

日本天文学会2009年春季年会

R27a: VLBIによる銀河円盤観測の意義と精度

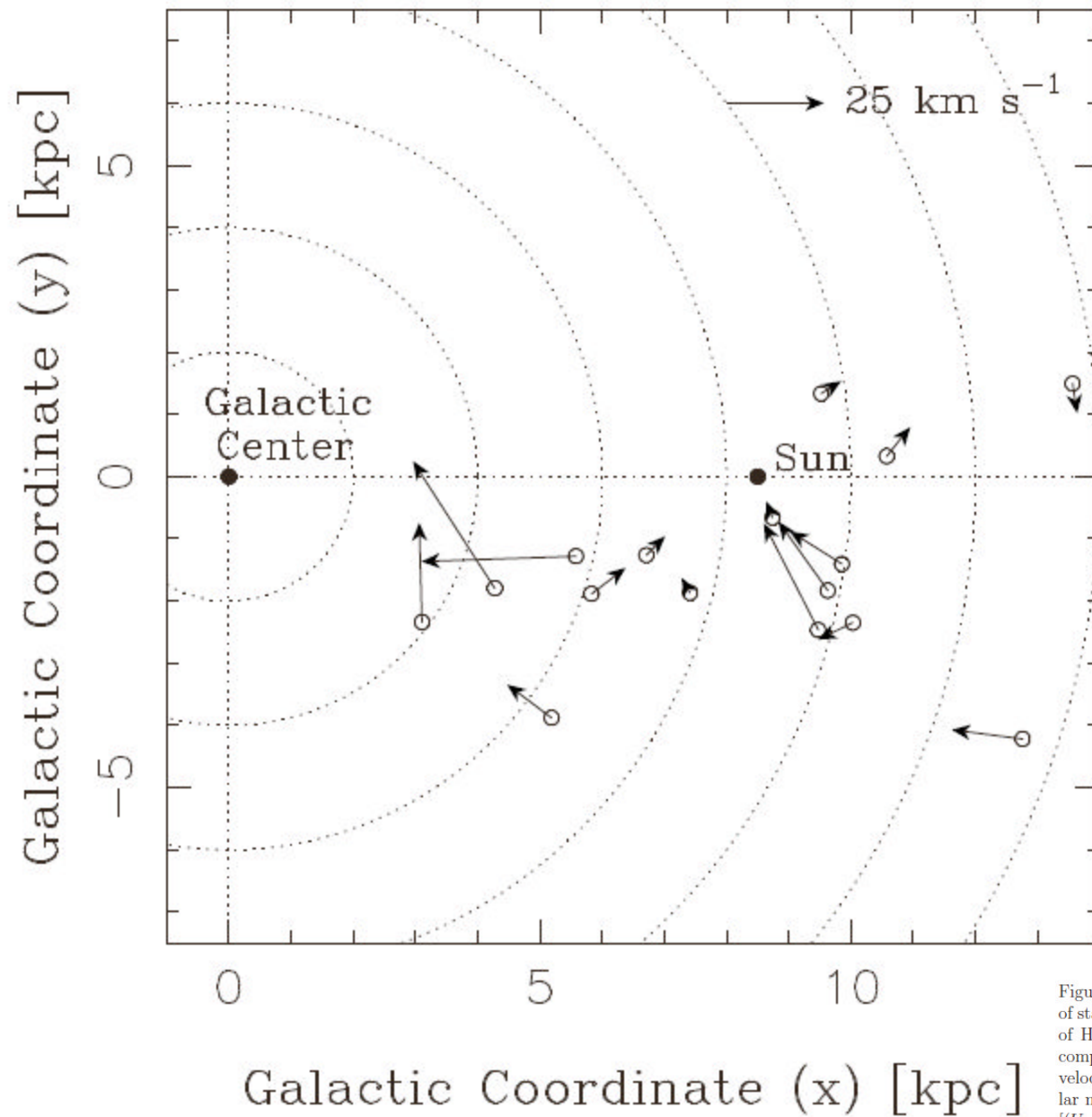
○三好 真(国立天文台), 馬場淳一(東北大), 朝木義晴(宇宙研), 牧野淳一郎, 斎藤貴之, 和田桂一(国立天文台)

VERA計画は 10μ 秒角精度の計測精度を実現し、年周視差と固有運動の精密測定により銀河系の構造とダイナミクスを研究することを科学目標に据えるものである。国立天文台・国際外部評価(2008)でも指摘されたように、その目標精度はいまだに実現されていない。仮に達成可能精度を 20μ 秒角とすれば、年周視差による距離測定は5kpc以内となる。また達成精度の低下は観測可能天体数を大幅に減少もさせる。

最新のN体・流体simulation研究(本年会、馬場、牧野、和田ら講演)は、現VERAが位置精度 10μ 秒角精度が達成せず、かつ少数の可観測天体数であっても、銀河系研究を刷新する観測装置となりうることを示している。本講演では、成果最大となる観測戦略(統計視差法による距離測定の重視、長期観測による固有運動測定の高精度化)を提案する。統計視差法はメーザスポット群の視線速度と相対固有運動の分散を比較することで、距離を推定する手法である。1980年代にオリオンKL(480 ± 80 pc), W49N (11.4 ± 1.2 kpc), SgrB2(7.1 ± 1.5 kpc)などの星生成領域の水メーザ源の距離を計測するのに用いられた。特にW49では10 kpcの測定に成功しており、銀河全域の測定可能性を示している。また年月を稼ぐことで天体位置の変位量は大きくなるので、固有運動は長期の観測をすればするほど観測精度を上げることができる。

位置天文においては位置誤差の確度の高い見積もりこそが値打ちである。古典位置天文学においては、同一データに対して異なる手法、異なる研究者の解析を比較することで、確度をあげてきた。本講演では 8μ 秒角精度とされるS269の年周視差測定(本間・他2007)についての再解析結果も報告する。

国際外部評価(電波部): http://www.nao.ac.jp/Report/Radio_Astronomy.pdf, 2008



VLBIの結果から
非円運動成分が
やたら (~30km./s)
めだつ。

最初に図で示したの
は朝木義晴氏。

ここに着目したのは
日本が世界初。

Figure 1: Peculiar velocities (i.e. deviation from a galactic circular rotation) of star-forming regions in our Galaxy, based on proper motion measurements of H_2O and CH_3OH masers in our Galaxy by the VLBA and VERA [11], compiled from literatures (see Table 1). Position of the sun and circular velocity are assumed as $R_0 = 8.5$ kpc and $\Theta_0 = 220$ km s $^{-1}$. The solar motion is based on the recent analysis of the HIPPARCOS observations $[(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (7.5, 13.5, 6.8)$ km s $^{-1}$ [4]].

