

星間物理学特論 part VI

今井 裕

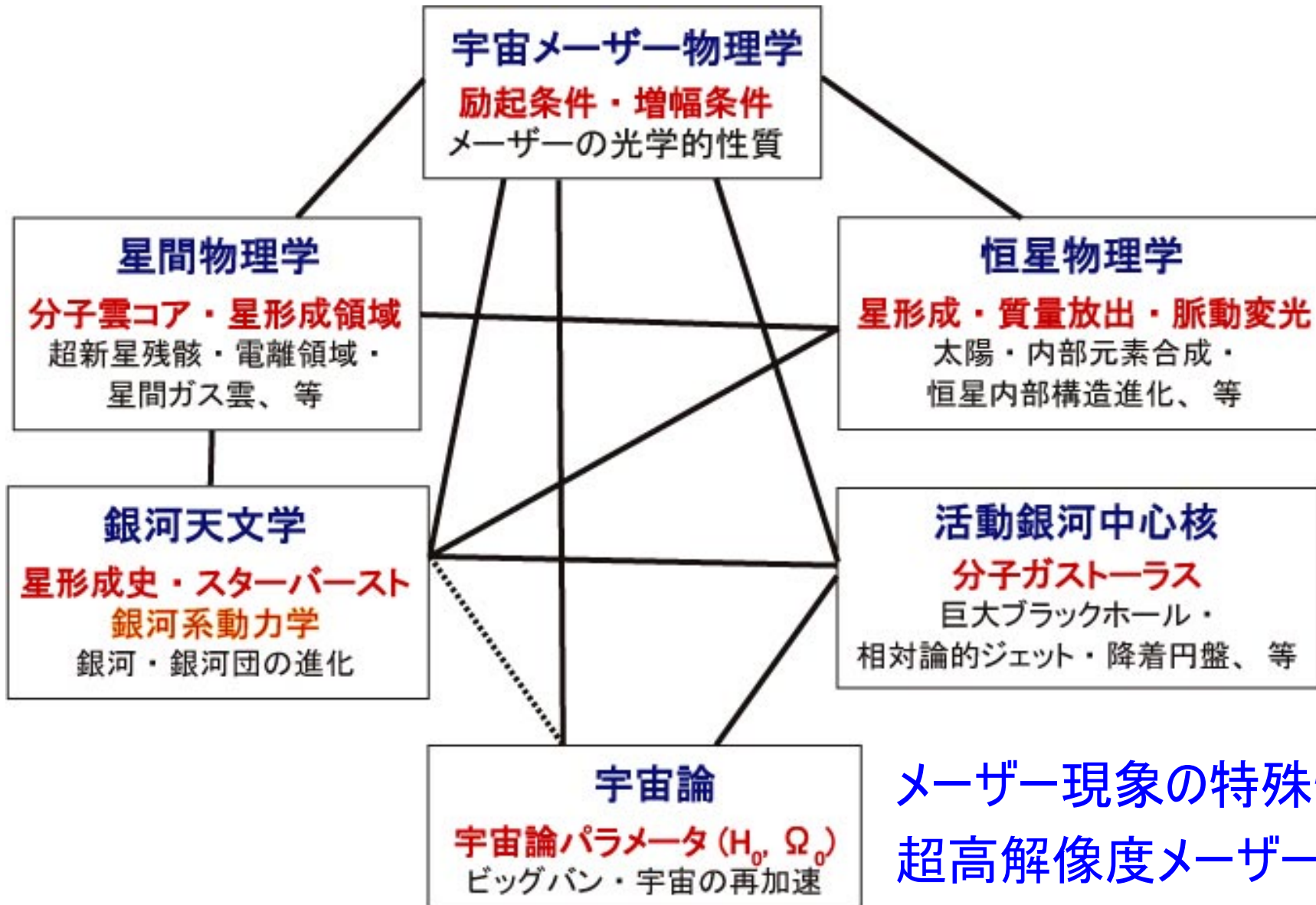
(鹿児島大学大学院理工学研究科物理科学専攻)

第7章

宇宙メーザーと銀河系・系外銀河／宇宙論

- データ点としての個々の宇宙メーザー源
 - メーザー源の性質を利用した測距法
 - 銀河系動力学構造の研究
 - 銀河系星形成史
 - 近傍銀河の固有運動
 - 宇宙論
- 宇宙メーザー源固有の問題
 - 個々のメーザー源の銀河系内軌道
 - 活動銀河中心核とメガメーザー
- メーザー物理学の最近の話題

メーザー源の捉え方によって広がる 天文学的研究テーマ



メーザー現象の特殊性
超高解像度メーザー源観測

メーザー (=星間物理現象) をプローブとした 銀河系動力学研究の特徴

年周視差・経年運動・メーザー源内部三次元運動計測に基づく

- 星形成領域の位置・運動の把握

- 銀河系渦状腕:

- 星形成が現在(**10⁵年以内**)起こっている薄い領域をトレースする?

c.f. 1. 銀河円運動をするガス雲が渦状腕を通過するタイムスケール: $\sim 10^7$ 年

c.f. 2. 銀河系ガス円盤のスケール高(~ 80 pc)を50km/sで移動する所要時間: $\sim 1.6 \times 10^6$ 年

- 銀河面円盤中の塵に埋もれた星団から多数のSiOメーザー源の検出:
星団形成の現場をトレース (Nakashima & Deguchi 2005)

- 銀河系中心:

- Sgr A*からの各スケール (1–100pc)にて多数のSiOメーザー源の検出
(Imai et al. 2002; Deguchi et al. 2004; Fujii et al. 2004)

- AGB星: 銀河系骨格(重力ポテンシャル)の測定

- AGB星: 寿命は relaxation time scale ($\sim 2\pi R_{\text{Gal}}/V_{\text{rot}}$) 以上
- 「星円盤」が広がっている範囲には何処にでもあるはず

- 星周ガス・星間ガスの性質から「銀河系の歴史」を解明

メーザーをプローブとした銀河系動力学研究の課題

- メーザー源の数が圧倒的に少ない
 - その他大勢の星々とは異なる特殊なもの／振舞いを見ているかもしれない
 - 統計量を精度良く測定するにはあまり向いていない
- メーザー源分布の偏在化／局在化
 - 探求したい天体に存在するとは限らない： 銀河系ハロー？
- 観測手法における限界
 - 視野： 相関器の積分時間 (accumulation period) で決まる (< 望遠鏡視野)

For 22GHz H₂O

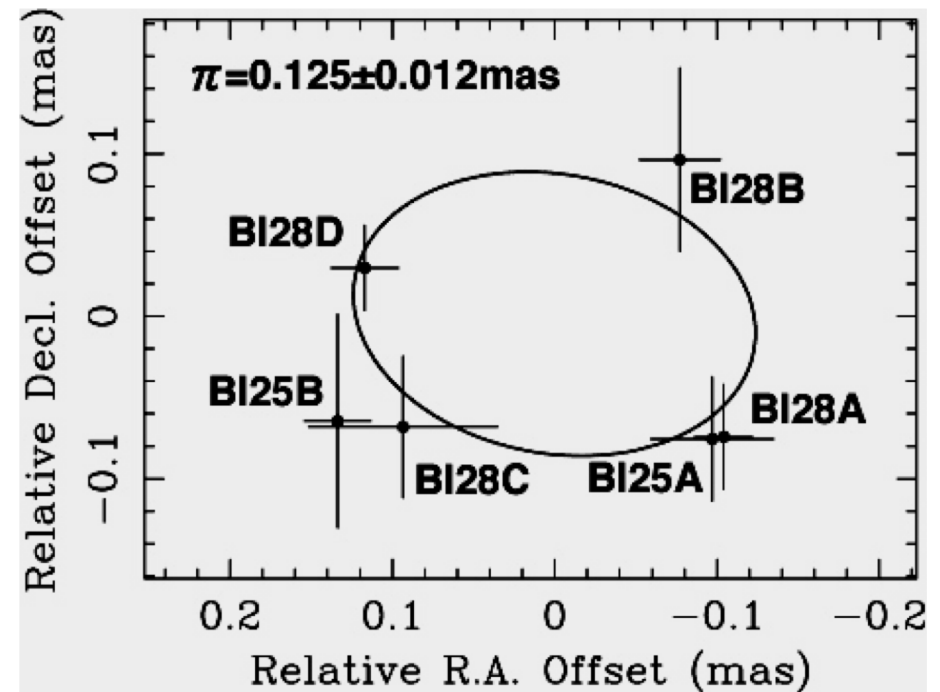
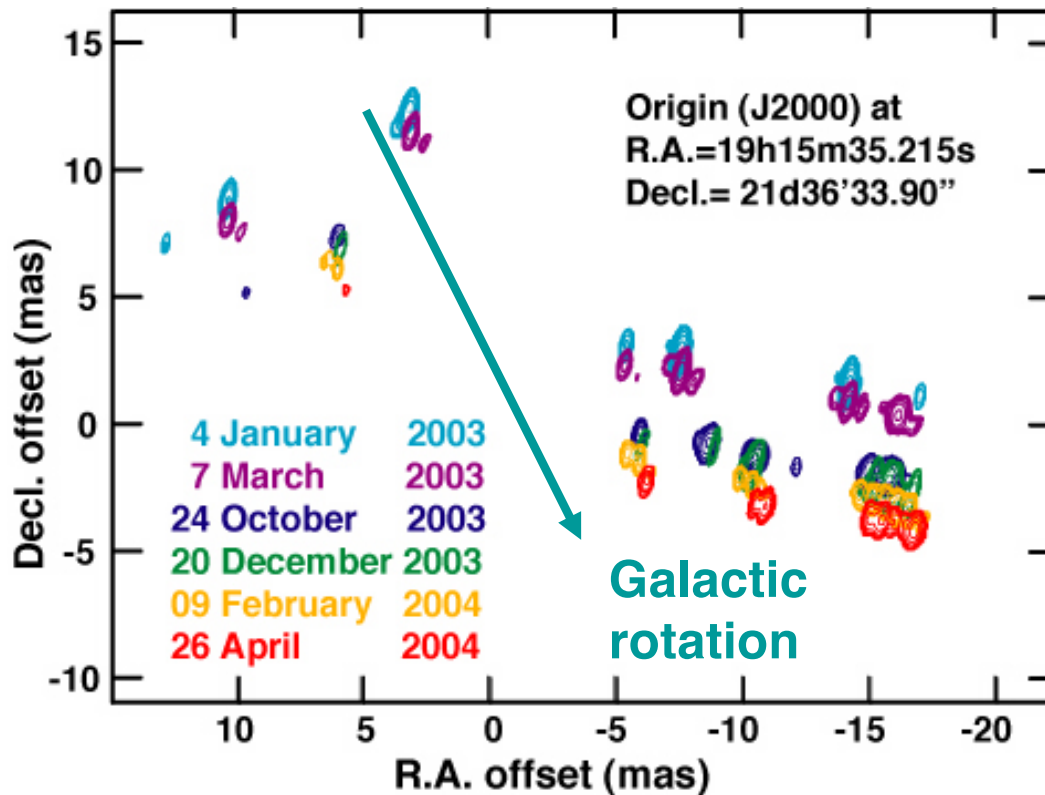
$\Delta s \sim 3''.5$ (1000km baseline)

