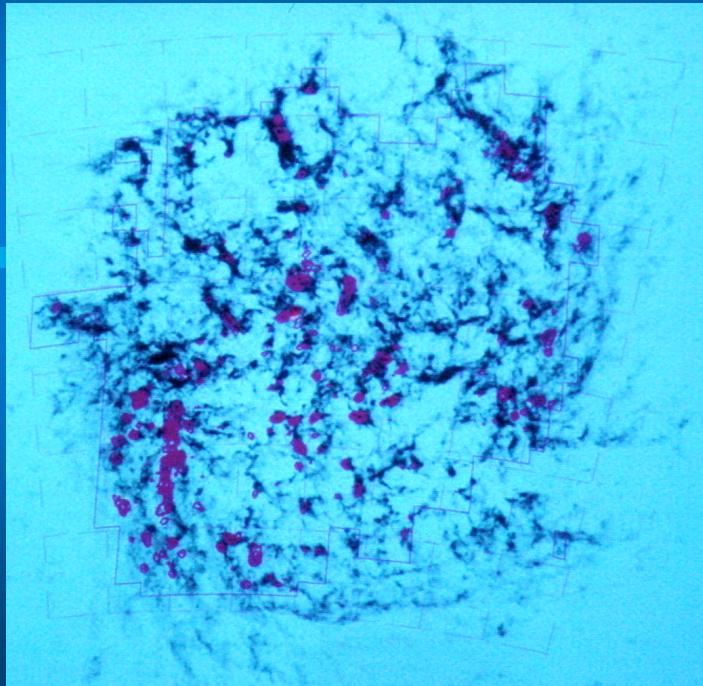


VSOP-2 セミナー @鹿児島大 2005年6月4日

VSOP-2で見る 銀河系外縁／マゼラン雲内の水メーザー源



今井 裕
鹿児島大学理学部
物理科学科

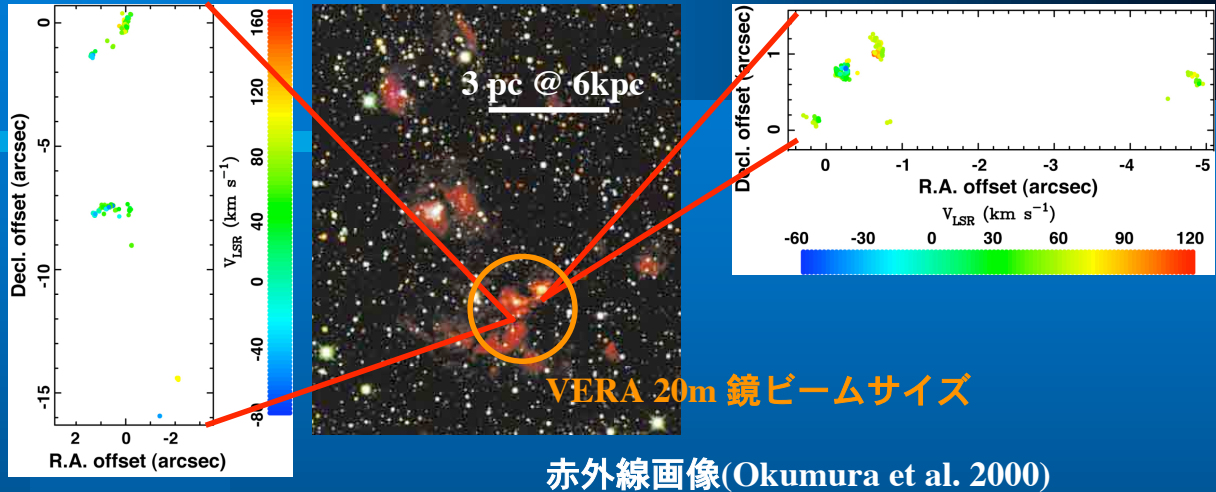
大マゼラン雲中の
水素原子(HI)ガス(グレー)と
分子(CO)ガス(ピンク)の
天球面分布