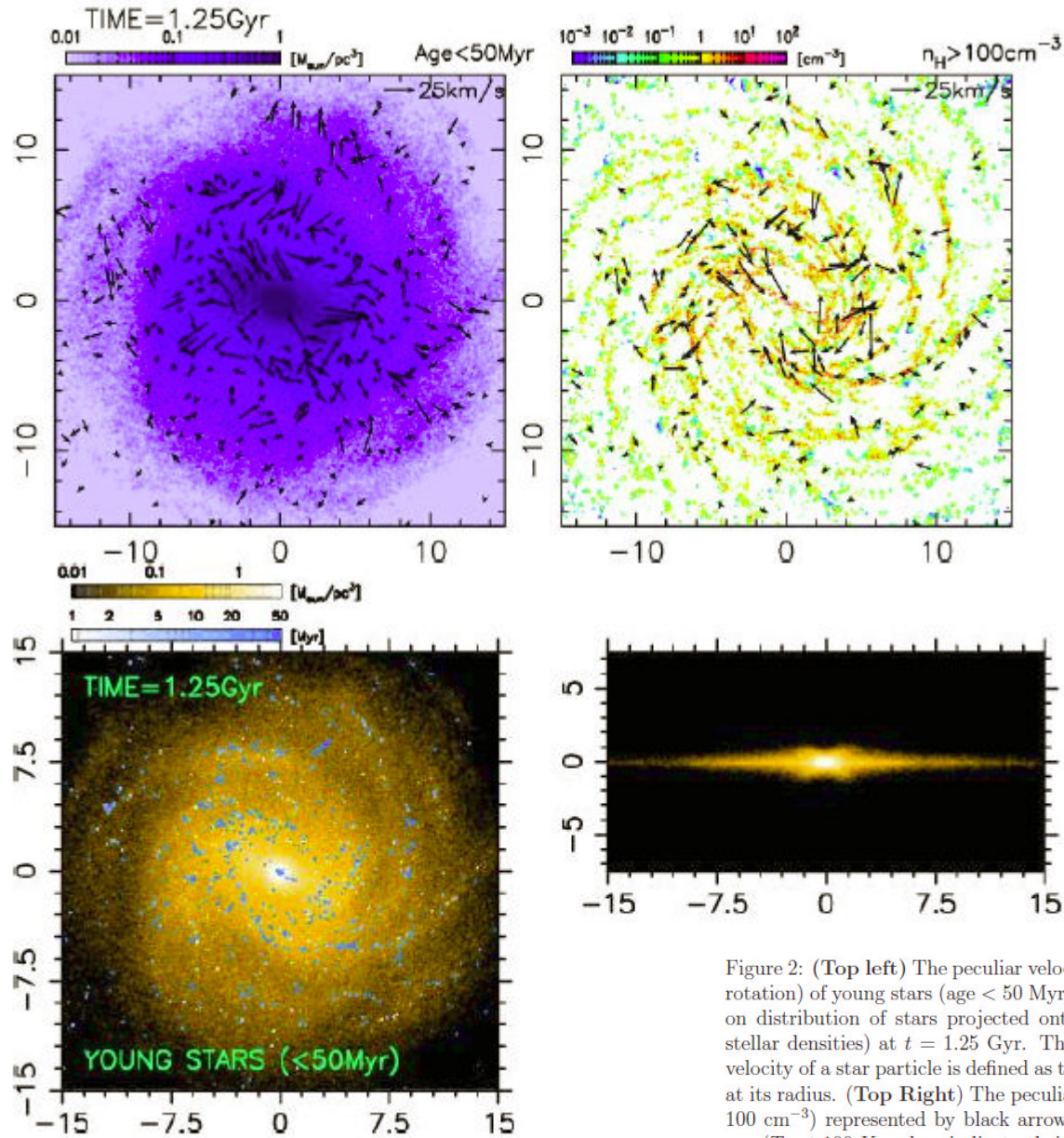
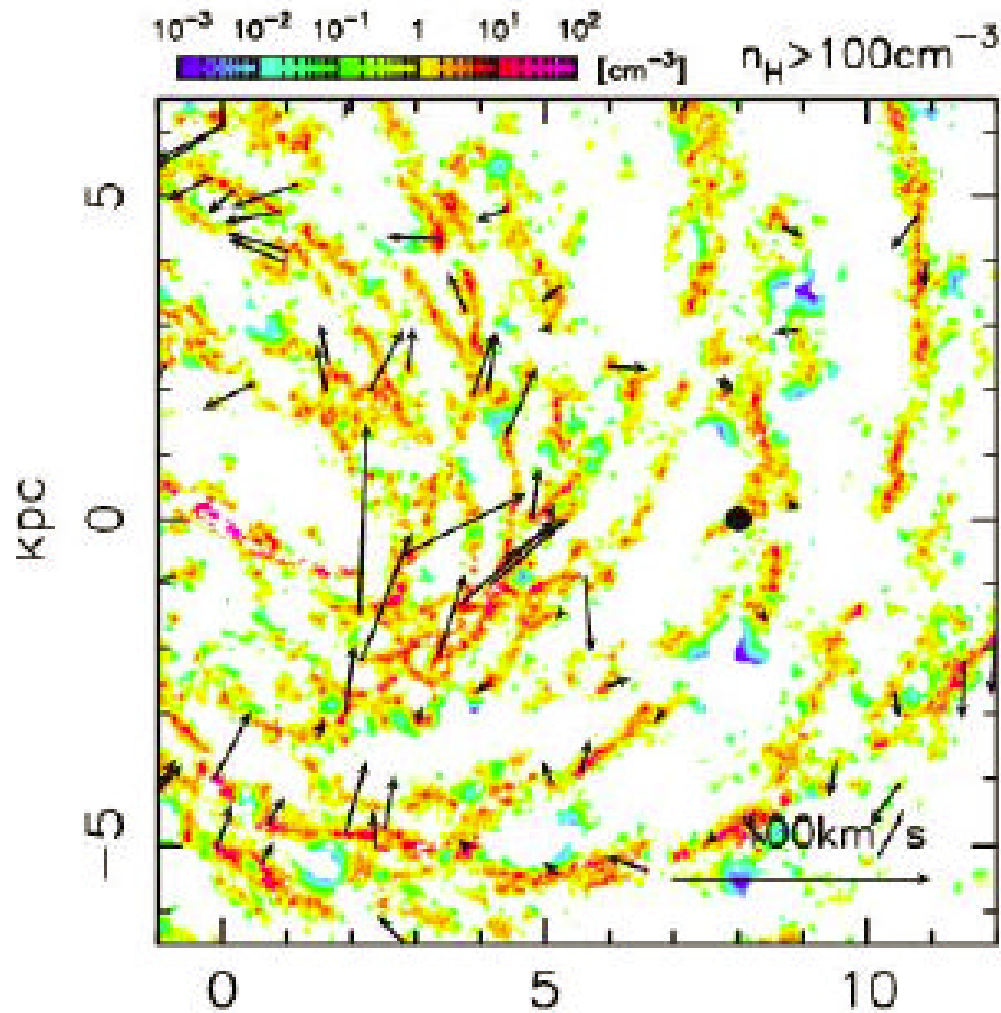


Figure 2: (Top left) The peculiar velocities (*i.e.* deviations from the circular rotation) of young stars (age < 50 Myr) represented by black arrows overlaid on distribution of stars projected onto the xy plane (blue colors indicate stellar densities) at $t = 1.25$ Gyr. The unit of length is kpc. The peculiar velocity of a star particle is defined as the deviation from the circular velocity at its radius. (Top Right) The peculiar velocities of high-density gas ($n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$) represented by black arrows are overlaid on distribution of cold gas ($T_g \leq 100 \text{ K}$, colors indicate their number densities). (Bottom Left) A face-on view of young stars (age < 50 Myr) (white-blue) overlaid on old stars (orange-white). (Bottom Right) An edge-on view of a snapshot at $t = 1.25$ Gyr of the stellar disk. The box size is $30 \text{ kpc} \times 15 \text{ kpc}$. A 'boxy' bulge is visible (cf. observations by the COBE/DIRBE).

