	$(J_1)_0$	29	$-2.92 \pm .28$	$19.37 \pm .32$	0.19	1	J-PLR
C-Miras	$(J_1)_0$	20	$-0.19 \pm .83$	13.33 ± 2.05	0.37	2	
O-Miras	$(H_1)_0$	29	$-3.14 \pm .27$	$19.04 \pm .64$	0.18	3	H-PLR
C-Miras	$(H_1)_0$	20	$-1.72 \pm .63$	15.90 ± 1.56	0.28	4	
O-Miras	$(K_1)_0$	29	$-3.47 \pm .19$	$19.48 \pm .45$	0.13	5	K-PLR
C-Miras	$(K_1)_0$	20	$-3.30 \pm .40$	$18.98 \pm .98$	0.18	6	
All	$(K_1)_0$	49	$-3.57 \pm .16$	$19.70 \pm .39$	0.15	7	
O-Miras	m_{03}	29	$-3.00 \pm .24$	$21.35 \pm .57$	0.16	8	mbol-PLR
C-Miras	m_{03}	20	$-1.86 \pm .30$	$18.73 \pm .74$	0.13	9	
All	m_{03}	49	$-2.34 \pm .19$	$19.86 \pm .45$	0.17	10	

- K-PL関係は、O-Mira, C-Miraでよく一致。
- mbol-PL関係は、傾きが異なる。
- $P > 420$ dayのO-Miraは、PL関係の上にくる。

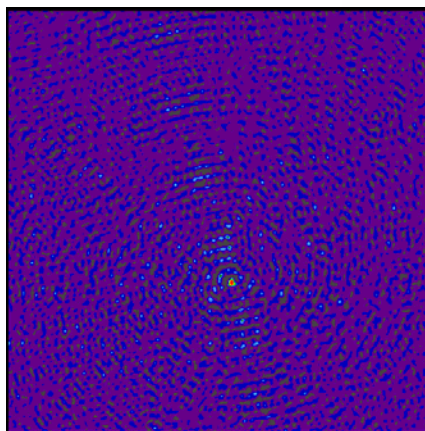
AGB段階の星

- 中小質量星(0.8~8太陽質量)
- 2度目の赤色巨星枝
 - (炭素・酸素の中心核; 水素・ヘリウムのdouble shell burning)
- TP-AGB: thermal pulsating -AGB (Miraはここ)
 - Thermal pulse: 数千年周期でHe燃焼層の暴走
 - 一部の質量範囲の天体は、C-rich (Carbon star)へ
(3rd dredge up: 対流層が発達)
 - 長周期脈動---脈動にともなう質量放出
(→星周メーザー)

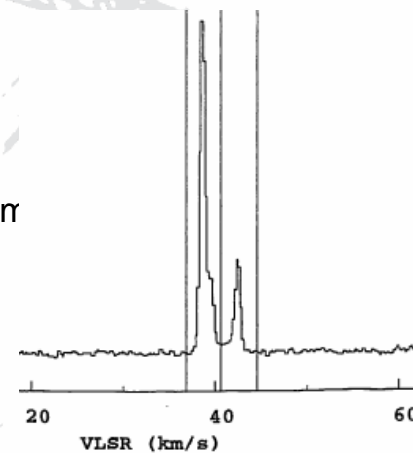


他の天体も解析中

- R Uma 約半年分の位相補償イメージが得られている
視差計測中



$V=39.44\text{km/s}$
 $\text{Flux}=4.8\text{Jy/bear}$



- WX Psc, SY Sclなどの位相補償イメージングにも成功