$$\Delta\phi[\text{rad}] \approx 2\pi\nu \frac{dt}{dt} \Delta T \approx \left| 2\pi\nu \frac{\omega_e D \cdot \Delta s}{c} \Delta T \right| \approx |2\pi\omega_e D_\lambda \Delta s \Delta T| < 1$$
$$\Delta\phi[\text{arcsec}] < \frac{1}{2\pi\omega_e D_\lambda \Delta T} \approx 4.5 \times \left[\frac{D}{1000\text{m}} \right]^{-1} \left[\frac{\lambda}{1\text{cm}} \right] \left[\frac{\Delta T}{\text{sec}} \right]^{-1}$$

- Image cube (描ききれないこともある) : ~1000分光点, 10,000グリッド四方
- 観測効率: horizon-horizon 観測が標準、最低4時間観測が必要
(望遠鏡配置、地球時点速度によりこれ以上短くできない)
- VLBI 位相補償: 参照電波源-メーザー源離角の制限(だいたい<3°)

メーザー源の性質を利用した測距法

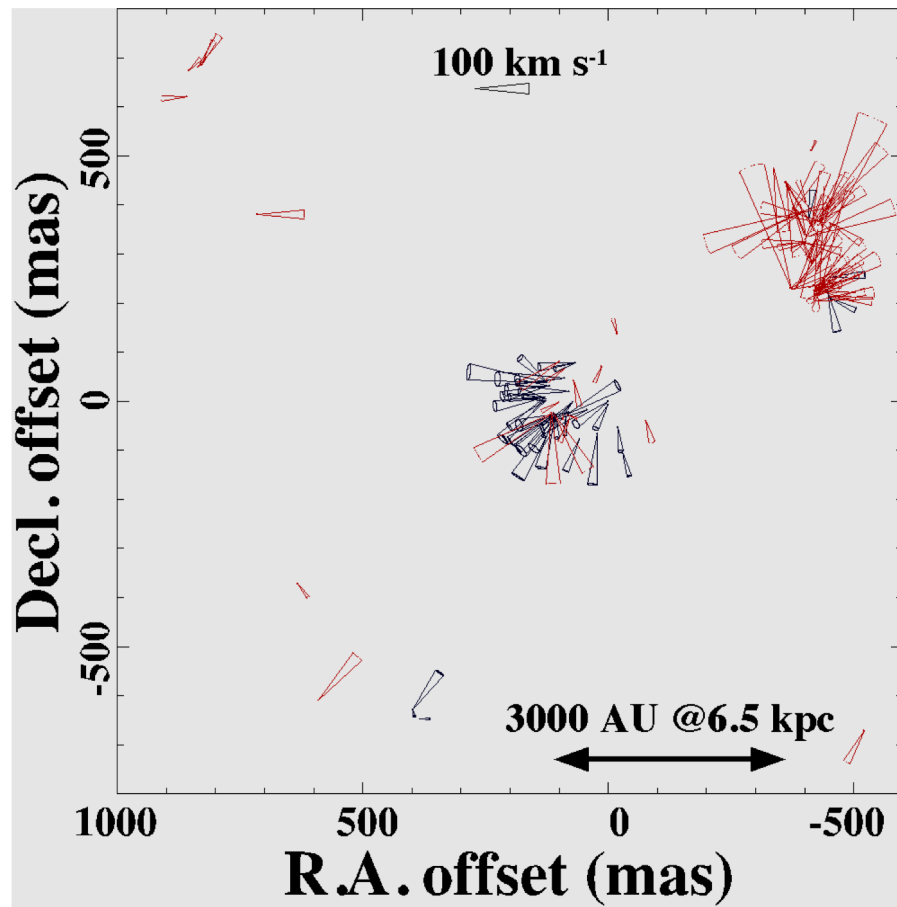
- 年周視差法: 20 kpcくらいが限界?
 - メーザースポットの寿命と数が精度を握る
 - 2008年8月時点の世界記録:
 $D=8.0^{+0.9}_{-0.7}$ kpc for IRAS 19134+2131 (Imai, Sahai, & Morris 2007)



メーザー源の性質を利用した測距法

- 統計視差法: 1 Mpc くらいまで
 - メーザースポットの運動が等方的か完全ランダムかを仮定
 - 測定量は視線速度 / 相対固有運動の分散

最初の大雑把な距離推定に



W51 North

採用する方法によって
7.2–8.3 kpc の間で値が変わる

モデルフィット法では 6kpc

(Imai et al. 2002)

メーザー源の性質を利用した測距法

- モデルフィット法: 100 Mpc くらいまで?
 - 仮定したモデルの中に距離をフリーパラメータとして入れる
 - 膨張フローモデル:
 - 星形成領域や変光星H₂Oメーザー源に適用
 - ケプラー回転円盤モデル: メガメーザー (e.g. NGC 4258)

H₂O Megamaser Cosmology Project を参照

- モデルの信頼度で精度が決まる
- フィッティングの自由度 N_f が多いほどモデルの信頼度が高い
- フィッティング残差 χ^2 が小さいほどモデルの信頼度が高い

$$N_f = 3N_{pm} - N_{fp}$$

N_{pm} : 固有運動データ数 (三次元速度ベクトル)

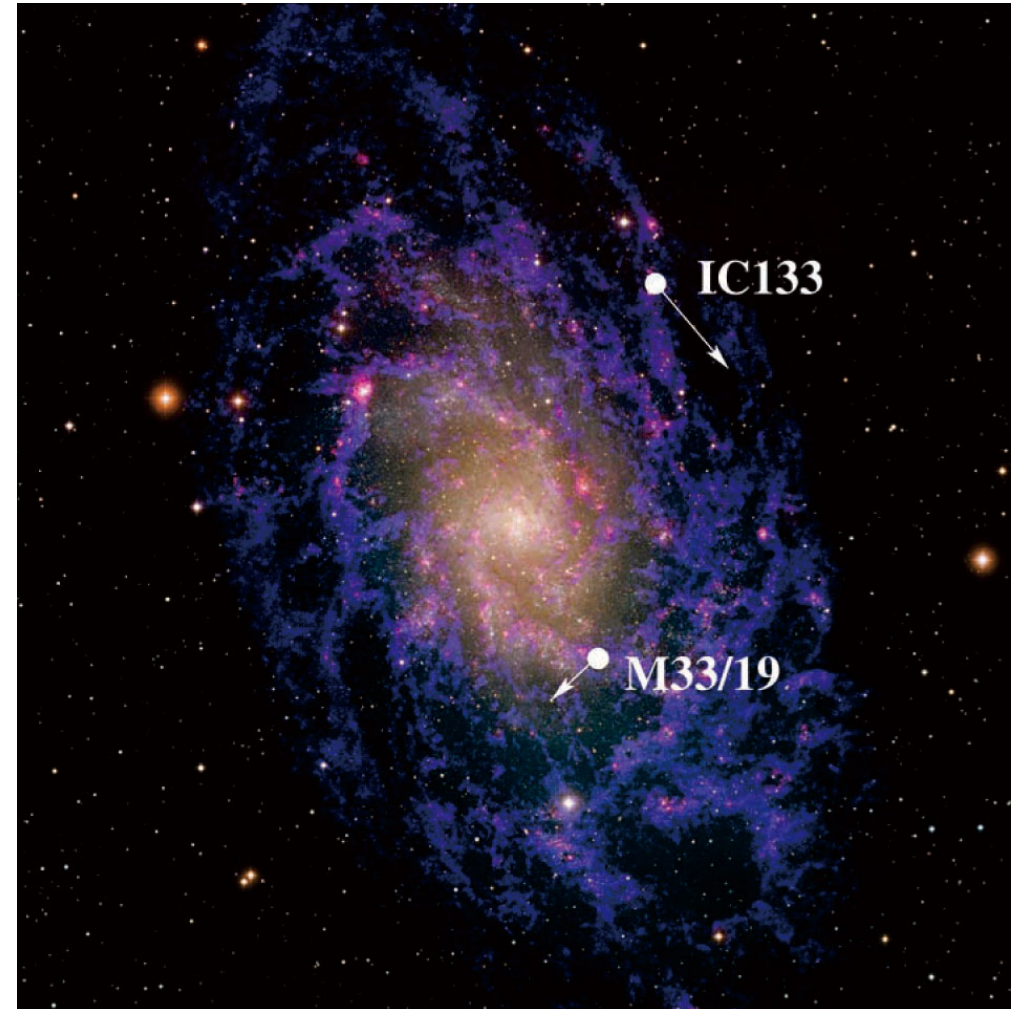
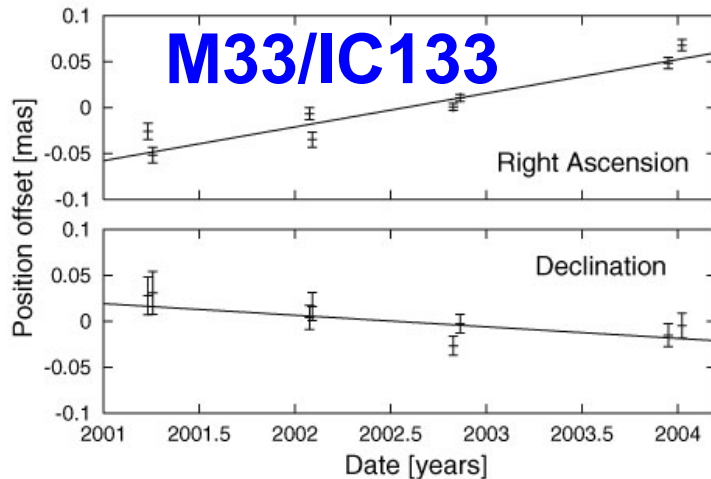
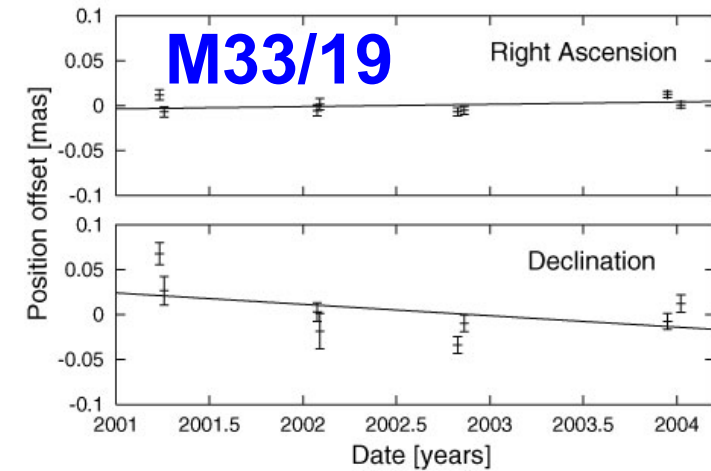
N_{fp} : フリーパラメータ数