Simulation結果から



VLBI観測から

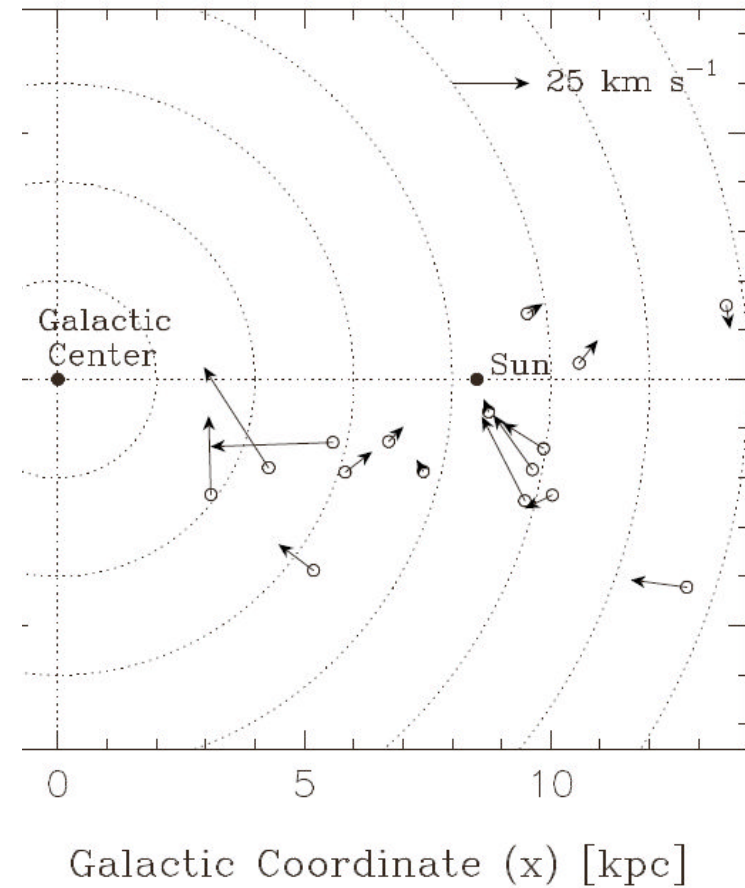
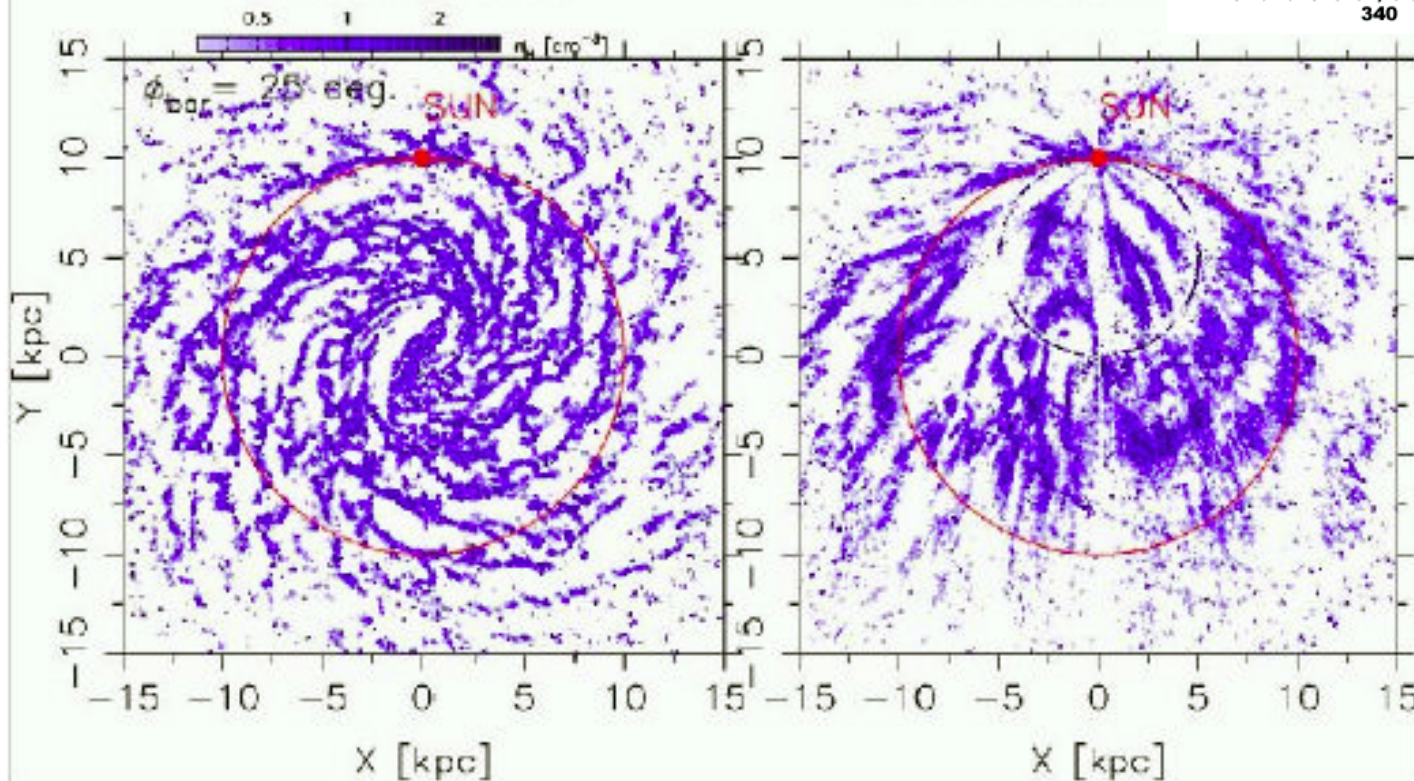
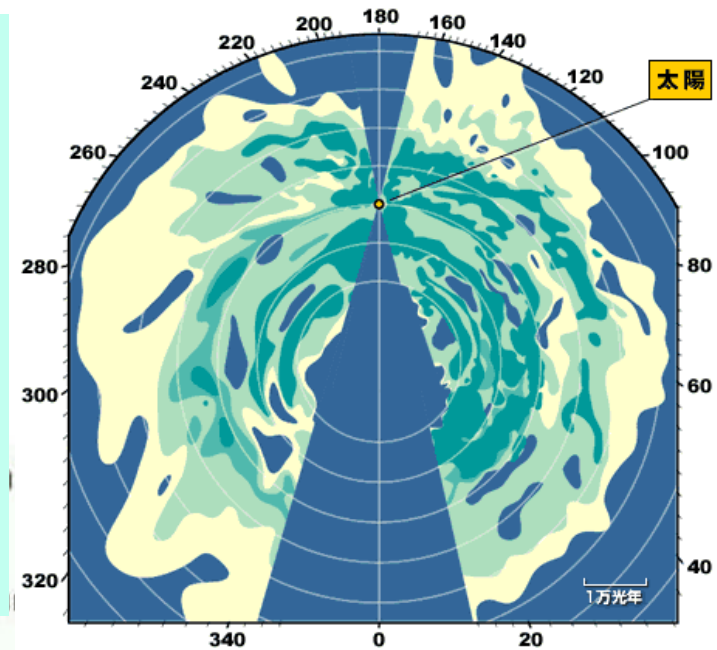


Figure 3: An example of “observation” of peculiar velocity of high-density gas ($n_H > 100 \text{ cm}^{-3}$), relative to the “Sun” represented by the black filled circle, at $t = 1.25 \text{ Gyr}$. The color represents gas density. These multi-arm structures are caused by a stellar bar and spirals, which are self-consistently solved by N -body/Smoothed Particle Hydrodynamics simulations.

円運動の仮定には限界。
天体の運動は観測しないと
詳しくはわからない。その
運動は腕構造の生成と深く
関わる。



↑HI観測から
求めた
銀河系構造

銀河系内での(メーザ)天体の軌道運動を測定する:

固有運動の測定が重要になった!

1) 視線速度: ラインを使って。Ex 0.1km/sec 容易。

2) 固有運動: 観測装置の空間分解能に依存すると同時に観測期間の長さspanにも依る。Spanをとれば、それだけ天体の移動量は大きくなり、やがて装置空間分解能よりも大きくなって、検出できる。

3) 距離:

・年周視差(仮定は少)。装置性能に強く検出限界は制限される
誤差要因はもちろんあるので、年周視差がもつとも精度がよい、
ともいえない。(相対VLBIの場合)位置基準と、参照電波源が必要。

・統計視差(仮定はちょっとある)。メーザ・スポット集団の内部運動に等方性を仮定したり、速度則のモデルにおいて、視線方向成分と(スポット間の相対)固有運動成分を比較して距離を推定する。

(等方なら) $D = \sigma_v / \sigma_\mu$

D: 距離 σ_v : 視線速度分散 σ_μ : 固有運動分散

星生成領域W49Nの水メーザの(相対)固有運動 Gwinn et al. (1992)

105個のメーザspotの運動より
統計視差から $D=11.4 \pm 1.2$ kpc

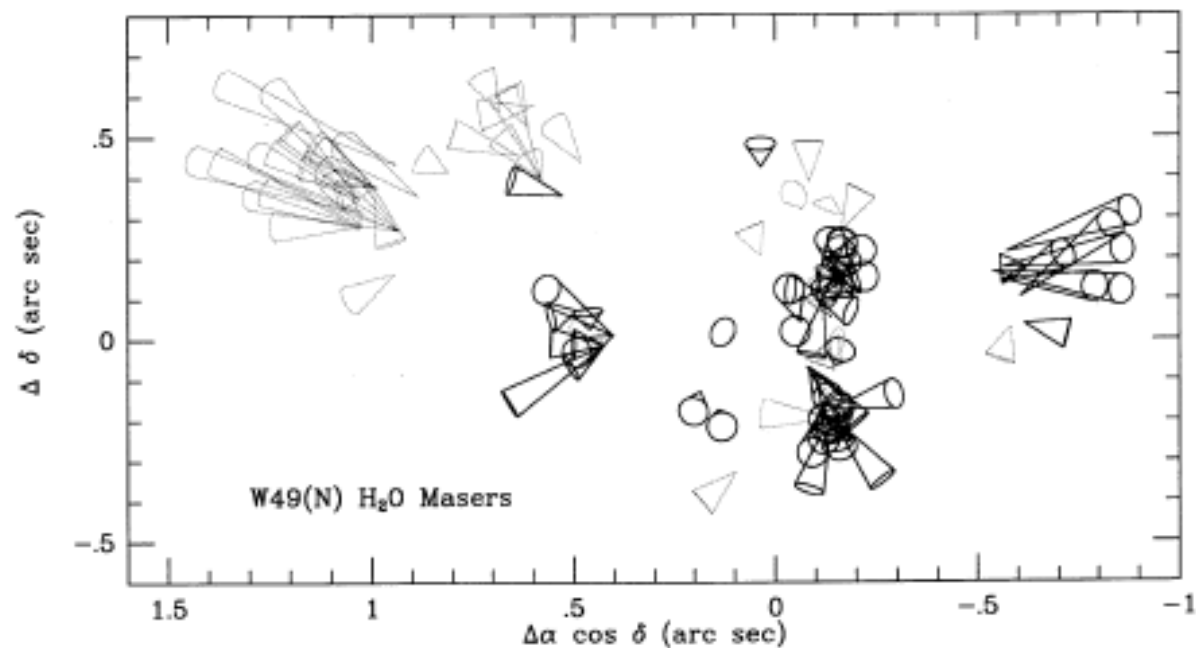


FIG. 2.—Positions and velocities for 105 major features listed in Table 4. The maser features are located at the apexes of the cones. The cones' lengths and inclinations show how far the masers would travel in 150 yr at their present velocities. Redshifted maser features are shown as dotted cones, and blueshifted maser features as solid cones. These velocities are relative to the fitted velocity of the center of expansion. The motion is clearly dominated by expansion from a single common center, located near the origin.

