

VERAによるミラ型変光星の VLBI位置天文観

中川亜紀治、面高俊宏(鹿児島大学)、国立天文台VERAプロジェクト

ミラ型変光星の変光周期と明るさの関係(周期光度関係)が大マゼラン雲で発見されて久しい。この関係は天体の距離を推定する手法としても利用される。しかし大マゼラン雲の距離の不定性や金属量の違いなどから、この関係が天の川銀河のミラ型変光星に当てはまるとは限らない。

鹿児島大学では、天の川銀河内のミラ型変光星の周期光度関係を得るために国立天文台VERAプロジェクトと共同でミラ型変光星の位置天文観測を行っている。天の川銀河の変光星で周期光度関係を得るためには絶対等級(Mk)が必要である。星に付随する水メーザーをVERAによる相対VLBI(周波数帯は22 GHz)の手法で観測し、高精度な年周視差を得ることによって距離を決定し、この距離と見かけ等級からMkを求める。我々はこれまでもS Crt, SY Scl, RX Boo など複数の星の距離を計測しており、学会や論文(Nakagawa et al.(2008), Nyu et al.(2011), Kamezaki et al.(2012))で発表している。

QX Pupもこうした水メーザーを伴うミラ型変光星の一つであり、参照電波源J0737-1534を位置基準として2012年よりVLBI観測を開始した結果、年周視差は 0.351 ± 0.09 mas と計測された(preliminary)。しかし計測誤差はまだ大きく、距離 $D = 2.85 (+1.01, -0.59)$ kpcである。他の天体と同様に今後も観測を継続し、精度向上を図っている。

2

目的

周期光度関係 (Period-Luminosity Relation : PLR) の確立

図1はFeast et al. (1989)による大マゼラン雲(LMC)で観測されたミラ型変光星の周期光度関係である。縦軸は見かけの等級であり、LMCに分布する星までの距離を同一として扱っている。LMCの距離を既知とすることで、変光星の見かけの明るさと変光周期の2つの観測量から距離を算出することができ、距離推定のツールとして利用できる。図2は天の川銀河のミラ型変光星に対する同様の関係であり、縦軸には絶対等級が採用される。しかし、星までの距離の精度不足から絶対等級には大きな誤差が残り、信頼できるPLRが得られているとは言い難い。そこで我々はVERAによる位置天文観測で得られる高精度の距離から絶対等級を求め、天の川銀河のPLR構築を目指す。

PLR of LMC Miras

- Based on apparent magnitudes

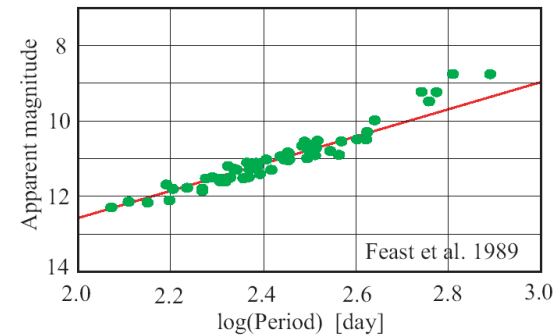


図1

PLR of the Galactic Miras

- Absolute magnitude obtained with Hipparcos data
- Large error of absolute magnitudes

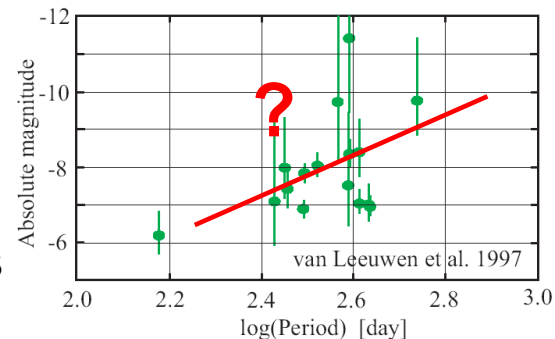


図2

3

観測：天体の選定

ミラ型変光星の質量は1~8太陽質量で、星の進化末期の質量放出が激しい時期にあたると考えられており、星周に存在する水分子によるメーザーが多く検出されている。我々の観測対象となる水メーザーを伴う星が示す周期と、Feast et al. 2000による光学観測から同定されたミラ型変光星(約800天体)の周期を比べると、その分布にはやや違いがあることが分かる。