- 各メーザースポットの位置の扱い
 - 充分高精度で測定されており、位置自体は不動(ほとんど変化なし)とする
 - 各スポットの位置も時間の関数として扱う: フリーパラメータ数が膨大に

メーザー源の性質を利用した測距法

- 銀河回転視差
 - 銀河回転速度場が既知
 - 銀河回転に乗ったメーザー源の三次元運動を検出

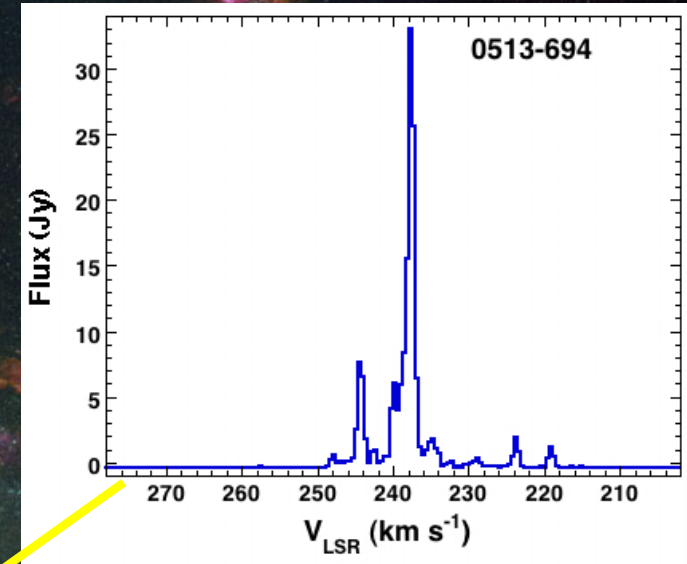
長寿命メーザースポットの存在が前提



M33: $D = 730 \pm 135 \pm 100$ kpc
(Brunthaler et al. 2006)

銀河回転視差の次の標的：大マゼラン雲

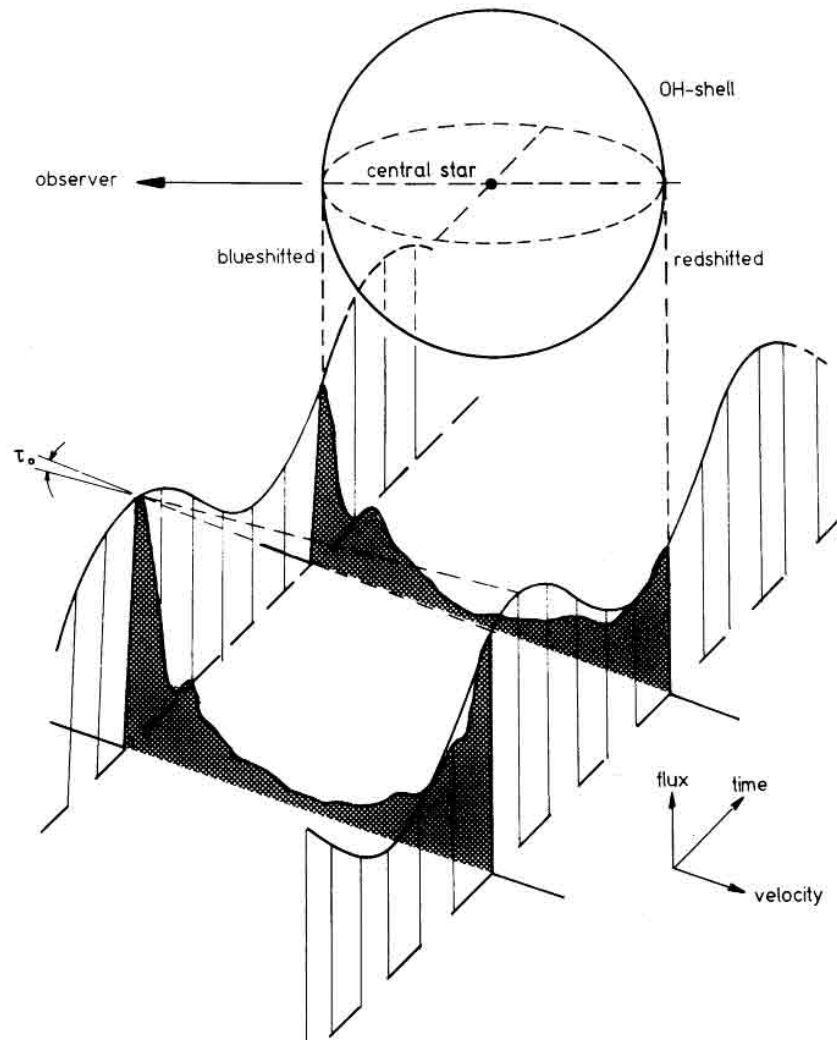
- ATCA archived data (C901, C973) analyzed by Y. Katayama
- 13 fields
- 15 regions in total
 - Annual parallax ($\sim 20 \mu\text{as}$)
 - Galactic rotation parallax ($70 \text{ km/s} \Rightarrow \sim 300 \mu\text{as/yr}$)
 - Model fitting to internal motions ($10 \text{ km/s} \Rightarrow \sim 40 \mu\text{as/yr}$)



http://www.noao.edu/image_gallery

メーザー源の性質を利用した測距法

- 1612MHz OHメーザーにおける膨張視差法
 - ダブルピークスペクトル上の時間差と視サイズの計測



van Langevelde et al. (1990)

Table 3. Distances and luminosities of stars for which an accurate phase lag was determined and for which a measurement of the angular size was available. References are: 1. Herman et al. (1985), 2. Herman and Habing (1985), 3. Baud (1981), 4. Chapman et al. (1984), 5. Diamond et al. (1985), 6. Chapman (1985), 7. Steeman et al. (1989)

Name	D (kpc)	σ_D	L ($10^3 L_\odot$)	σ_L	Ref.
WX PSC	0.74	0.15	39.4	16.0	3
20.7+0.1	5.06	1.38	5.9	3.2	1
21.5+0.5	8.51	1.41	96.9	32.1	1
21.5+0.5	7.34	1.38	72.1	27.1	6
26.5+0.6	1.44	0.27	21.6	8.1	1
26.5+0.6	1.30	0.35	17.6	9.5	5
28.7-0.6	1.45	0.49	6.1	4.1	7
32.0-0.5	11.87	2.70	67.2	30.6	1
32.8-0.3	5.02	0.25	23.1	2.3	1
35.6-0.3	4.21	1.70	5.8	4.7	7
39.7+1.5	2.04	0.50	36.3	17.8	2
39.7+1.5	0.98	0.34	8.4	5.8	5
44.8-2.3	1.13	0.34	4.3	2.6	2
104.9+2.4	2.30	0.40	11.7	4.1	2
127.9-0.0	2.90	0.60	56.8	23.5	2

メーザー源観測に見る銀河系星形成史

- OHメーザーシェル膨張速度の偏在性

(Sjouwerman et al. 2000)