星生成領域の水メーザ分布と固有運動の例

オリオン

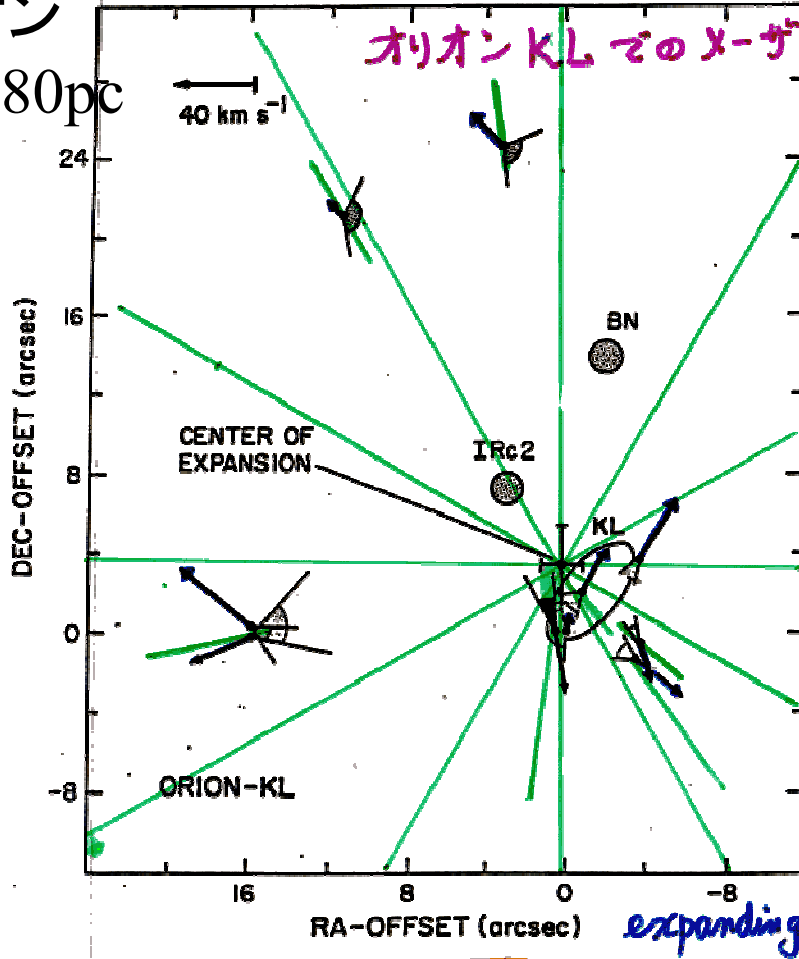
$480 \pm 80 \text{ pc}$

GENZEL, REID, MORAN, AND DOWNES

Vol. 244

ET AL.

オリオン KL での X-ザ Spot



Two-dimensional proper motions and the center of expansion in Orion-KL. Shown are all proper motion vectors (for the cases shown) with length proportional to their transverse velocity, and error bars (1σ) indicated by error cones (stippled). The best fit to the center of the 18 km s^{-1} flow from the model described in the text is shown with 1σ error bars (position: $05^{\text{h}}32^{\text{m}}46.73 \pm 0.71$, $0^{\text{m}} \pm 2''$ (1950). For comparison, positions of some of the infrared features in Orion-KL also are indicated (stippled regions). BN Klein-Naugebauer object, KL is the core of the extended $20 \mu\text{m}$ Kleinmann-Low Nebula. The compact infrared source IRc2 is the SiO maser in Orion. All velocity vectors are relative to the center of expansion, that is, they have been corrected for the reference feature from the model parameters.

W51M

$D = 7 \pm 1.5 \text{ kpc}$

W51(M)での X-ザ Spot

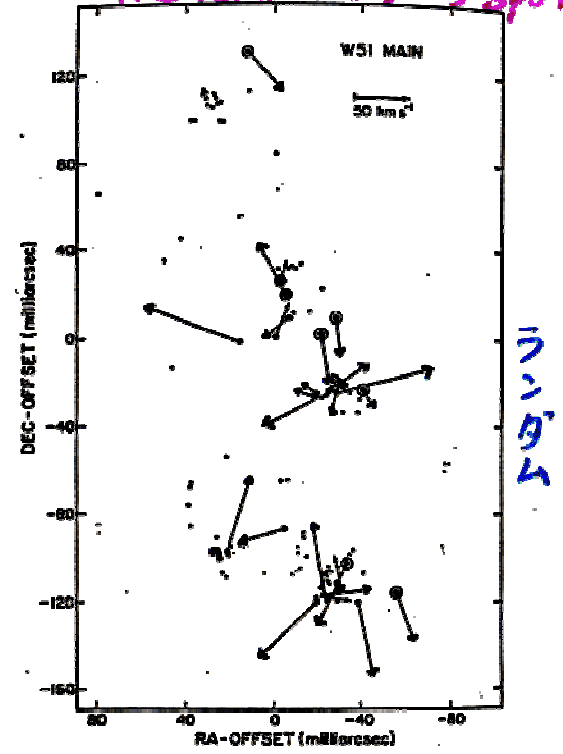
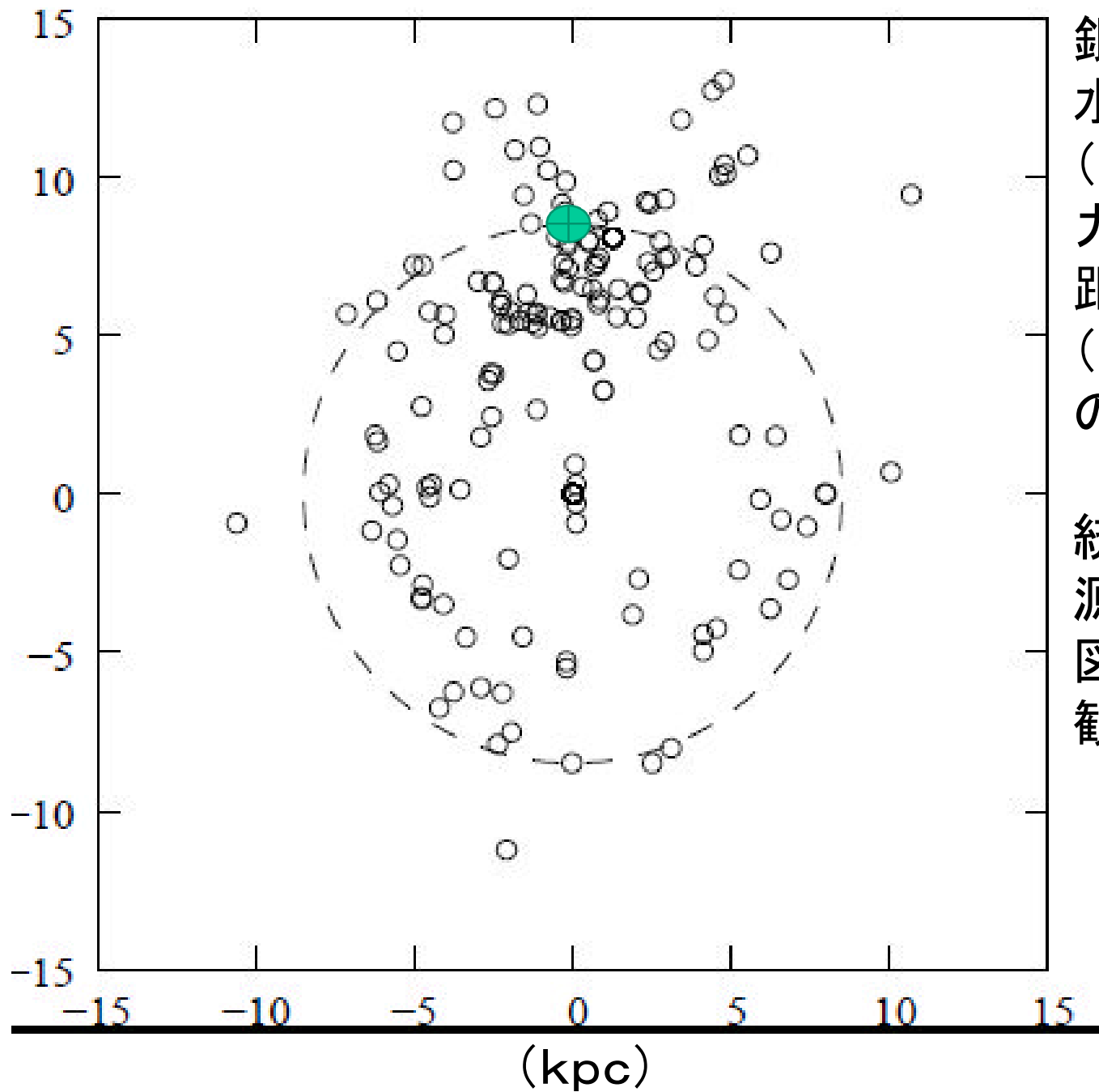


FIG. 4.—Proper motions in W51 MAIN. Shown are the transverse velocity vectors superposed on the map given in Fig. 3. Small dots, individual maser features; large dots, maser features with measured proper motions. Encircled dots, "low-velocity" features ($V_{\text{LSR}} = 54\text{--}72 \text{ km s}^{-1}$). The angular coordinates are relative to the reference feature, and the proper motions are with respect to the median value of the distribution. The velocity scale (upper right) is for a distance of 7 kpc. The actual motions over two years are much smaller than the arrows (less than a few milli-arcseconds).

transverse motions of the "low-velocity" features are large compared with their radial velocities relative to the molecular cloud. Thus, the space velocities of the "low-velocity" and "high-velocity" features may be similar.