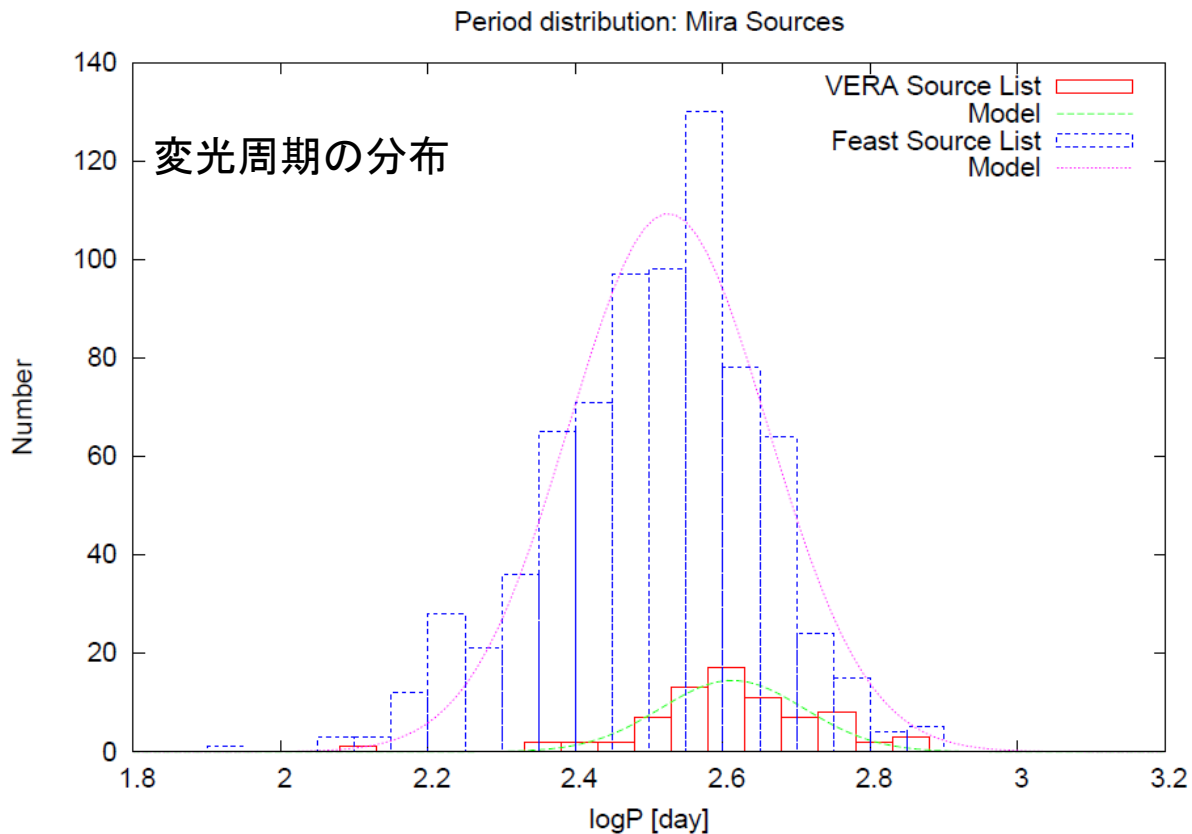


図3: 変光周期分布のヒストグラム. 青色の破線はFeast et al. (2000)によるおよそ800個のミラ型変光星, 赤の実線は我々が観測候補とするおよそ80個の水メーザーを伴うミラ型変光星の周期分布ヒストグラム。破線はその分布をガウス関数でフィットしたもの。分布の中心はやや異なり、我々が観測対象とする星の変光周期はやや長い。

4

観測： 天体の選定

水メーザーの強度監視を行いながら選定した天体を右に示す。天体にはミラ型変光星とセミレギュラーが含まれている。

またVERA入来局で行った水メーザーの強度監視から得られたスペクトルを図4、図5に示した。

Src.Name	R.A.	Dec.	Observation	Period[day]	
ミラ型変光星	SY Scl	00:07:36.2000	-25:29:40.000	2006年10月～2008年10月	415
WX Psc	01:06:25.8998	+12:35:53.000	2006年10月～2009年8月	660	
R Tau	04:28:18.0000	+10:09:44.798	2013年2月～	321	
T Lep	05:04:50.7999	-21:54:16.500	2004年2月～2006年8月	368	
BW Cam	05:19:52.5600	+63:15:55.798	2012年2月～		
BX Cam	05:46:44.2999	+69:58:24.199	2012年2月～	454	
U Ori	05:55:49.2000	+20:10:30.699	2012年2月～	368	
AP Lyn	06:34:33.8999	+60:56:26.199	2005年10月～2007年9月	450	
U Lyn	06:40:46.5000	+59:52:01.600	2009年12月～2011年12月	434	
GX Mon	06:52:46.8999	+08:25:19.000	2008年11月～2009年9月	527	
Z Pup	07:32:38.1000	-20:39:29.199	2008年2月～2010年5月	508	
OZ Gem	07:33:57.7500	+30:30:37.798	2013年2月～		
QX Pup	07:42:16.8298	-14:42:52.100	2012年2月～		
R Cnc	08:16:33.7999	+11:43:34.500	2011年4月～	362	
X Hya	09:35:30.3000	-14:41:28.600	2010年12月～2011年12月	301	
R UMa	10:44:38.3999	+68:46:32.298	2006年4月～2008年7月	302	
VX UMa	10:55:39.8999	+71:52:09.800	2008年11月～2009年5月	215	
T UMa	12:36:23.5000	+59:29:13.000	2009年3月～2010年12月	257	
RS Vir	14:27:16.3998	+04:40:41.100	2012年2月～	354	
Y Lib	15:11:41.2999	-06:00:41.399	2008年2月～2010年12月	276	
S CrB	15:21:24.0000	+31:22:02.600	2009年10月～2011年12月	360	
SW Lib	15:55:33.3999	-12:51:05.099	2009年11月～2011年12月	292	
FS Lib	16:00:23.8000	-12:20:57.500	2009年11月～2011年12月	415	
IRC-20540	19:08:56.0000	-22:14:19.399	2009年10月～2011年8月	510	
IRC+10374	18:43:36.7000	+13:57:22.800	2009年10月～2011年8月		
SY Aql	20:07:05.4000	+12:57:06.299	2012年5月～	356	

Src.Name	R.A.	Dec.	Observation	Period[day]	
セミレギュラー	RU Ari	02:44:45.5000	+12:19:03.000	2009年12月～2011年12月	354
RW Lep	05:38:52.7000	-14:02:27.199	2009年12月～2011年12月	300	
V353 Pup	07:46:34.1510	-32:18:16.260	2013年1月～		
HU Pup	07:55:40.1600	-28:38:54.840	2013年1月～		
S CrI	11:52:45.1000	-07:35:48.100	2005年10月～2007年5月	310	
W Hya	13:49:01.9980	-28:22:03.488	2004年3月～2006年5月	361	
RX Boo	14:24:11.5998	+25:42:13.000	2008年2月～2009年10月	278	
FV Boo	15:08:25.8000	+09:36:18.199	2011年1月～		
SV Peg	22:05:42.0850	+35:20:54.536	2012年5月～	145	