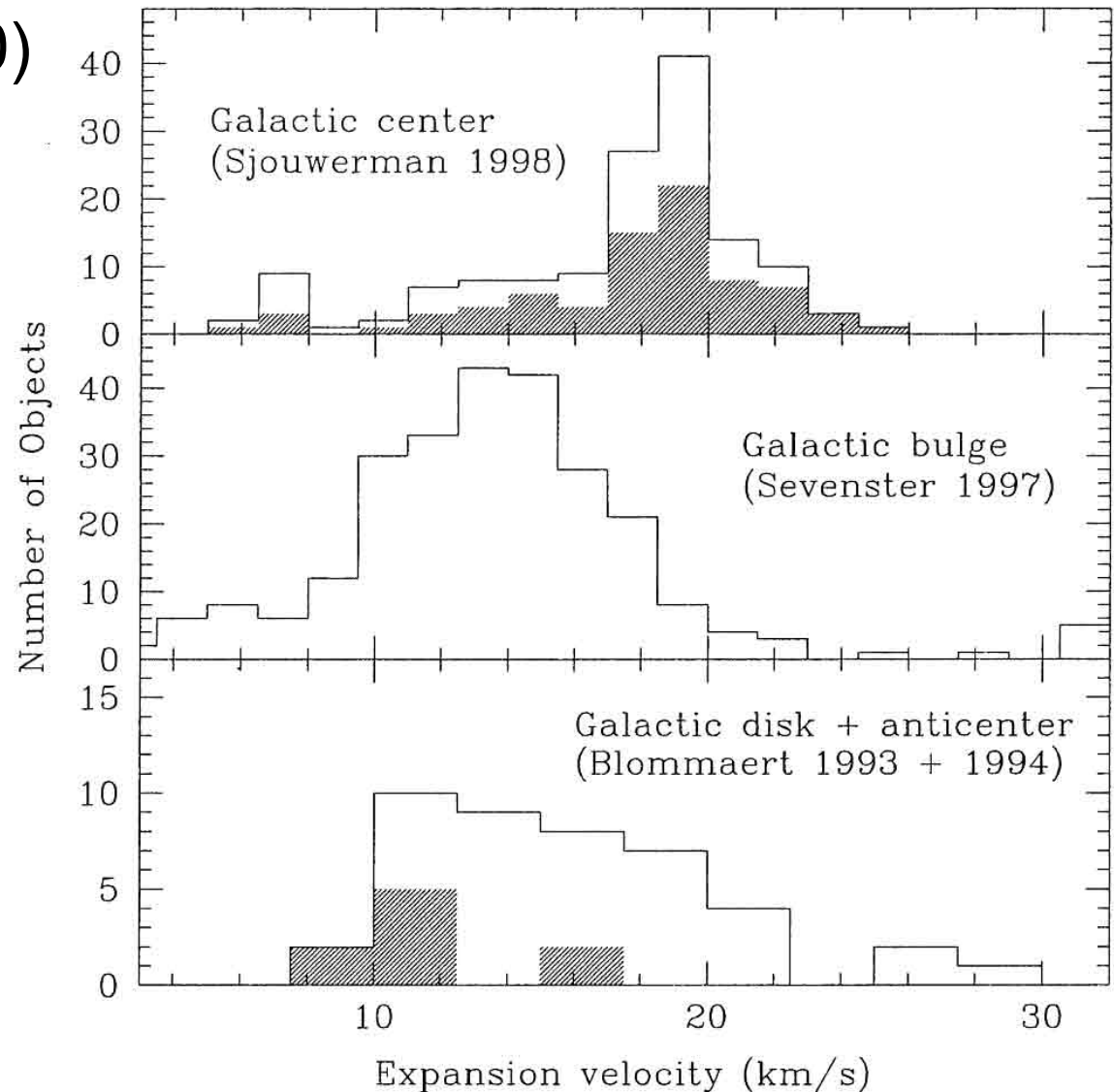
- 膨張速度はOH/IR星の光度(恒星質量と相関)と相関あり

※精密な検証は必要

- 銀河系中心には比較的大質量の星が偏在

- 鋭い膨張速度ピーク
銀河系中心に見る最近起きたスターバースト(爆発的星形成)

Galactic OH/IR star v_{exp} distributions



銀河面に埋もれていた大質量星団中のSiOメーザー源群 (Nakashima & Deguchi 2006)

- 赤色超巨星に付随：微妙に年齢の異なる大質量星からの質量放出の差異の研究へ
- 大質量星団中の並進運動や内部運動の計測：現在の星形成の現場($T < 10^5$ 年)と数世代前の星形成の現場($T \sim 10^7$ 年)との間の星団形成過程の比較が可能へ

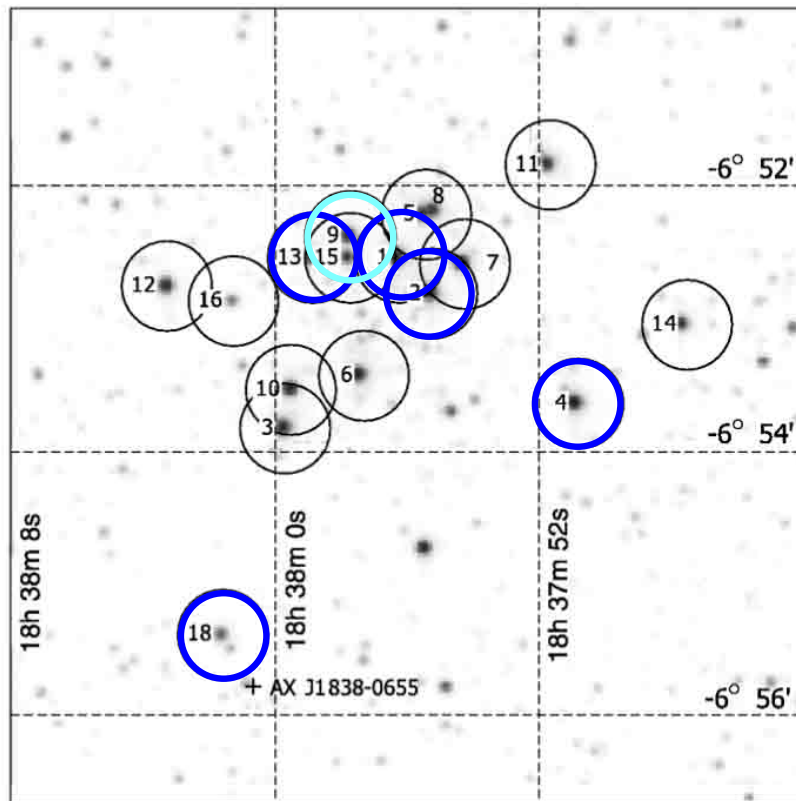


FIG. 1.— Observed positions and telescope beam areas (HPBW = 40") overlaid on the 2MASS image toward the Scutum star cluster (6' × 6'). The numbers 1–16 indicate the objects F01–F16, and 18 is for X18.

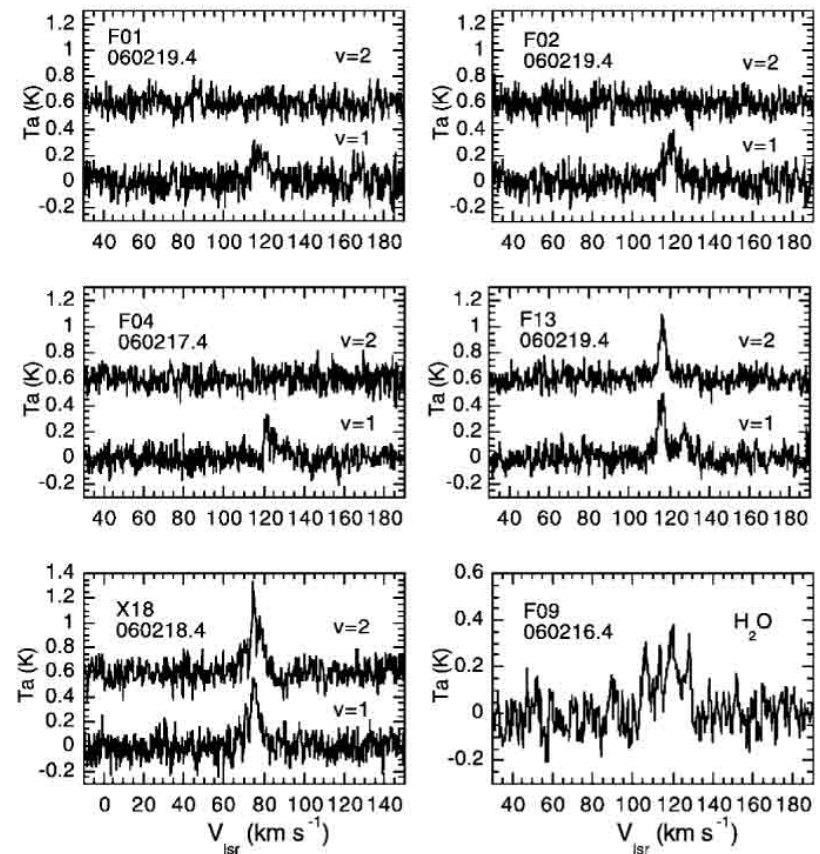


FIG. 2.— Spectra of the SiO $J = 1-0$, $v = 1$ and $v = 2$ transitions, except for the bottom right panel, which shows the $\text{H}_2\text{O } 6_{16}-5_{23}$ transition. The object ID and date of observation (in *yymmdd.d* format) are shown at upper left in each panel. The H_2O maser emission detected in the pointing toward F09 is likely to have come from object F13 (see text).