天体名	測定者	統計視差	最近の年周視差による測定
W 49N	Gwinn et al. 1992	$11.4 \pm 1.2 \text{kpc}$	
SgrB2 (N)	Reid et al.(1988)	$7.1 \pm 1.5 \text{kpc}$	
Orion IRc2	Genzel et al. (1981)	$480 \pm 80 \text{pc}$	$437 \pm 19 \text{pc}$ (Hirota et al.07)
W51 (M)	Genzel et al.(1981)	$7 \pm 1.5 \text{kpc}$	
W51 (N)	Schneps et al.(1981)	$8.3 \pm 2.5 \text{kpc}$	
W51 (N)	Imai et al.	$6.1 \pm 1.3 \text{kpc}$	
W51(S)	Imai et al.	(6.0kpc)	
W3 IRS 5	Imai et al (2000)	$1.83 \pm 0.14 \text{kpc}$	
VY CMa	Marvel et al. (1998)	$1.4 \pm 0.2 \text{kpc}$	$1.14 + 0.01 - 0.09 \text{kpc}$ (Choi et al.08)
RT Vir	Imai et al. (2003)	$220 \pm 30 \text{pc}$	
S Per	Marvel et al. (1998)	$2.3 \pm 0.5 \text{kpc}$	$2.51 \pm 0.09 \text{kpc}$ (Asaki et al.09)
VX Sgr	Marvel et al.(1998)	$1.4 \pm 0.3 \text{kpc}$	

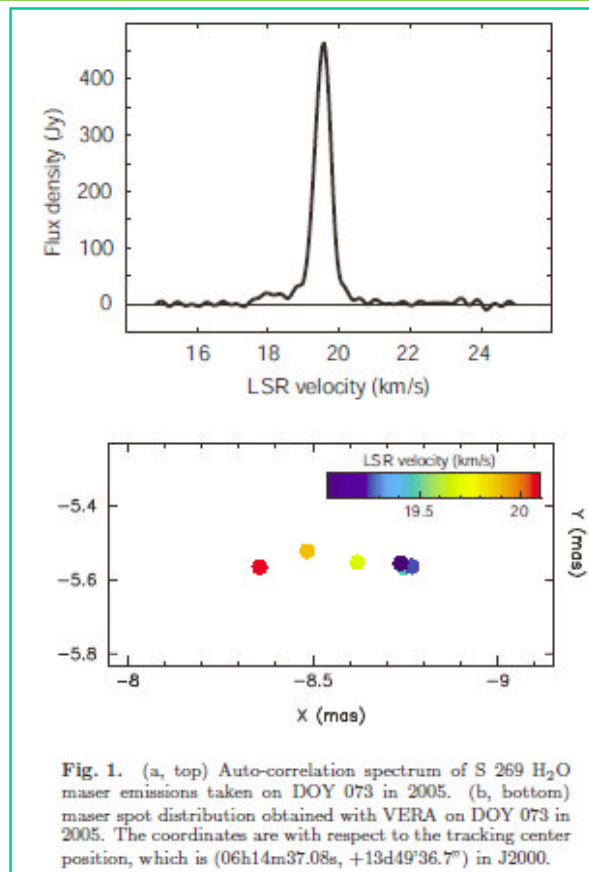
統計視差と年周視差は概ね誤差の範囲で一致する結果
(参照源のないメーザ源の距離測定に、統計視差法は有用)



銀河系内の
水メーザ分布
(強度100Jy以上)
力学視差から
距離を推定、プロット
(馬場・蜂須賀両氏
の協力による)

統計視差法では参照
源を必要としないので
図示されるこれらが
観測可能(65天体)。

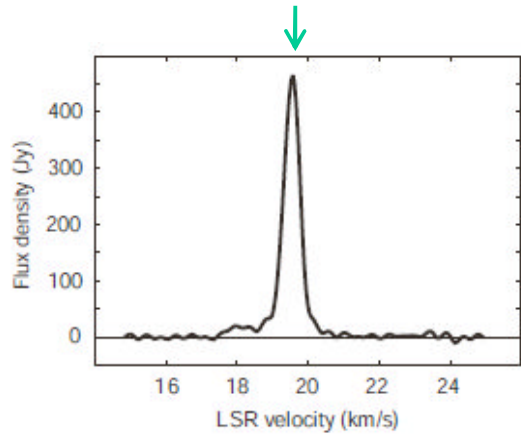
せっかくなので、S269で統計視差法を試みる



The total-power spectrum of S269 taken on DOY 073 in 2005 is shown in figure 1(a). Basically it consists of a single feature at V_{LSR}^6 of $\sim 19.6 \text{ km s}^{-1}$ with a peak intensity of 480 Jy, being consistent with previous single-dish monitoring study (Lekht 2000). This main feature was always bright and observable for all the epochs presented here. Figure 1(b) is the maser spot map of the main feature around V_{LSR} of $\sim 19.6 \text{ km s}^{-1}$ (for DOY 2006/073). Six maser spots were detected in the velocity range from 19.0 to 20.1 km s^{-1} , and these maser spots are aligned in the east-west direction with a scale of 0.4 mas. It is remarkable that the thickness of the feature (spots distribution in the north-south direction) is $\sim 50 \mu\text{as}$, 10 times smaller than the width in the east-west direction. The maser distribution also shows a velocity gradient from the east to the west. This kind of structure is rather unusual for H₂O masers in star forming regions (which mostly show bipolar structure with blue-shifted and red-shifted components), but instead, similar to those of CH₃OH (methanol) masers at 6.7 GHz and 12.2 GHz (e.g., Minner et al. 2000). Note that positions in figure 1(b) are the residuals to the tracking center positions of the maser and reference sources, which are taken to be $(\alpha, \delta) = (06\text{h}14\text{m}37.08\text{s}, +13\text{d}49'36.7")$ for S269, and $(06\text{h}13\text{m}57.692764\text{s}, +13\text{d}06'45.40116")$ for J0613+1306, both in the J2000 coordinates. Thus, the absolute position of the brightest 19.6 km s^{-1} spot at DOY 073 of 2005 is obtained as $(06\text{h}14\text{m}37.07933\text{s}, +13\text{d}49'36.6945")$ with an uncertainty of 1 mas, which mainly comes from the uncertainty of absolute position of the reference source J0613+1306. The absolute position of the maser feature shown in figure 1(b) agrees well with the position of S269 IRS2w, which is the most luminous infrared source in the S269 regions (Jiang et al. 2003).

- 先行論文 (Honma et al. 07)によると
- ・メーザスポット6ch(のみ)、
 - ・SFRの水メーザとして特異、
- メタノールメーザの分布に似る、との記述

S269の水メーザ:クロスパワースペクトル(VLBI)はダブルピーク。単一鏡でのスペクトルとの違いは、各チャンネルの構造の違いを示唆。



(先行論文・図1から) オートパワースペクトル(単一鏡)