5

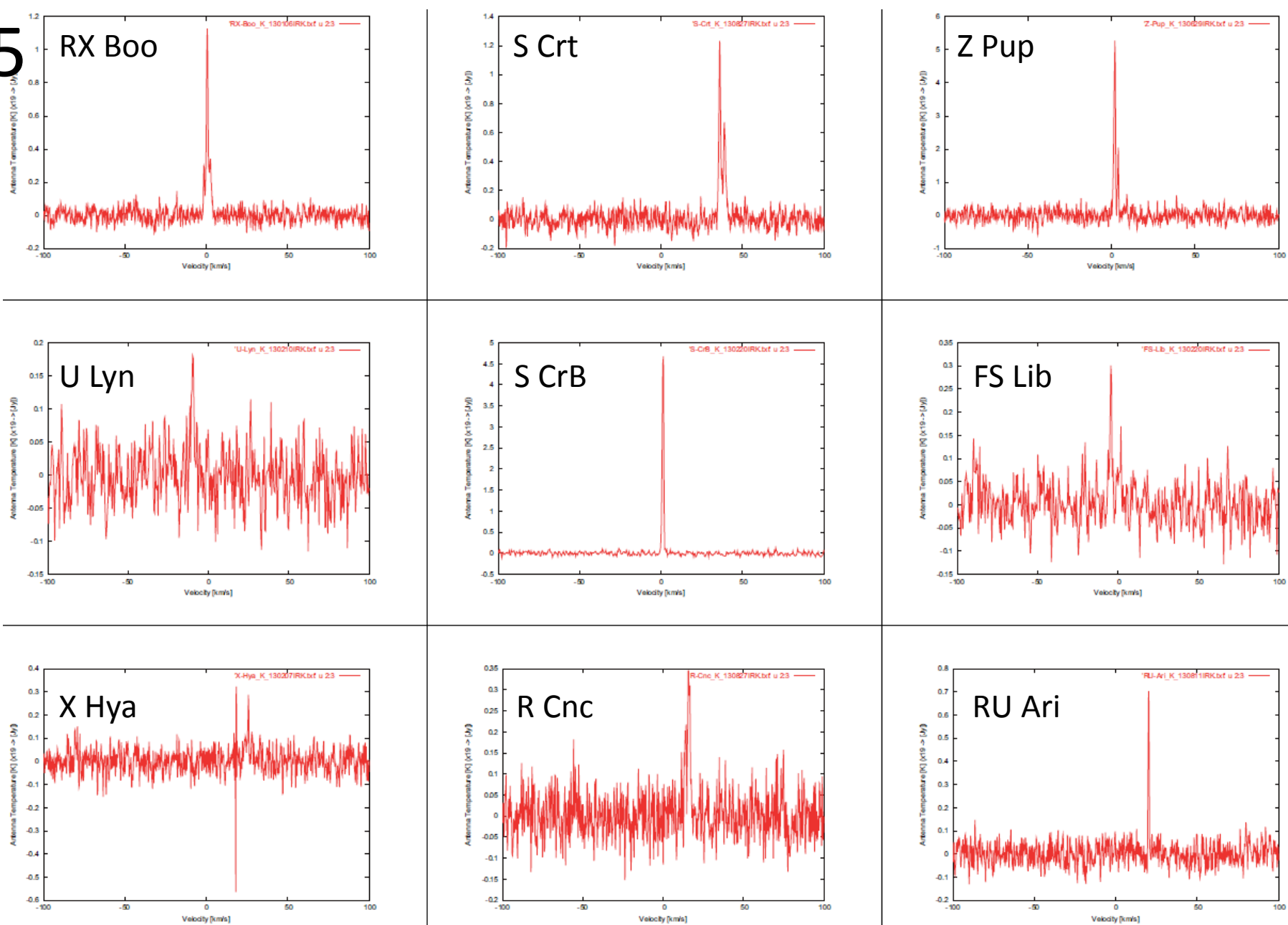


図4:水メーザーの強度。視線速度幅は0を中心に±100km/s。縦軸はアンテナ温度を示し、19をかけて Flux Density [Jy] のおよその値が得られる。