宇宙メーザーの観測から分かること

メーザー (maser): microwave amplification by stimulated emission of radiation

- 宇宙メーザーの励起・増幅機構
 - 地上実験装置とは異なる環境 (真空・大容積)
 - 巨大なエネルギーを生み出す極限における性質の理解
- メーザー放射を”道具”として利用した天文学
 - 既に理解されている基本的な励起環境・増幅条件に関する情報を利用する
 - メーザーを含む宇宙からの電磁波放射
 - 地球に向かって強力な電波を放射する条件が揃っている部分のみが光って見える
 - 真の物質分布の把握は難しい
 - メーザー放射を伴う天体の性質を理解する
 - メーザー放射の分布・運動構造が恒星や銀河の構造・進化と密接につながっている

水メーザー源観測例: W51A (with VERA)

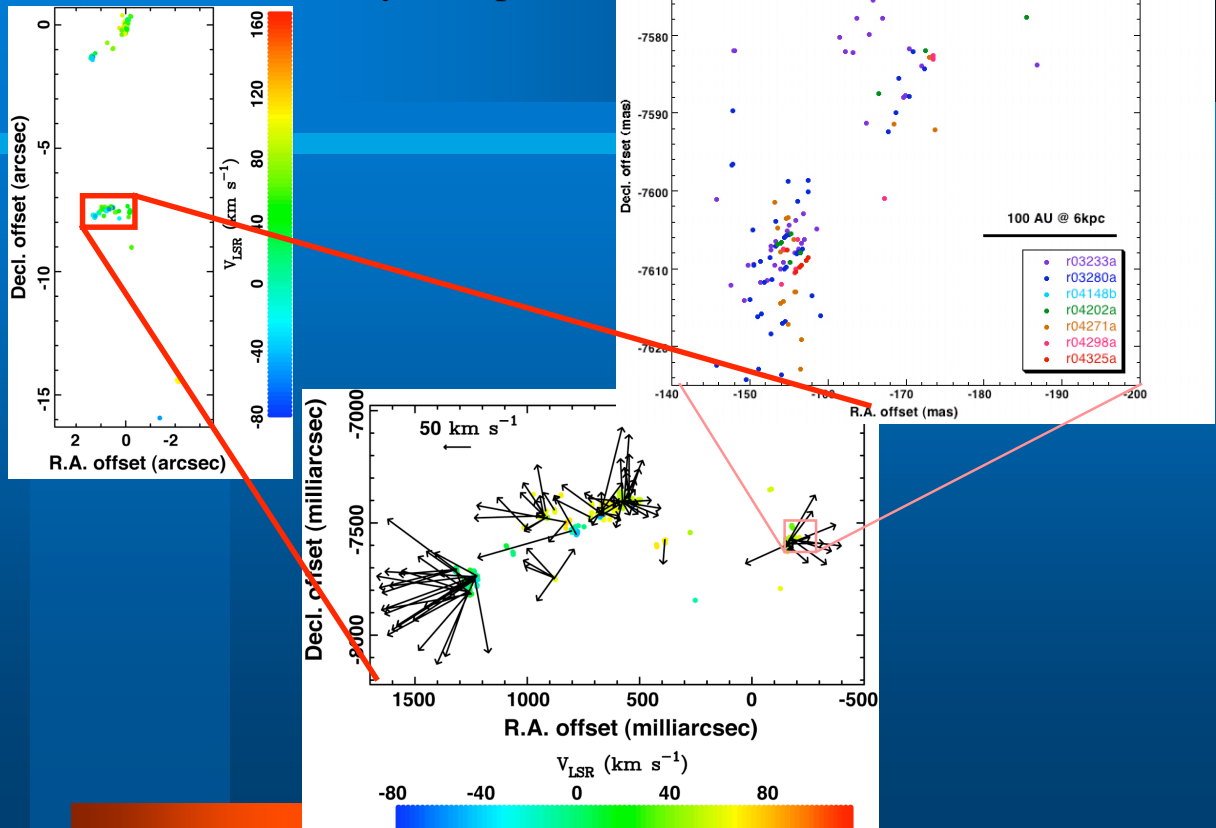


-メーザーガス塊 (maser feature)