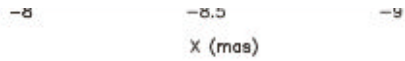
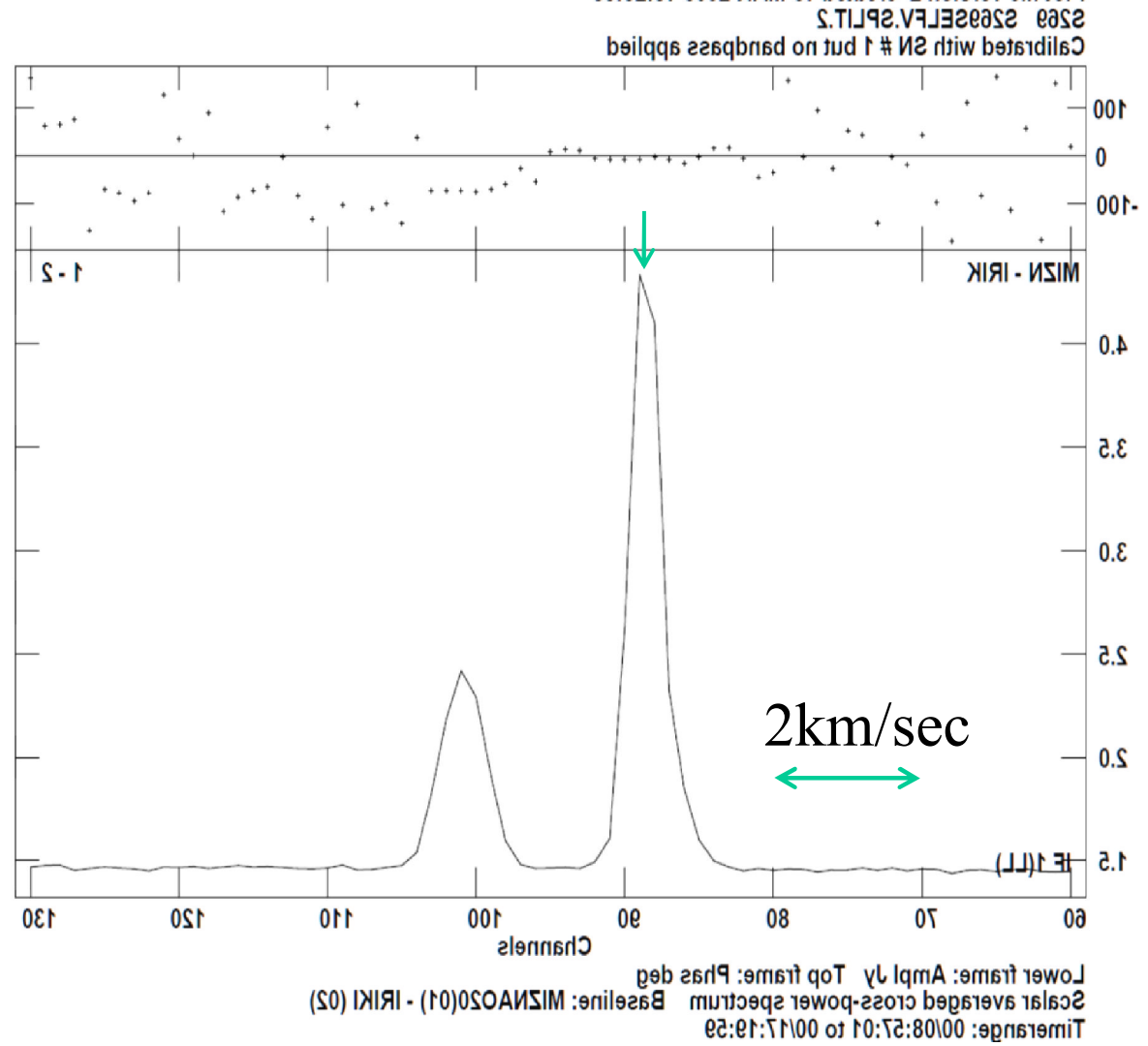
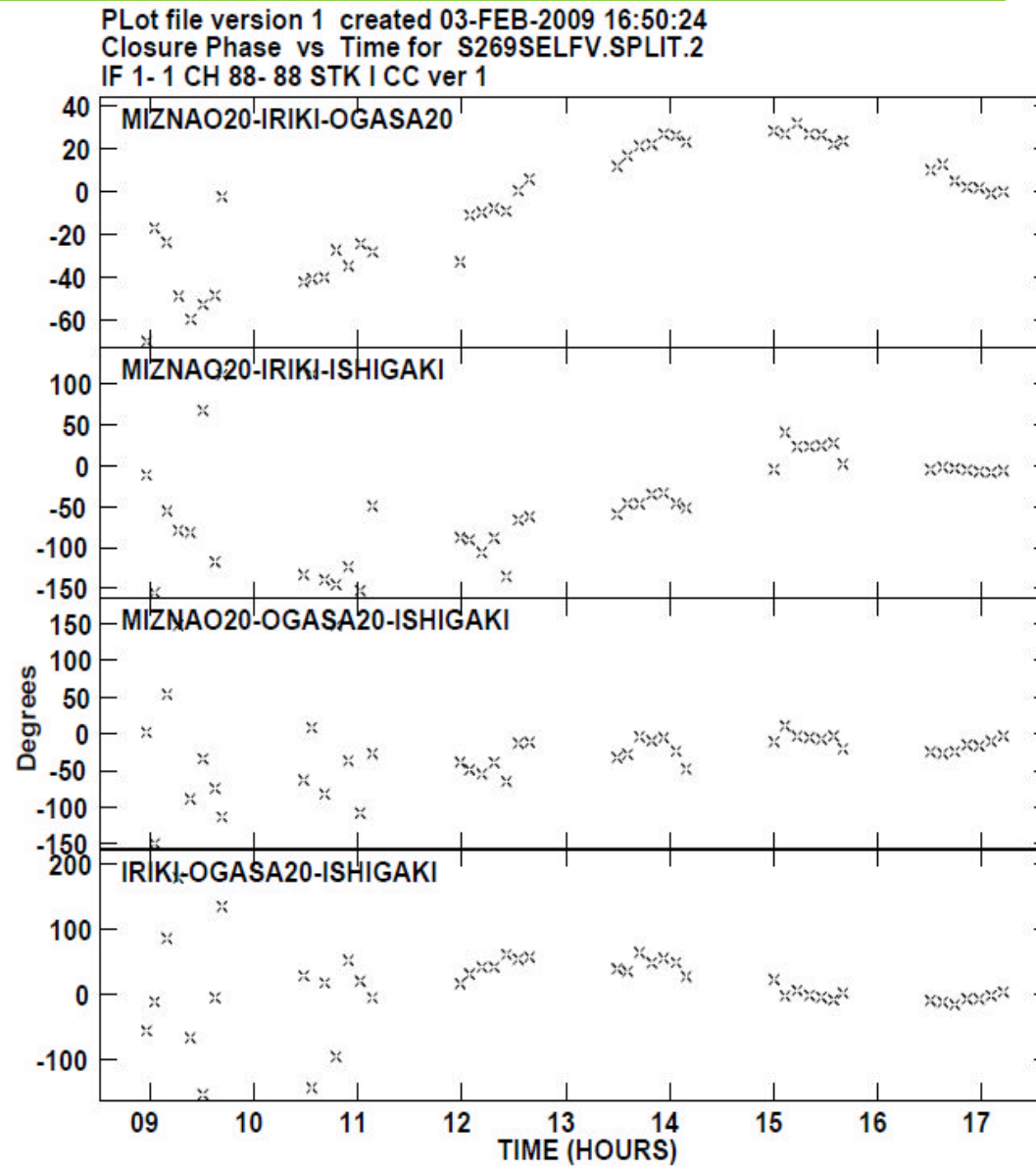


Fig. 1. (a, top) Auto-correlation spectrum of S 269 H₂O maser emissions taken on DOY 073 in 2005. (b, bottom) maser spot distribution obtained with VERA on DOY 073 in 2005. The coordinates are with respect to the tracking center position, which is (06h14m37.08s, +13d49'36.7") in J2000.