6

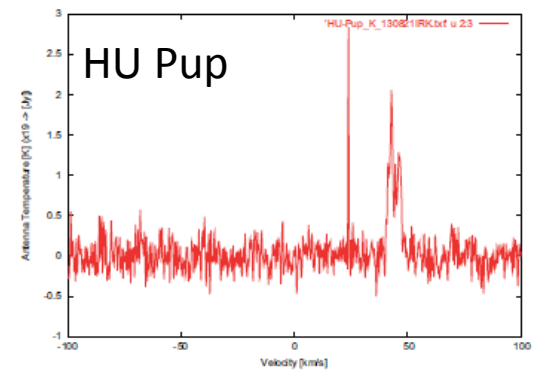
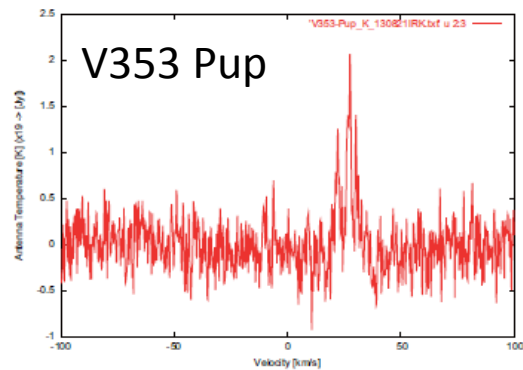
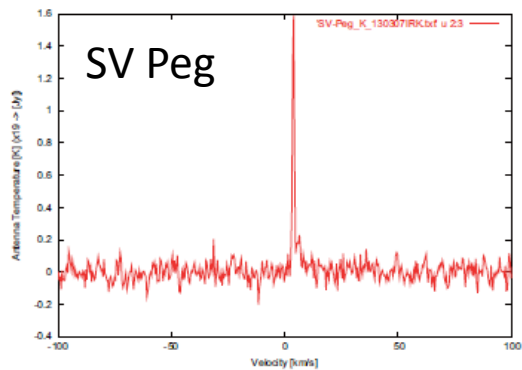
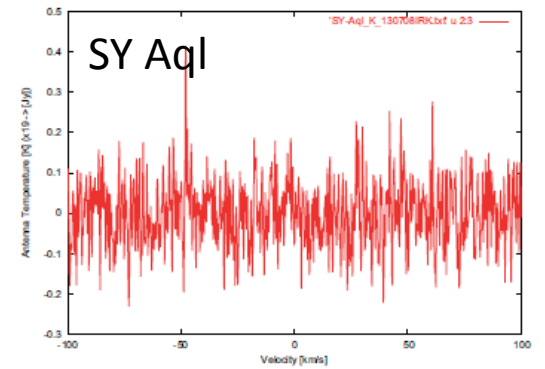
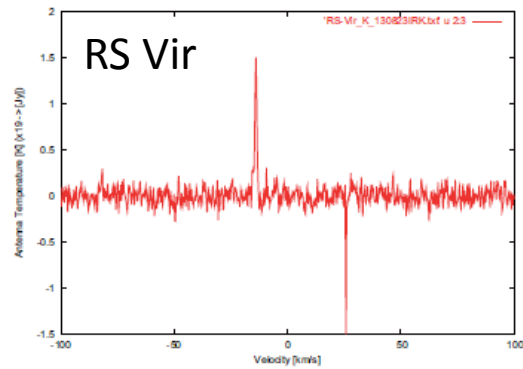
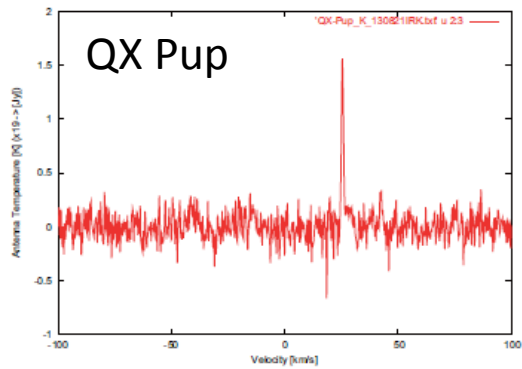
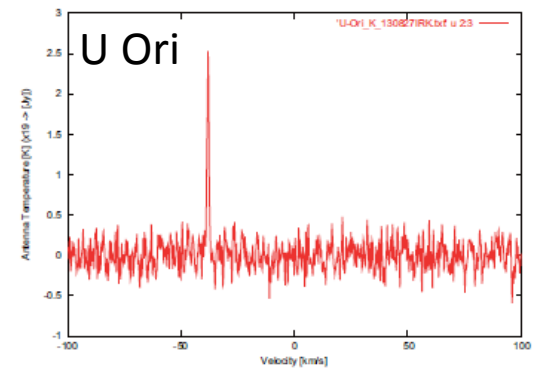
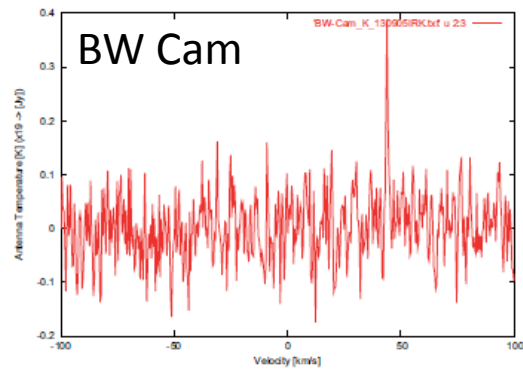
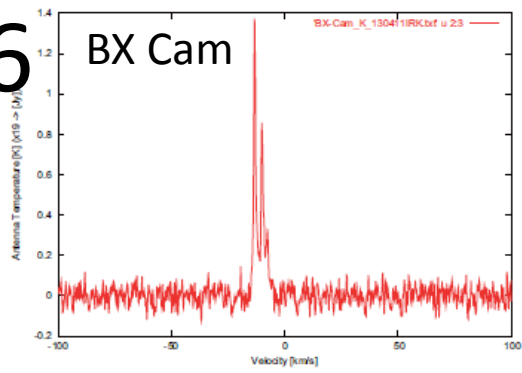


図5: 水メーザーの強度。視線速度幅は0を中心に±100km/s。縦軸はアンテナ温度を示し、19をかけることで Flux Density [Jy] のおよその値が得られる。

7

VERAによる観測

選定した天体のVLBI観測を行う。典型的には1つの天体を2年間に渡りモニターする。

- ・1カ月間隔で水メーザーのVLBIモニター観測を実施
- ・周波数: 22 GHz
- ・帯域幅: メーザー源 16MHz、参照電波源 240MHz
- ・2ビーム機構位相補償による大気揺らぎのキャンセル
- ・相対VLBIによりQSOに位置準拠した位置測定