銀河系中心のメーザー源集団の検出

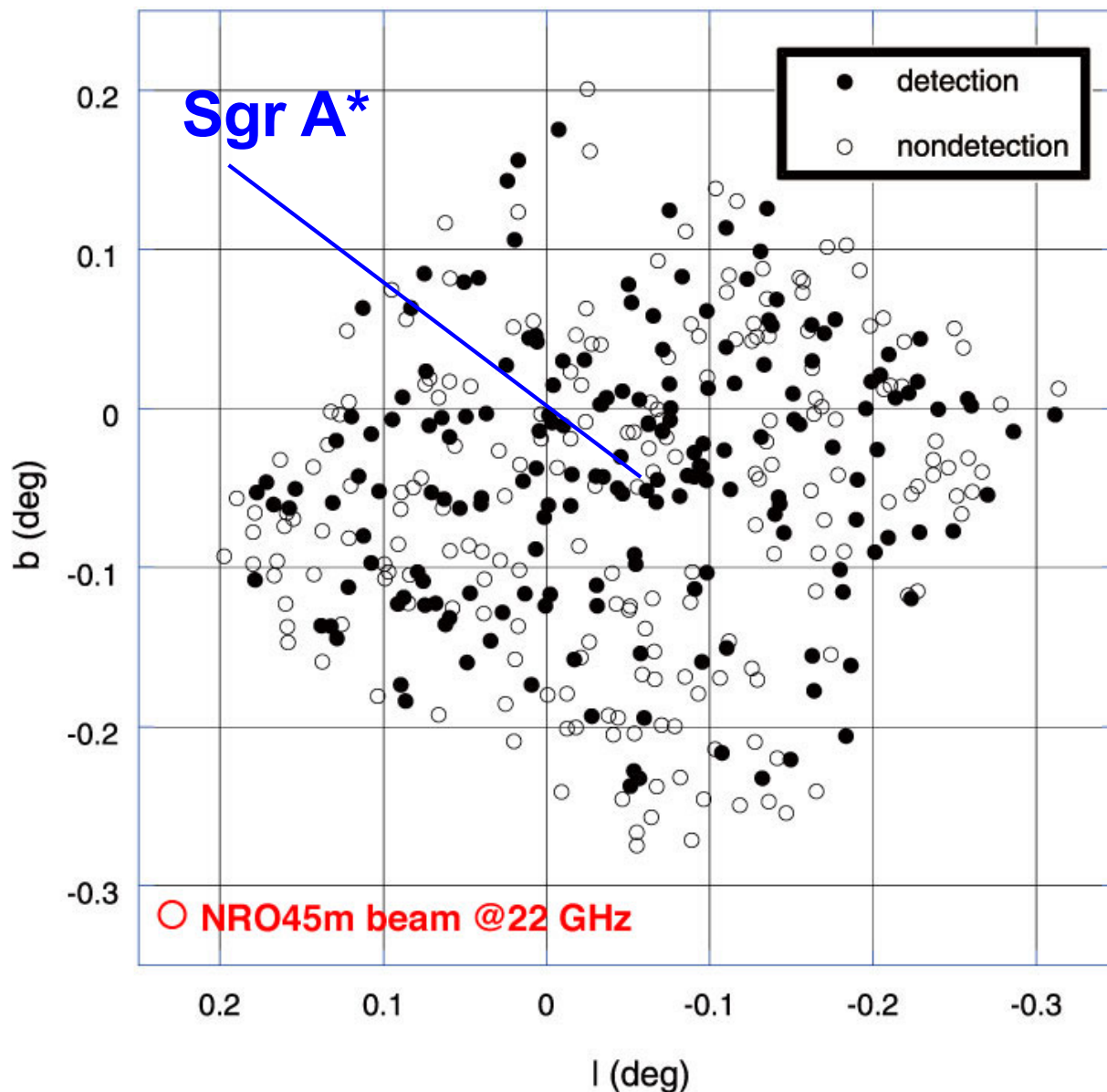
(Imai+2002; Deguchi+2004)

離角 0° .3 (~40pc)内に
SiOメーザー源179個

銀河系中心に向かって集
中($\Sigma \propto r^{0.7}$)

**Sgr A*周囲でVLA
ビーム以内には15個
(Reid+2007)**

同じ領域に
**H₂Oメーザー源~20個
があるはず**

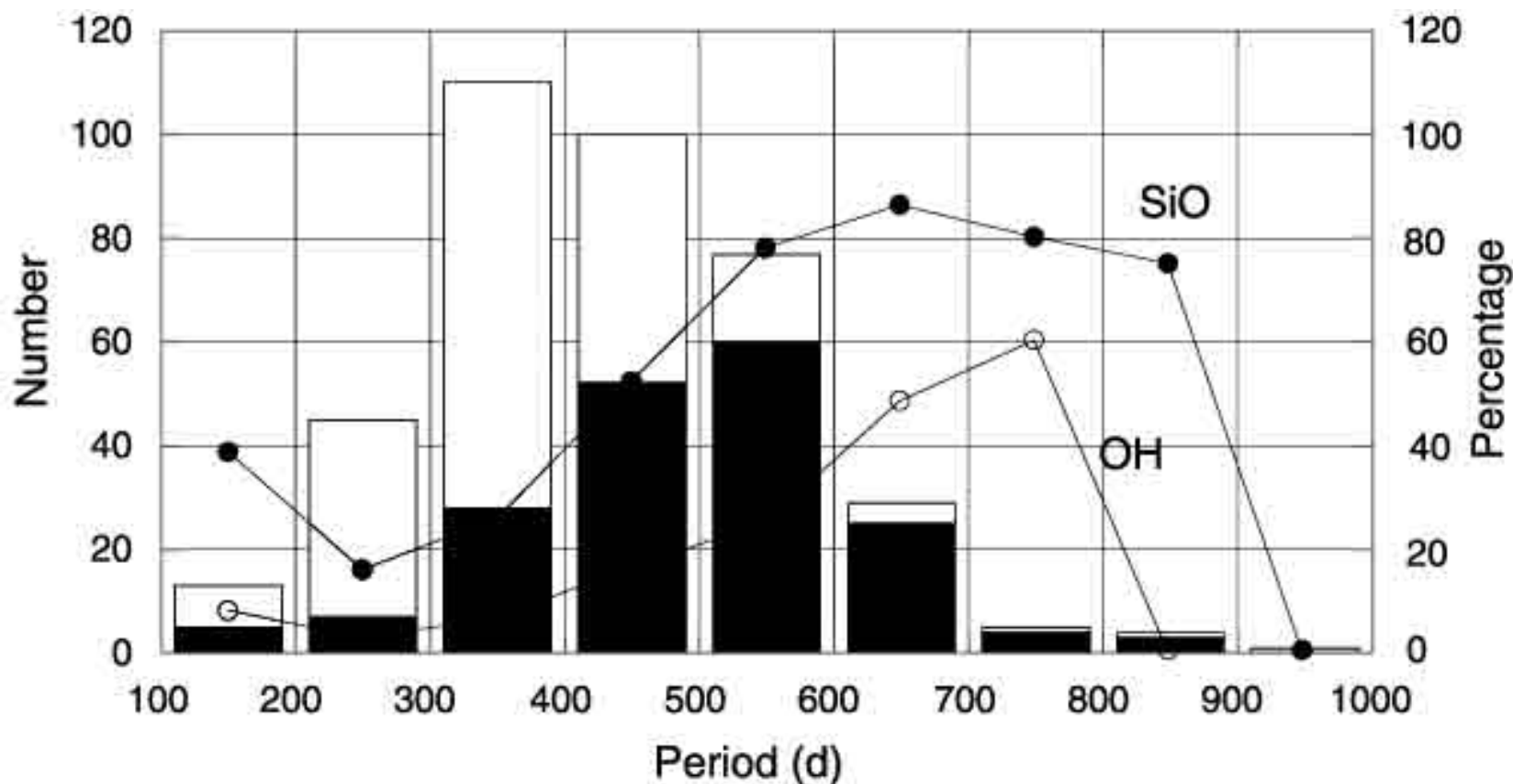


銀河系中心のメーザー源集団の性質

(Imai+2002; Deguchi+2004)

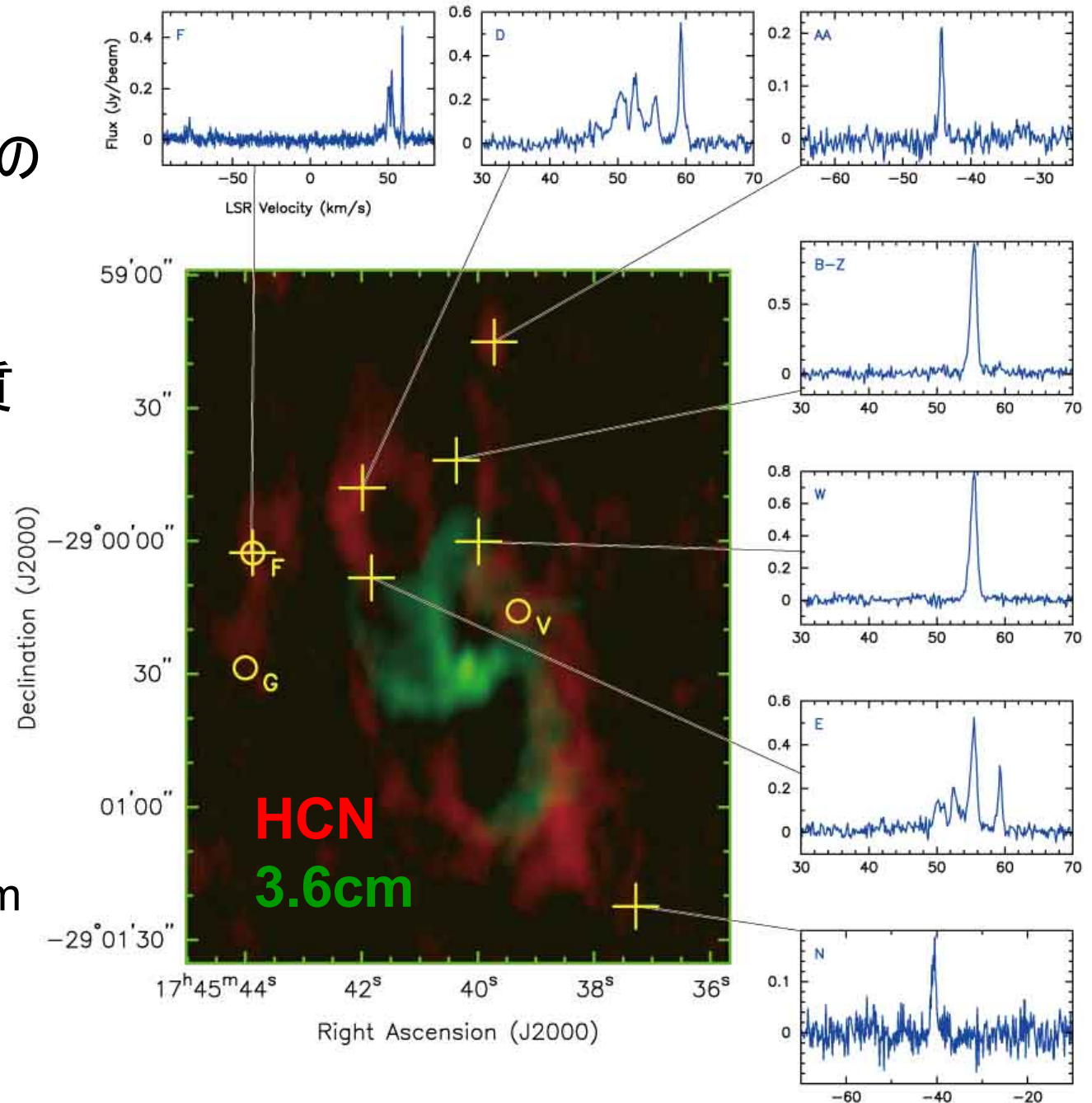
- 脈動変光周期に比例した検出率
- 脈動変光周期が $300\text{d} < P < 700\text{d}$ に集中して検出が集中
比較的長周期(～大質量)の変光星からも多数検出
- 課題: 長周期($P > 700\text{d}$)変光星の存在場所と運動