LSR=19.5km/sのクロージャ位相

7min after CALIB

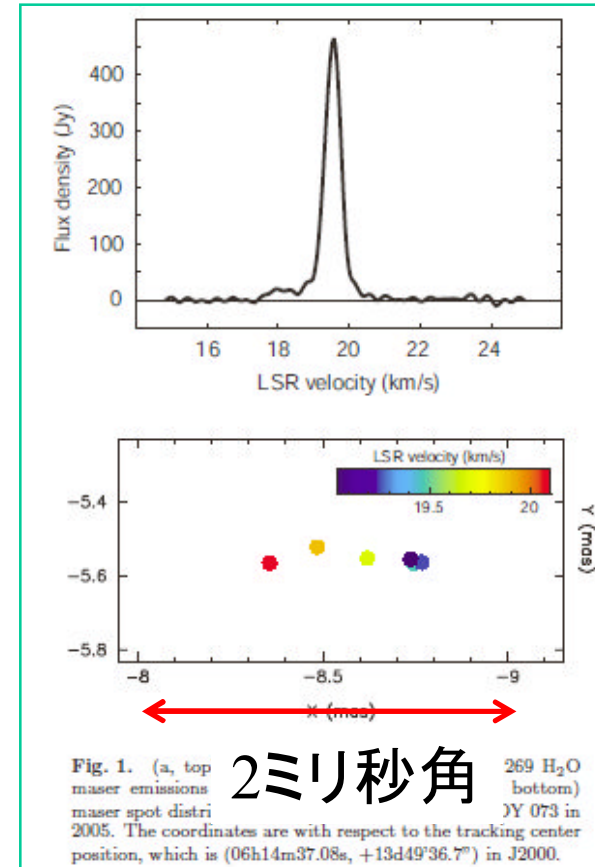
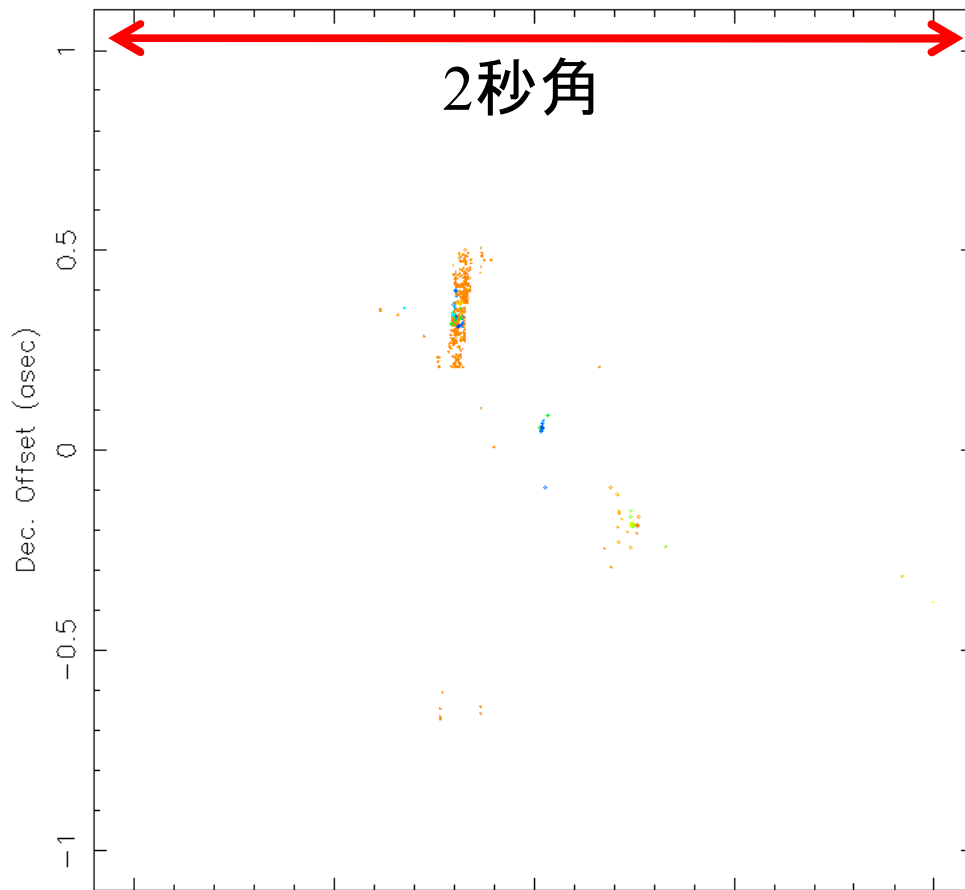


全エポックの観測で、クロージャ位相はノンゼロ。
(点対称構造ではない)。
つまり点源ではない。
おそらく、同一速度CHに複数のメーザSPOTがある。

S269の水メーザ分布

ID:18 V: 22.0 7.0 Fm:*****

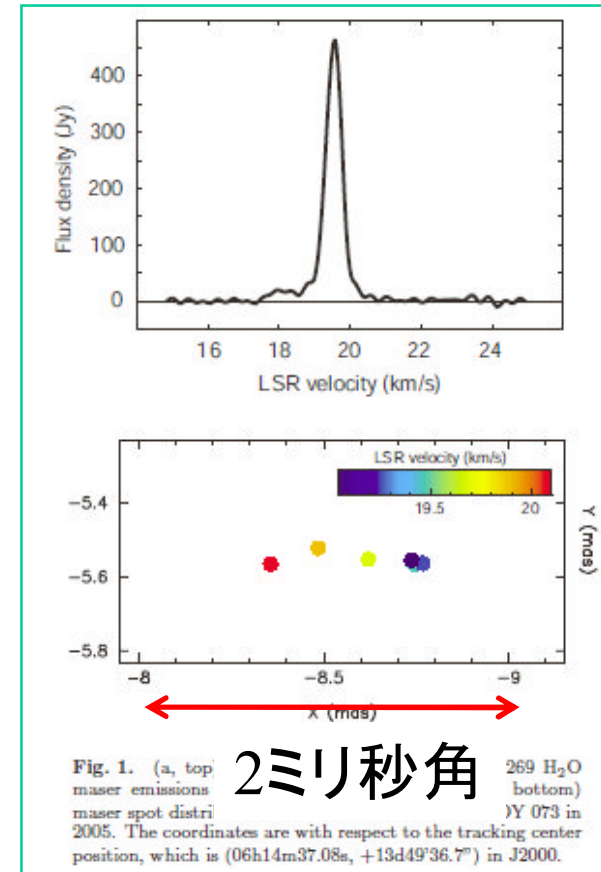
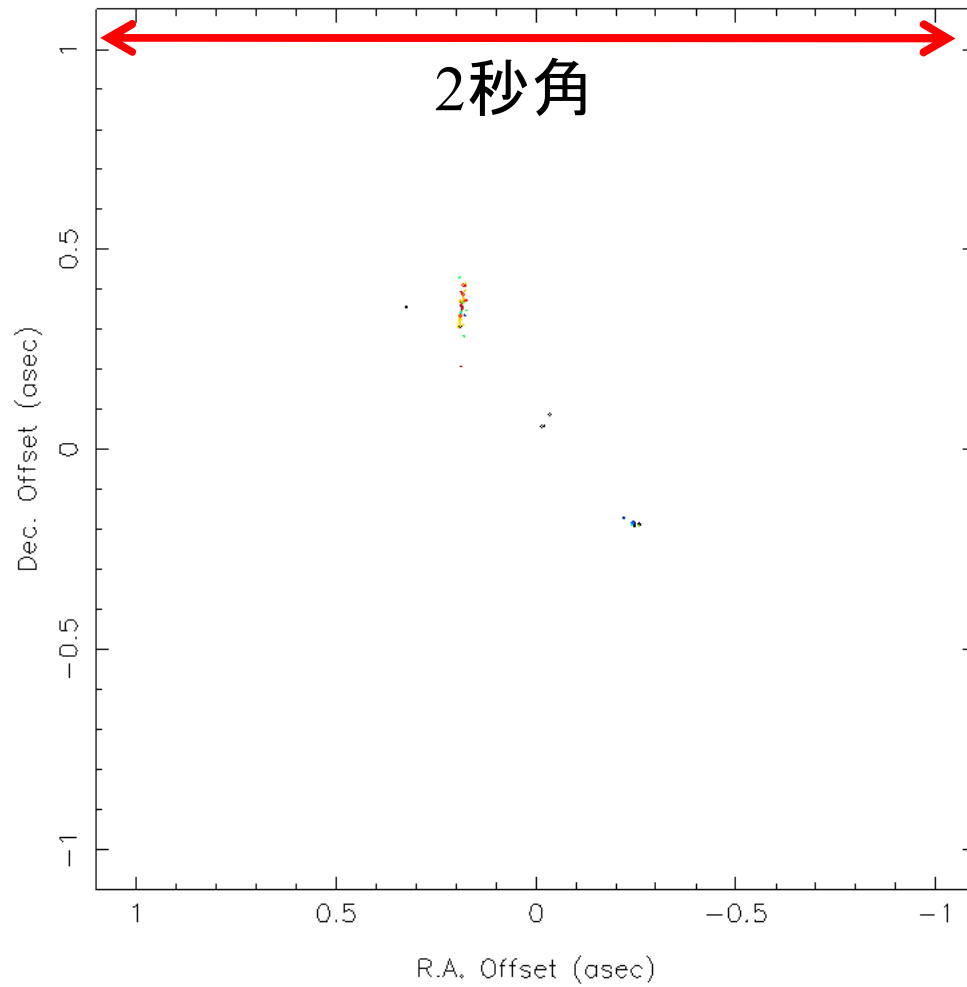
2秒角四方にメーザ源は散在。
3つは集落がある。