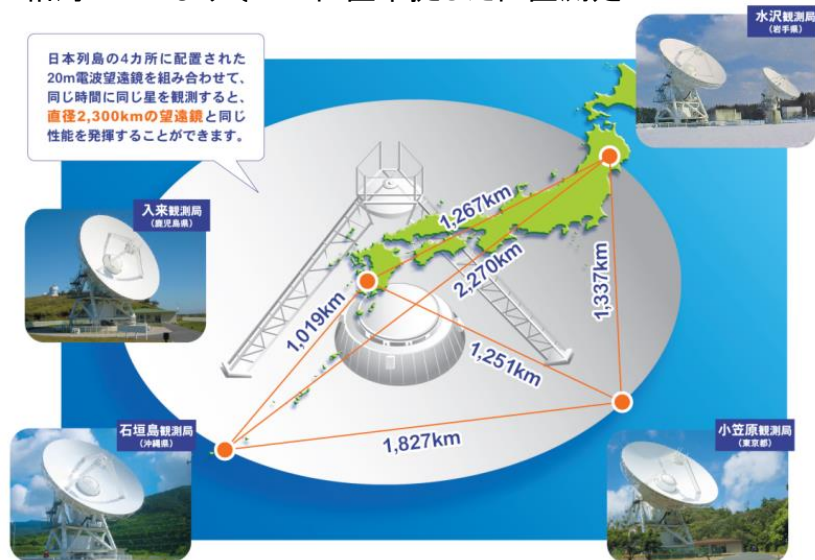


図6: VERAの配置

- ・水沢、小笠原、入来、石垣島の4局から構成される国内VLBIアレイ
- ・周波数: 43GHz(Siメーザー), 22GHz(水メーザー), 8/2GHz(測地ほか), 6.7GHz(メタノールメーザー)
- ・最大基線長: 2300 km (水沢-石垣島基線)



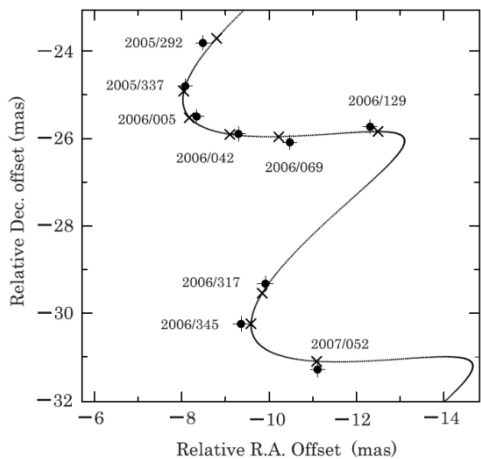
2ビーム機構:
鏡面底部のフィードーム内に、カセグレン焦点面上を動く2つの受信機が配置される。

図7: 2ビーム機構とアンテナ

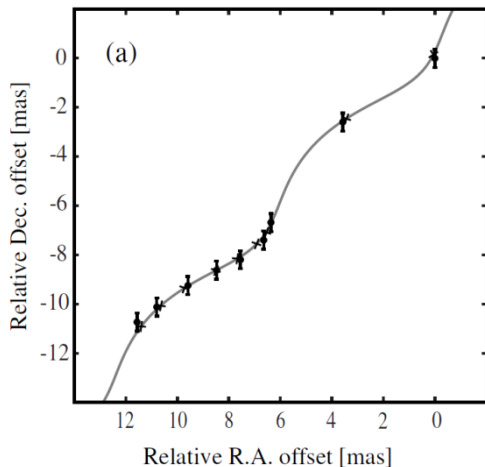


8

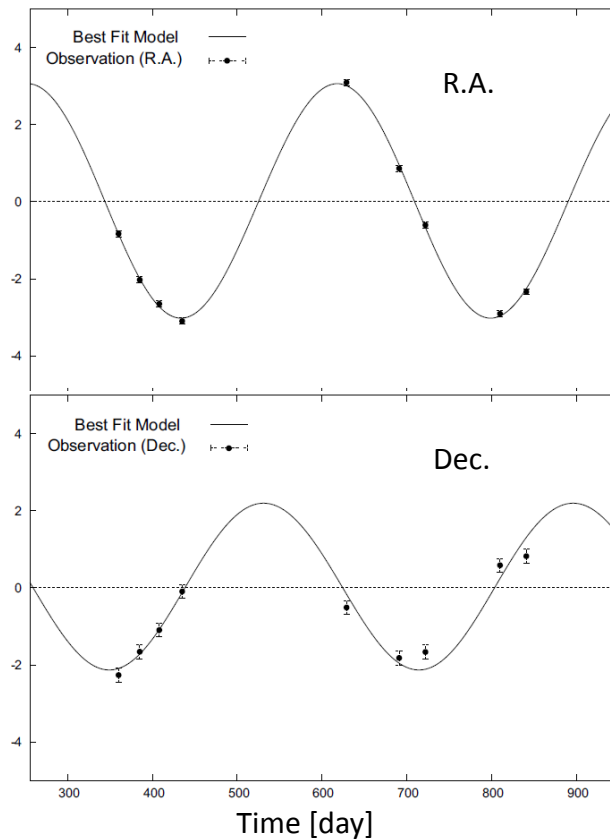
これまでの年周視差測定結果 S Crt, SY Scl, RX Boo, T Lep



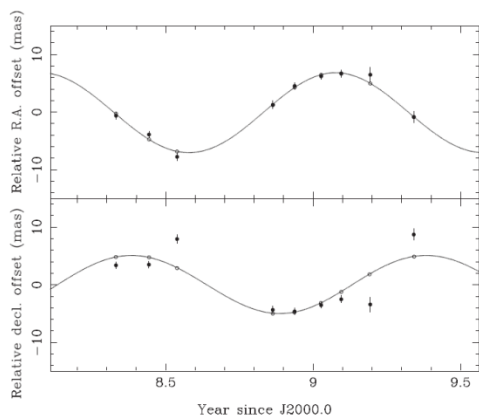
S Crt : Nakagawa et al. 2008



SY Scl : Nyu et al. 2012



T Lep : (Nakagawa in prep.)