比



銀河系中心のメーザー源集団 (Yuzef-Zadeh et al. 2008)

- ミニスパイラル外縁 での星形成を示唆
- ミニスパイラルへの 質量供給を直接捉えてみたい
- 同一望遠鏡視野に複数のメーザー源
 - $\theta \sim 70''$ in NRO 45m
 - $\theta \sim 150''$ in VERA 20m



メーザー源は弱い(<1Jy)

メガメーザー

- 銀河系内のメーザー放射の100万倍以上のエネルギー放出

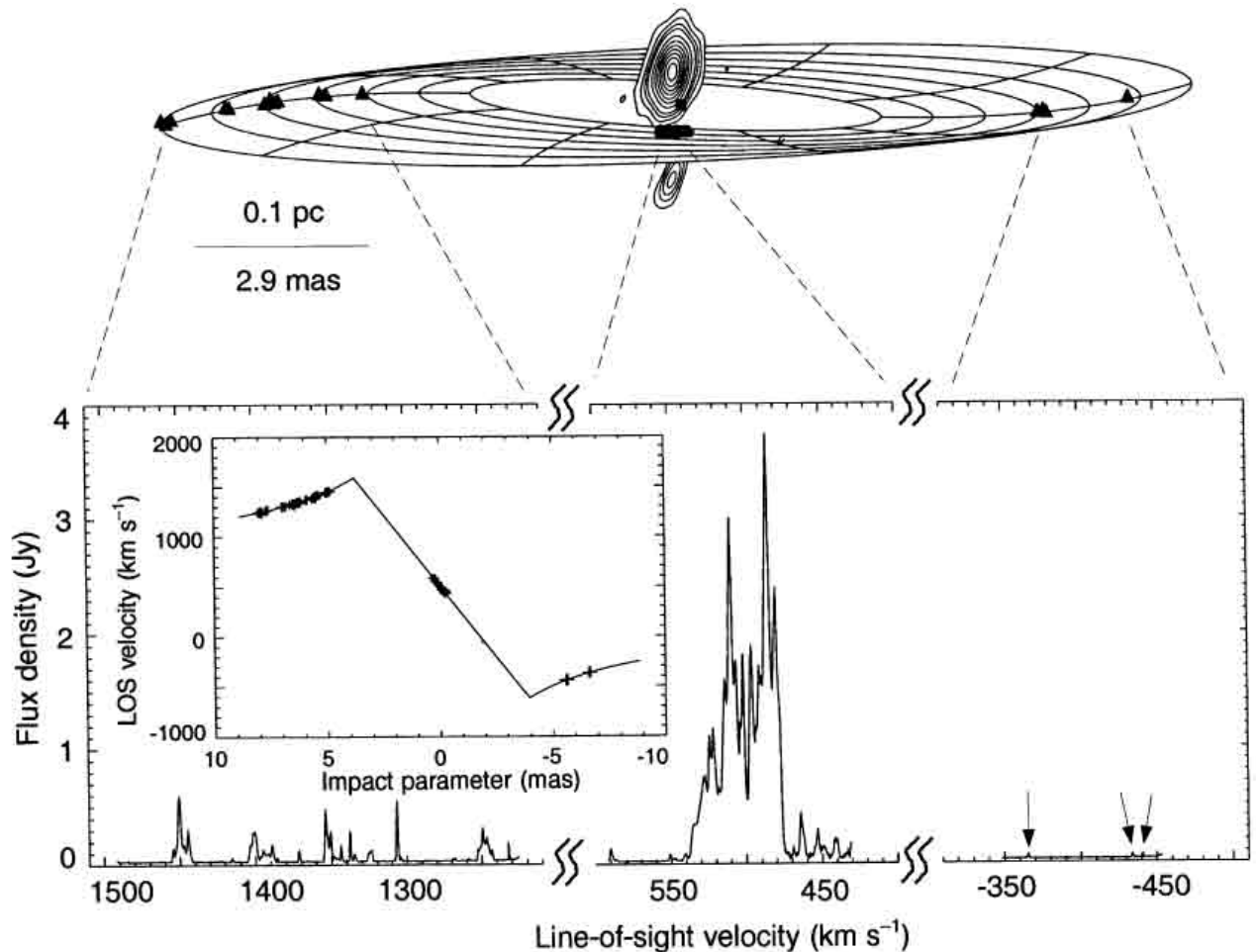
c.f. H₂Oメーザーの場合は10³倍以上でも「メガメーザー」と呼んでいる

$$L_{\text{H}_2\text{O}} \sim 0.1 L_{\text{sun}} \text{ in W49N}$$

- OHメガメーザーはスターバースト銀河で検出 (e.g. Arp220)
 - 加熱された(~100K)分子ガスが広く分布
 - 遠赤外線放射によるメーザーが励起・増幅されやすい
 - 輝度分布が比較的説明しやすい
 - H₂Oメガメーザーは活動銀河中心核を取り巻くガス円盤／トラスに付随
 - 増幅され易い円盤面が視線方向と平行 (edge-on)の場合に観測されやすい
 - Narrow line Seyfert (Seyfert II)銀河で検出され易い
- 速度幅が大きい活動銀河中心核(AGN)が周囲の高密度ガスで隠されている

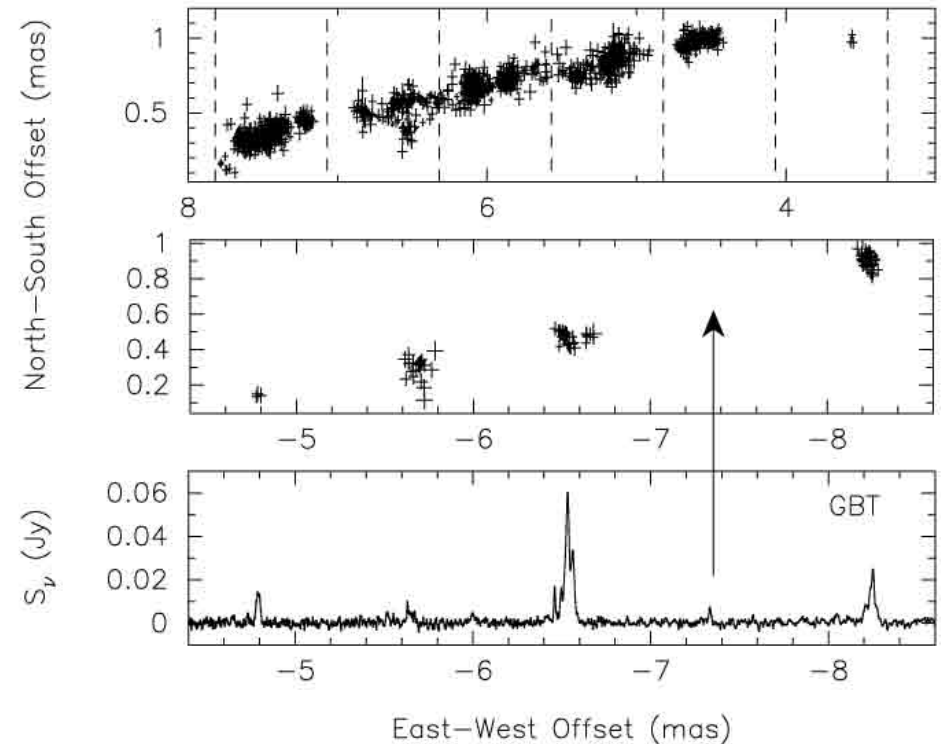
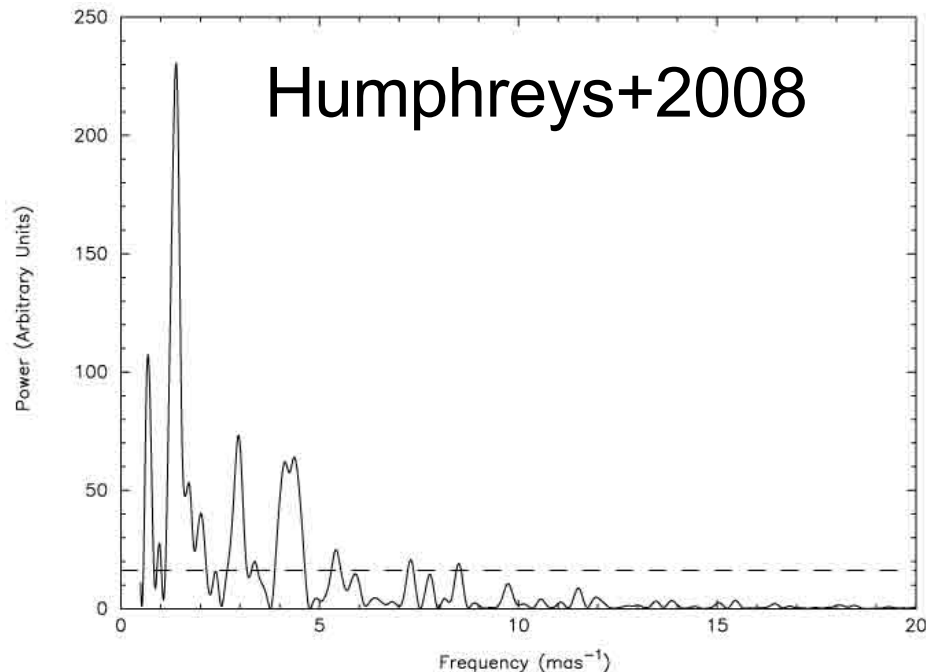
NGC4258 H₂Oメーザーの略歴