視線速度で8.5km/secから20.3km/secの成分を検出。

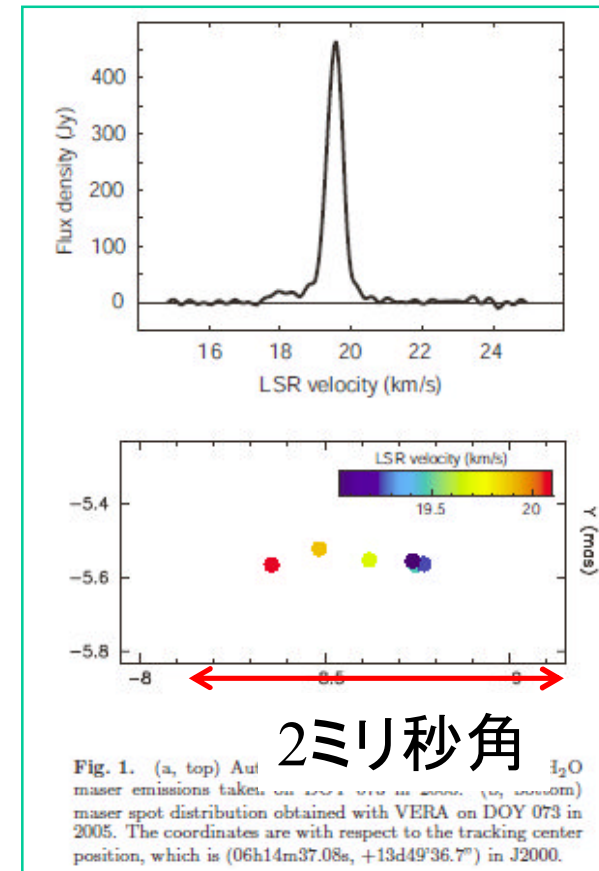
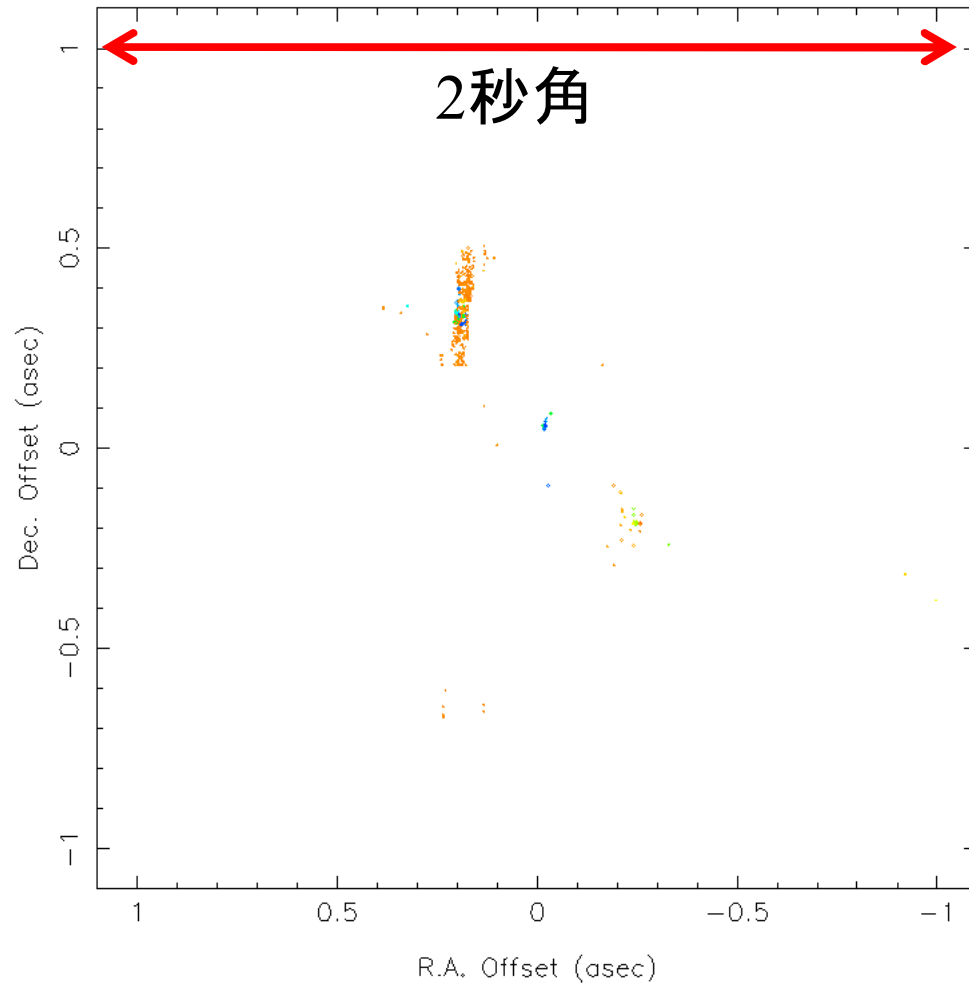
(=先行論文には記述無し)

あとで気がついたがS269マップは99年出版の論文にすでにある。



19-Mar-2009 14:38

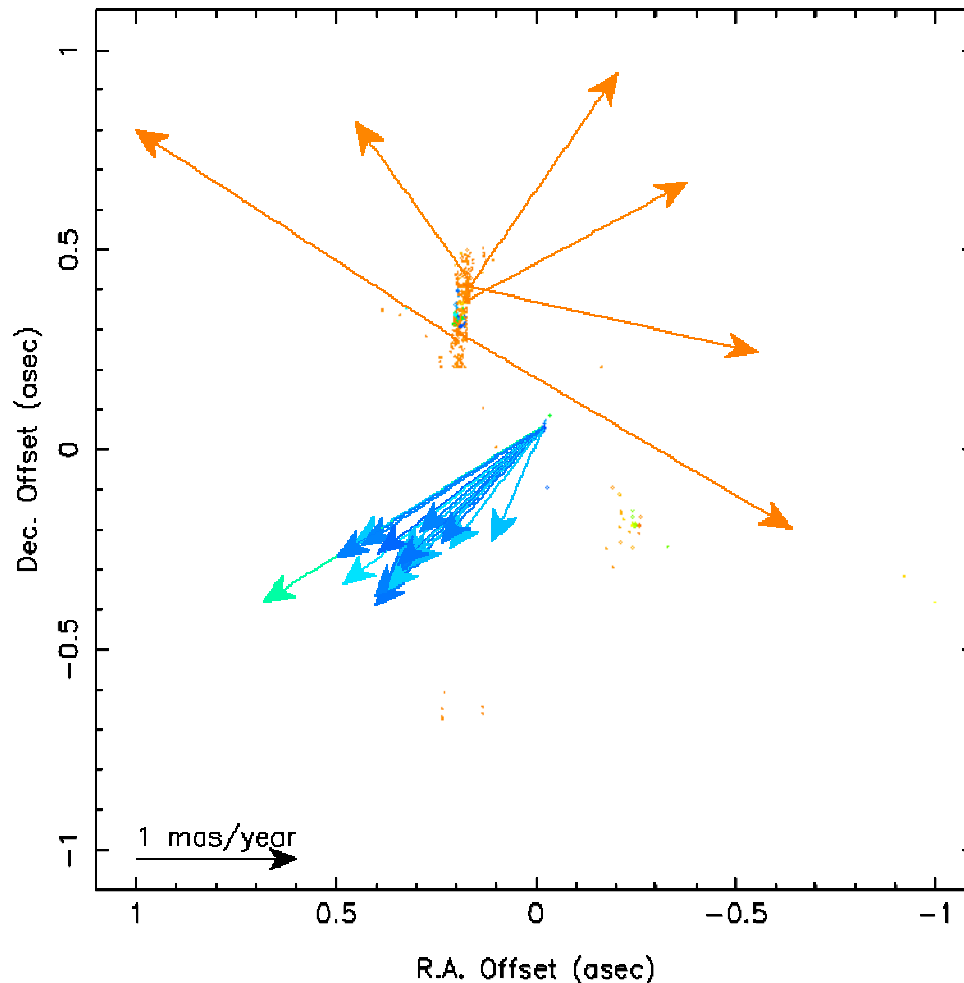
先行論文の示す速度域だけに限ってみても、構造は複雑



19-Mar-2009 14:19

6エポックの観測から、メーザスポット間の相対固有運動の検出を試みた。すると。

S269の水メーザ: その固有運動



視線速度分散
11.8km/sec

固有運動分散
1.0891mas/year
(かなり大きな
内部固有運動)

統計視差法から
S269の距離は
 $D=2.7(\pm 1.5)$ kpcと、
推定される。

19-Mar-2009 14:17

2秒角

天体名	測定者	統計視差	最近の年周視差による測定
Orion IRc2	Genzel et al. (1981)	$480 \pm 80 \text{pc}$	$437 \pm 19 \text{pc}$ (Hirota et al.07)
VY Cma	Marvel et al. (1998)	$1.4 \pm 0.2 \text{kpc}$	$1.14^{+0.01}_{-0.09} \text{kpc}$ (Choi et al.08)
S Per	Marvel et al. (1998)	$2.3 \pm 0.5 \text{kpc}$	$2.51 \pm 0.09 \text{kpc}$ (Asaki et al.09)
S269	本研究	$2.7 \pm 1.5 \text{kpc}$	$5.28^{+0.24}_{-0.22} \text{kpc}$ (Honma et al 07)

他の天体では
統計視差と年周視差は概ね誤差の範囲で一致する結果
S269では
誤差の範囲を大きく外れ、測定値は2倍の距離の相違。
‘S269;kinematic distance 2/4kpc, 測光 3kpc’
原因を今後さぐる(と学会では言っておきました)。

(まとめというより)強調点:

銀河系の観測では

若い天体の軌道(非円成分)を計測することが面白い。

銀河系内の若い天体の距離をはかるには
年周視差法ばかりではない。統計視差法もある。
結構その測定精度はよさそう。

強度(100Jy以上)からみて、銀河全域に分布する
65水メーザ天体がねらえるだろう。

年周視差法、統計視差法、両者の結果を比べてゆくこと
は距離測定の確度を増すであろう。