RX Boo : Kamezaki et al. 2012

Source	Parallax [mas]	err [mas]	err [%]	D [pc]
S Crt	2.33	0.13	5.6	429
T Lep	3.058	0.042	1.4	327
R UMa	1.72	0.09	5.2	581
SY Scl	0.75	0.03	4.0	1333
RX Boo	7.31	0.5	6.8	137
Y Lib	0.87	0.08	9.2	1149
RW Lep	1.62	0.16	9.9	617
U Lyn	1.29	0.08	6.2	775
R Aqr	4.7	0.8	17	213

図8: VERAによるミラ型変光星のこれまでの年周視差計測結果

■ : Semiregular

9

最近の観測結果

QX Pupは2012年から観測を開始した天体の一つである。10回の観測で位相補償解析による水メーザーの検出に成功している。年周視差の計測値は図中に示した。赤経方向のデータのみを利用してフィッティングを行っている。まだ十分な精度とは言えず、観測を継続している。前項で示された過去の観測結果に比べると距離は遠く3kpc前後と推定される。複数のメーザースポットを使った計算も行う必要がある。視線速度と固有運動から3次元的な運動速度は61km/s となり、他のミラ型変光星と同様、晩期型星によく見られるような大きな速度を示した。

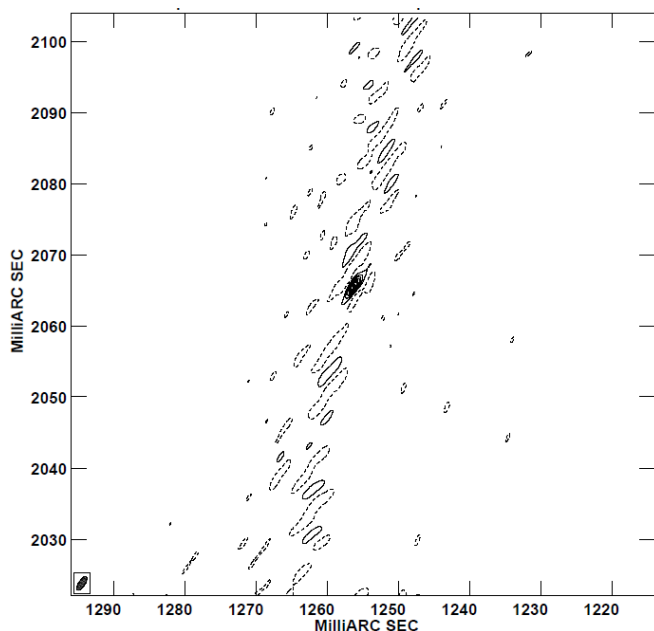


図9: 位相補償により描かれたQX Pupの水メーザー。
Peak Flux = 9.5 Jy/beam
Vlsr=25.39 km/s

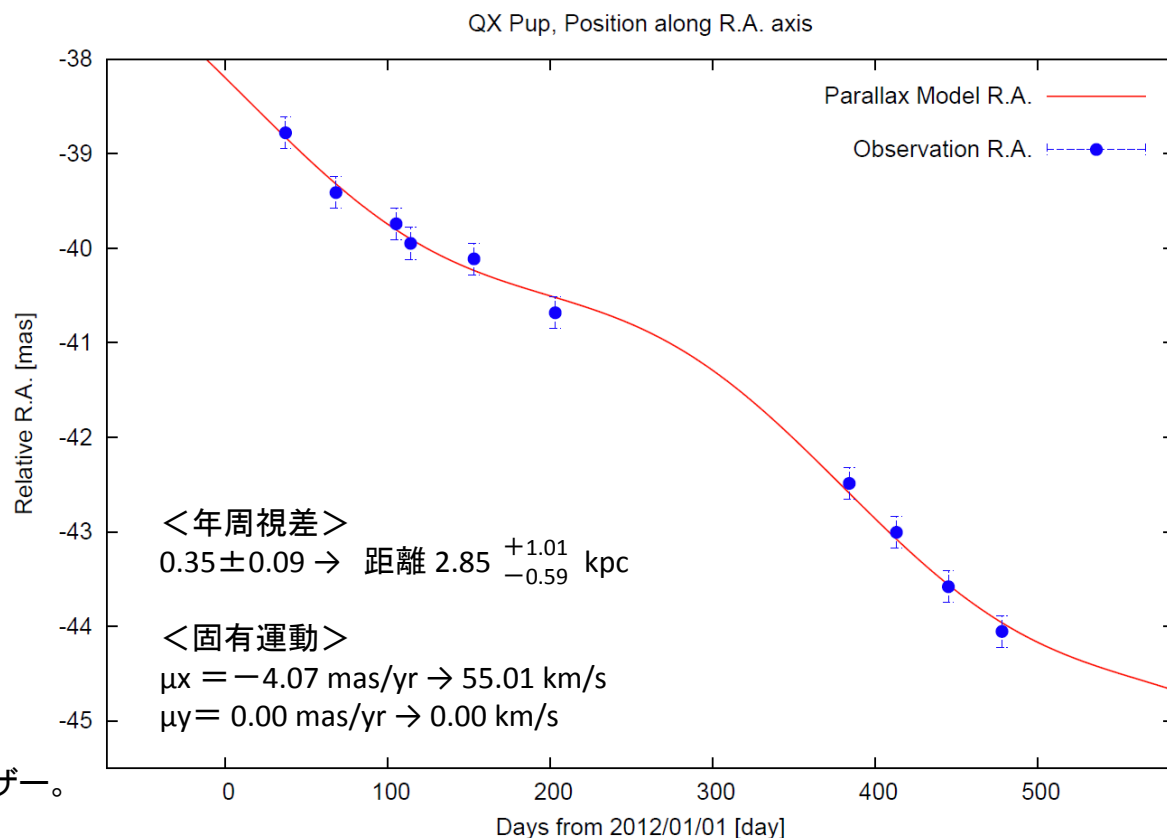