- 本体発見(Claussen+ 1984)
- 高速度成分発見(Nakai+ 1993)
- 中央成分視線速度ドリフトの発見 (Hachick+ 1994; Greenhill+1995)
- BHの直接的証拠
(Miyoshi+ 1995)
- 距離測定法確立
(Herrnstein+ 1999)
- ジェット検出
(Herrnstein+ 1999)
- Cosmology Project
(Humphreys+ 2004)



NGC4258 H₂Oメーザーの特徴

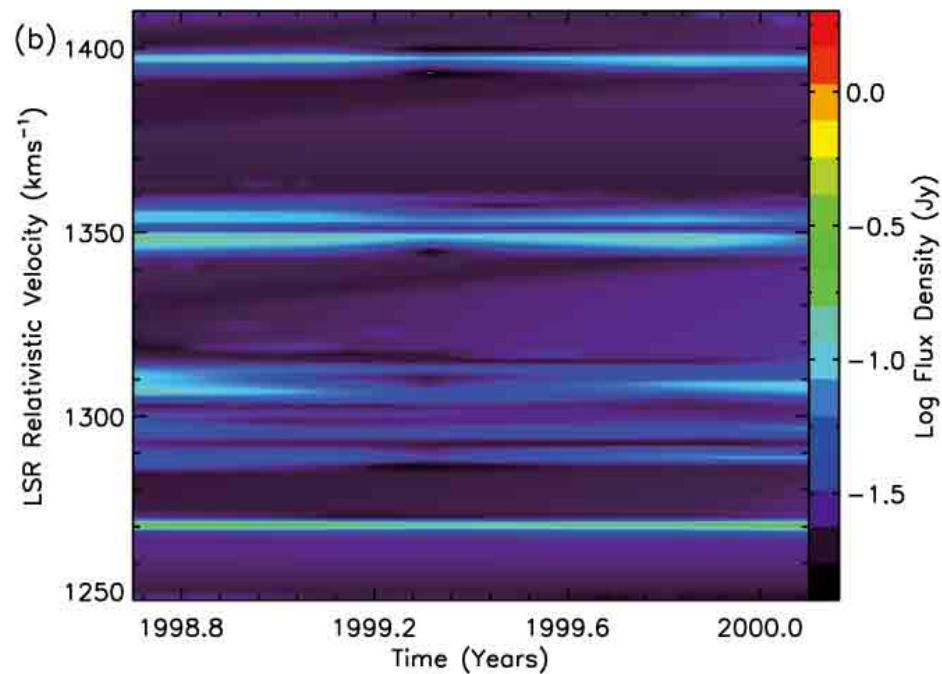
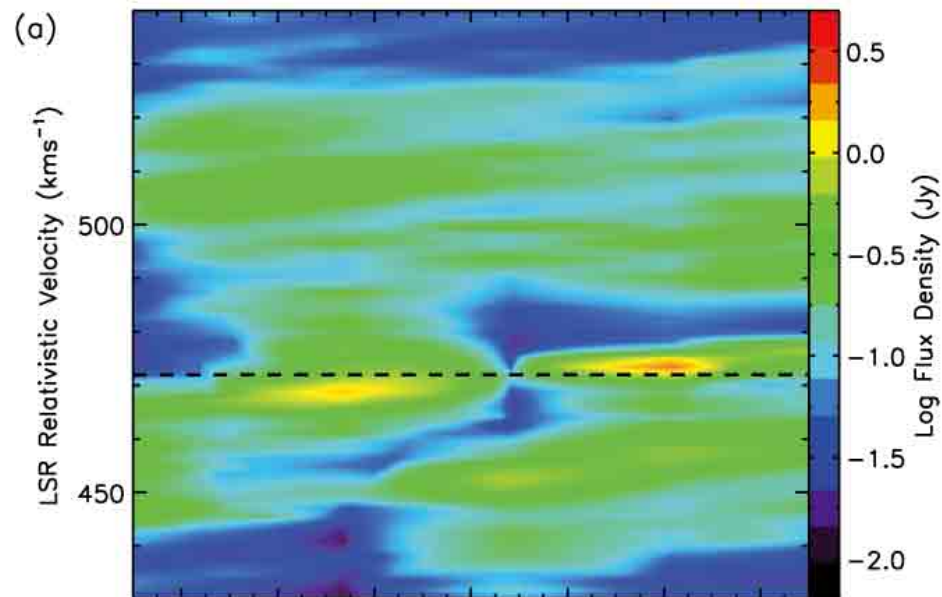
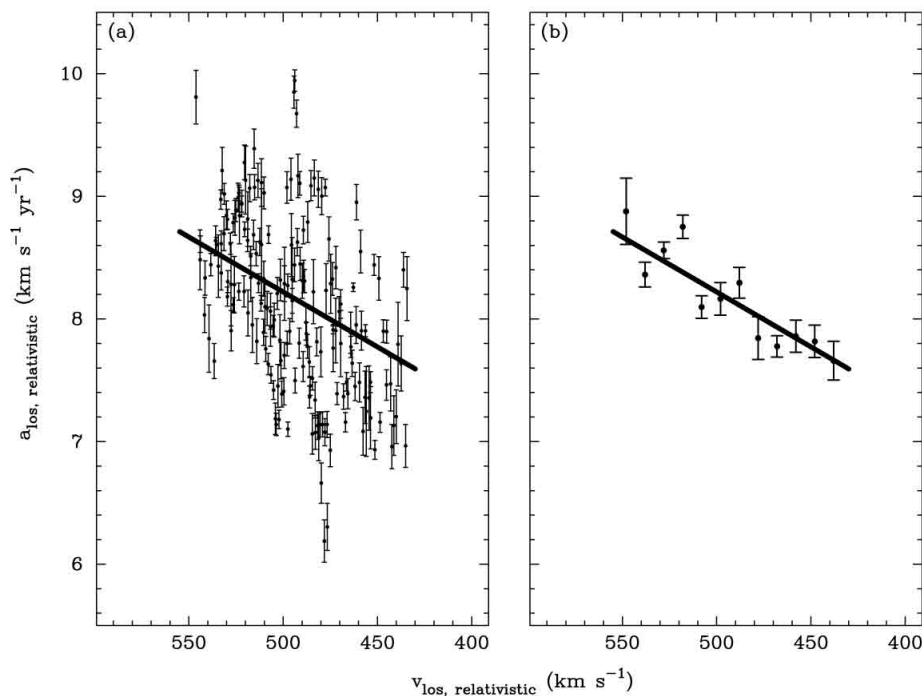
- 銀河回転の軸とは全く方向が異なるメーザー円盤の軸
- 非常に薄い(円盤直径の1/100程度)
- 速度の乱れも少ない(回転速度の1/100程度)
- 円盤はたわんでいる(warp)
- メーザースポット分布に周期的パターンが見られる



NGC4258

H₂Oメーザーの特徴

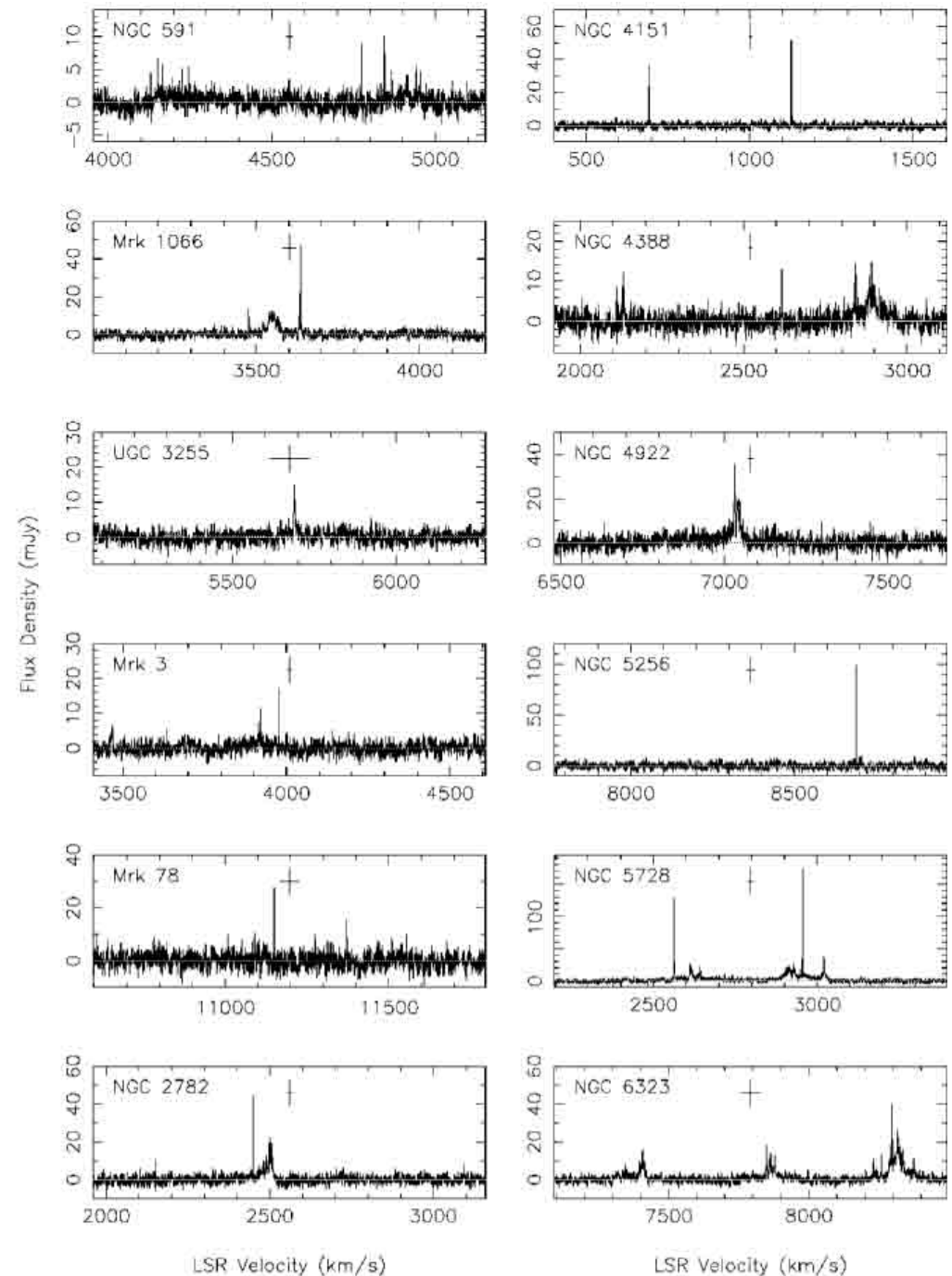
- 視線速度ドリフト
 - 中央成分: $\sim 8 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
- 東西方向にドリフト量に勾配が見られる
- 赤方偏移成分: $\sim 0.0 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
 - 青方偏移成分: $\sim 0.2 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$
- 円盤中心を通る天球面よりも手前？
円運動からのずれ？



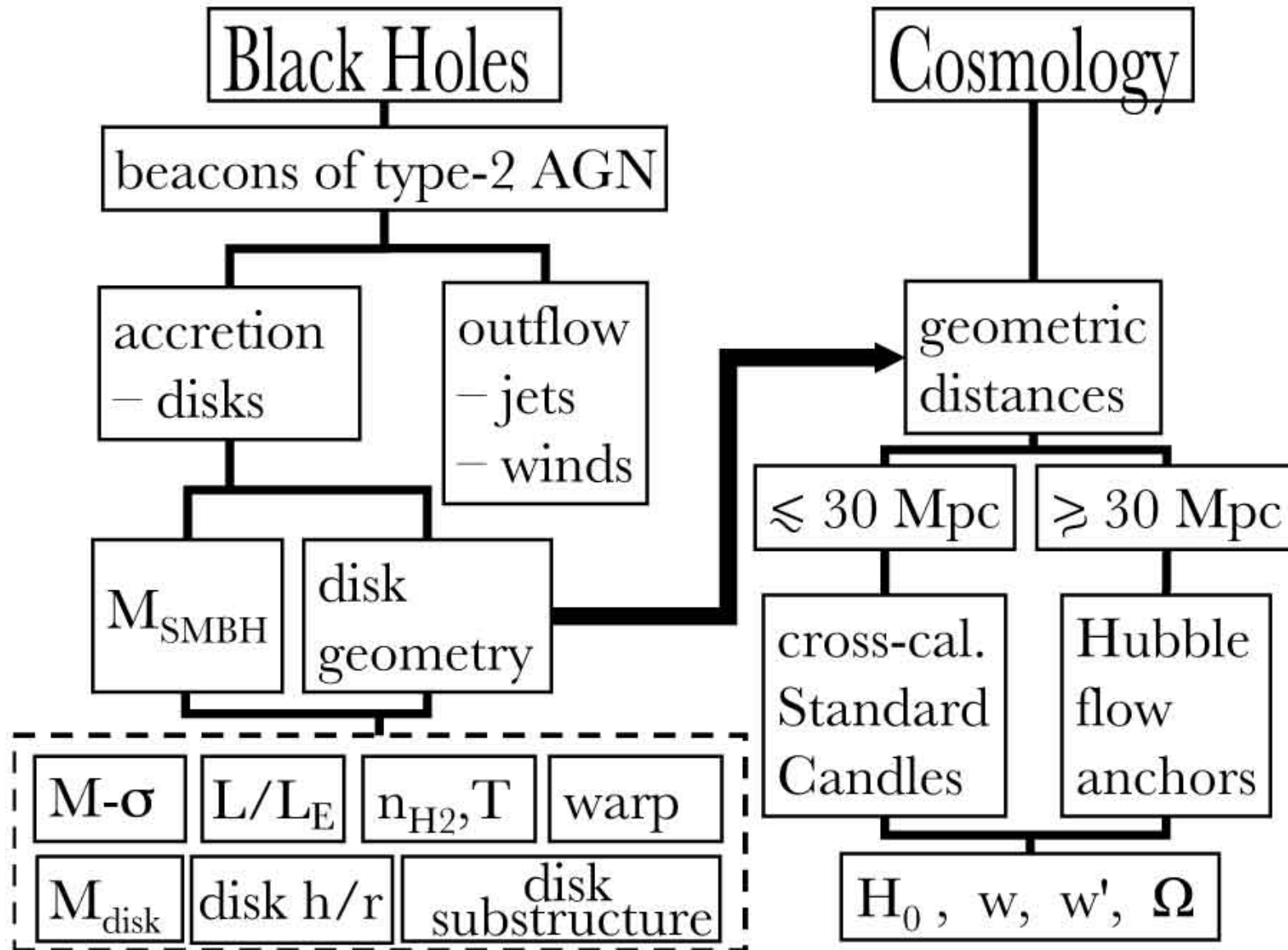
Humphreys+2008

Megamaser Cosmology Project (Braatz et al.)

- GBTでメーザー源探査
($\sigma \sim 1 \text{ mJy}$)
- GBTで視線速度ドリフトの計測 ($\sigma \sim 1 \text{ km/s/yr}$)
- HAS (VLBA+phaseVLA
+GBT+Effersberg)で
マッピング
- **100Mpc先のメーザー源の距離推定**



Megamaser Cosmology Project (Braatz et al.)



メーザー物理学の 最近の話題

Are fundamental constants truly constant?

超弦理論の予測:

物理の基本定数も時間変化するはず

OHの超微細構造間の遷移:

周波数変化は異なる α 依存性を持つ

吸収線-輝線の共役ペアを持つ

⇒ 同じ領域(視線速度)からのペア

$$\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc} \quad \text{fine structure constant}$$

過去~6.5Gyrにわたり $\Delta\alpha/\alpha < 6.7 \times 10^{-6}$

Kanekar et al.

Phys. Rev. Lett.95 id 261301 (2005)

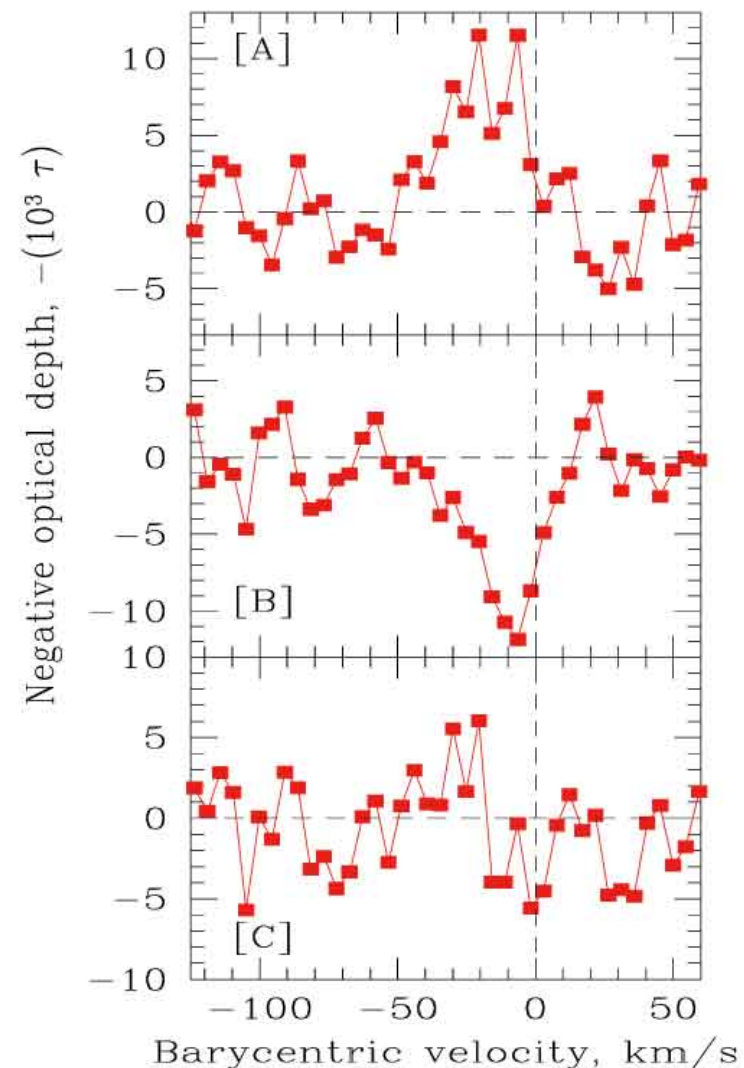


FIG. 2: OH satellite line spectra (~ 5 km/s resolution), with negative optical depth ($-10^3 \times \tau$) plotted against barycentric velocity, in km/s, relative to $z = 0.76355$, the redshift of component C. [A] 1720 MHz transition, redshifted to ~ 975.6 MHz; [B] 1612 MHz transition, redshifted to ~ 912.2 MHz; [C] Sum of 1612 and 1720 MHz spectra; this spectrum is consistent with noise. Note that the feature at ~ -30 km/s is not statistically significant. The satellite lines peak ~ 10 km/s blueward of component C (the dashed vertical line), which has the lowest redshift of the three spectral components.