図10: QX Pupの年周視差計測 (Preliminary)

9.5

最近の観測結果

AP Lynは2005年10月から2007年9月まで合計13回の観測が行われた。相関処理の位相追尾中心から大きくずれていることが分かっており、このほど位相補償解析により追尾中心より北西に約4"の位置にメーザーを検出した(使用したデータは2007年9月の観測)。年周視差を求めべく引き続き複数の観測データのReductionを進めてる。

Maser (Target)

QSO (Reference)

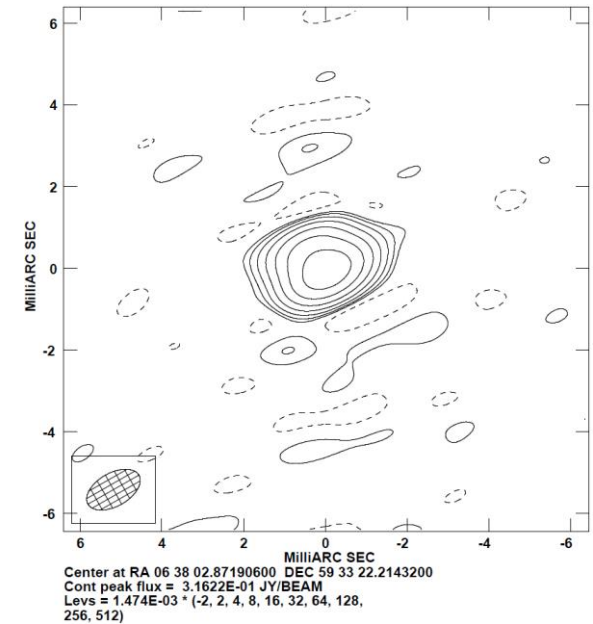
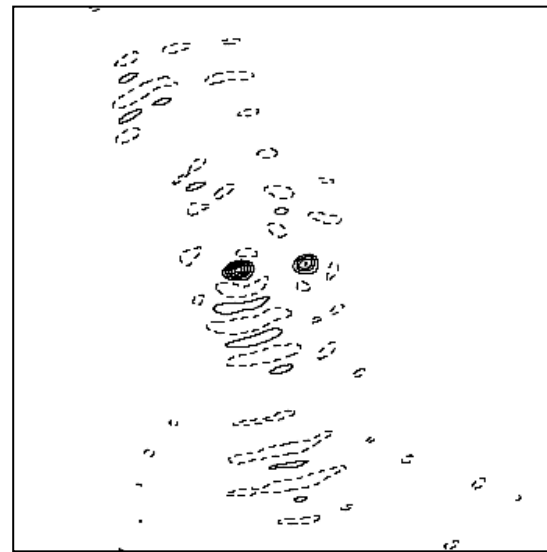
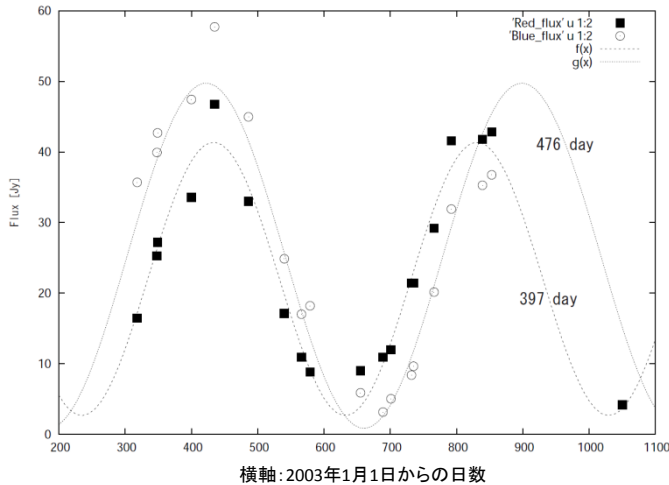


図: 入来局で得られたAP Lynの水メーザーの変動の様子。2つの速度成分の強度変動を示す。変動は周期的であり、光学観測による周期と同程度の値が得られている。

図: 位相補償により描かれたAP Lynの水メーザー ($V_{lsr} = -28.22$ km/s)。
 Peak Flux = 11.7 Jy/beam,
 1σ ノイズ = 420 mJy/beam, SN比 = 27
 等高線は $420 * (-3, 5, 10, 15, 20, 25)$ mJy/beam
 描画領域は 40 mas四方

図: AP Lynの参照電波源 J0638+5933のマップ。Peak Flux = 316 mJy/beam

位相補償の結果、上で示したAP Lynのメーザーの座標として次の値が得られる。
 (R.A., Dec.) = (06 h 34 m 33.7979 s, +60 d, 56' 27.635")

10

Preliminary Result : PLR

これまでに得られたミラ型変光星6天体の結果(8ページ参照)から求めたPLRを図11に示した。傾きにはLMCの観測から得られた値を利用し、ゼロ点のみの推定を行っている。新たに得られたQX Pupはまだ含まれていない(赤外線のKバンド変光周期および平均等級の観測中)。

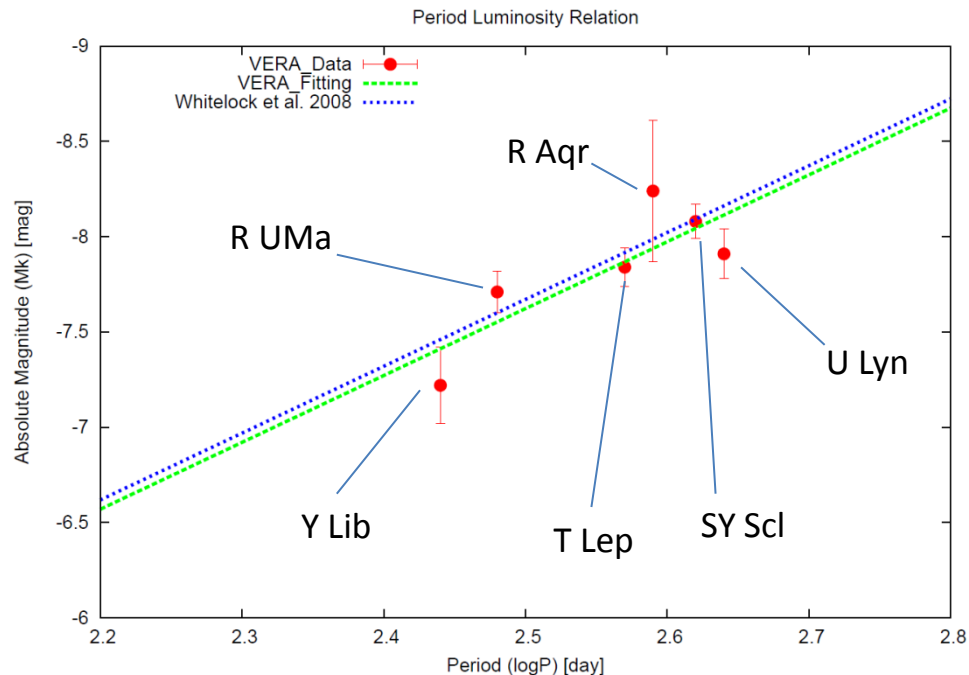


図11:ミラ型変光星6天体を利用したPLRの推定。赤い点がVERAによる観測点、緑の破線がそれらを利用して得られた直線。比較のためにWhitelock et al 2008の結果を青の破線で示している。

ρ & δ $M = -2.85 \pm 0.91 (\text{LogP} - 2.56) - 7.84 \pm 0.06$: VERAによる結果利用。傾きとゼロ点の同時推定。

δ $M = -3.51 (\text{LogP} - 2.56) - 7.83 \pm 0.06$: VERAによる結果利用。ゼロ点のみの推定。

Whitelock et al 2008 $M = -3.51 (\text{LogP} - 2.56) - 7.88$: Whitelock et al 2008の結果。

11

まとめ

天の川銀河にあるミラ型変光星の周期光度関係(PLR)を求めるべく、VERAによる水メーザーを利用した位置天文観測による観測的研究を進めている。これまでにおよそ30天体の観測を行い、9天体で年周視差の検出に成功している。今後も引き続き観測を継続することで、20天体を目標に年周視差の計測を目指している。同時に鹿児島大学1m光赤外線望遠鏡によるKバンドの測光観測も行われており、年周視差、平均等級、変光周期が揃いつつある。当初、PLRの傾きとゼロ点の同時推定を想定していたが、傾きに関してはその推定精度が荒いことが予想される。そこで傾きはLMCの値を利用しゼロ点の精度向上を優先することでPLRの精度向上を目指す。

- PLRの精密化を丁寧にすすめる
 - 距離の決定精度の向上 (右表: 誤差の距離精度依存性)
絶対等級の誤差は、位置天文計測起因の誤差と光学観測起因の誤差を含むが位置天文の寄与が支配的であり、位置天文精度の向上が欠かせない。
 - 目標天体数の目安(およそ20天体)に向けた観測の継続
 - ゼロ点の精度 → 距離尺度の高精度化
- 見かけ等級の誤差の最小化は重要
 - 見かけ等級決定の精度: 0.02~0.3 mag
星間減光 ($D > 1\text{kp}$ で顕著)や長周期で影響が大きいと考えられる星周減光も考慮に入れることを考える。
 - カラーと減光の関係などに先行研究の分析

距離の精度が
等級に与える影響

Distance Error	σ M _k
[%]	[mag]
1	0.02
2	0.04
3	0.07
4	0.09
5	0.11
6	0.13
7	0.15
8	0.17
9	0.20
10	0.22
11	0.24
12	0.26
13	0.28
14	0.31
15	0.33

	Src.Name	R.A.	Dec.
	RS Eri	04:17:55.3671	-18:30:25.4208
	U Her	16:25:47.4717	+18:53:32.8556
2013年秋から観測を 開始する天体の候補	V1111 Oph	18:37:19.2600	+10:25:42.2000
	R Aql	19:06:22.2514	+08:13:48.0067
	V391 Cyg	19:40:52.3890	+48:47:41.4700
	AM Cep	21:41:27.0800	+76:23:11.3000
	IRC+60370	22:49:59.2000	+60:17:55.0000
	R Cas	23:58:24.8734	+51:23:19.7011