- 見かけはコンパクト → $\sim 1 \text{ AU} = 1 \text{ ミリ秒角 (mas) @ 1 \text{ kpc}$
- 個々の feature の視線速度 (ドップラー速度) と天球面上速度 (固有運動) を計測できる

-メーザー源: 異なる場所において異なる運動をする複数 maser features の集合体

天球面運動: $V[\text{km/s}] = 4.74 \mu[\text{mas/yr}] D[\text{kpc}]$



天文学における「進化」という言葉の意味

- 生物学上の「進化」
 - ある種の生物が何世代も重ねて
形態・能力等を変化させること
- 天文学上の「進化」
 - ある1つの天体が誕生から消滅までの間に物理的特徴
(質量・形状・内部運動・内部組成)を変化させること

水メーザーが対象とする天文学研究 (現在)

- 恒星とその周辺環境の進化
 - 恒星進化の理解にどのように貢献できるの？
 - 星形成過程の解明
 - 希薄な星間ガス（中性水素ガス）からの分子ガス雲の形成
 - 星のまゆ（分子雲コア）の形成
 - 双極分子流／ジェット
 - 最終恒星質量決定のメカニズム
 - 大質量星($>8M_{\text{sun}}$)形成メカニズム
 - 星形成と宇宙の元素組成（化学進化）の関係
 - 恒星進化末期の質量放出過程の解明
 - 恒星内部構造の進化
 - 恒星風の加速
 - 恒星質量放出率の時間変化
 - 恒星質量放出と宇宙の元素組成（化学進化）の関係
- 銀河系の三次元的空間・力学構造
- 銀河中心核周辺（分子）ガスの三次元的空間・力学構造

水メーザー源観測に基づく星形成過程の研究

● 水メーザー発光の期間が極めて短い

- 銀河系： $\sim 10^{10}$ 年の年齢、 $\sim 10^{11}$ 個の星々 $\gg \gg 10$ 個/年誕生（平均）
- 水メーザー源を伴う星々： $\sim 10^3$ 個（現在）
- どの星々も一度は水メーザー源を伴う時期があると考える
- 水メーザー源の推定存在期間 $\sim 10^4$ 年
- c.f. Genzel & Downes (1977)の推定: $< 10^5$ 年（星形成領域）

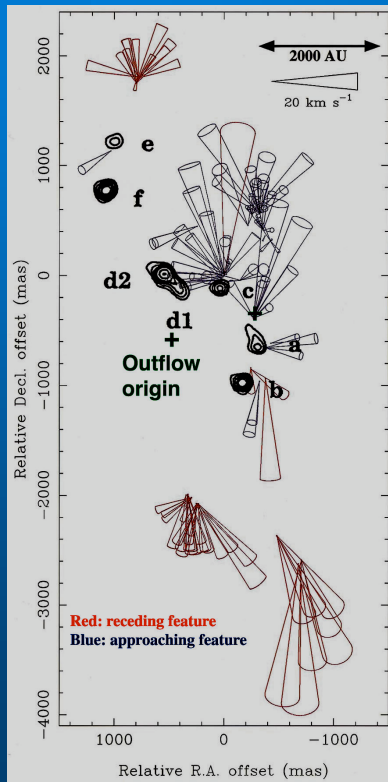
● 水メーザーが発光・消滅する時期：不明

- 原始星（若い星）／老星周辺ガスのごく一部が
 メーザー励起条件を整えている
 - 分子（水素分子）ガス密度 $\sim 10^9$ 個 cm^{-3} 分子ガス温度 ~ 400 K
 - 水蒸気分子存在比 $n(\text{H}_2\text{O})/n(\text{H}_2) \sim 10^{-5}$ 視線方向に増幅する構造
 - 非熱的平衡にあるガス
- 星間ガスとしては高温・高密度・高分子存在比を持つ
- 原始星（若い星）／老星から流れてくるフローに付随
- 原始星／ガス円盤に降り積もるガス流にも付随？

水メーザー源のどこに注目する？

観測される特徴	観測方法（条件）	把握できる天体の特徴	観測例 統計的解析
メーザー源検出	単一鏡 or 干渉計	天体の種類, 大雑把な進化段階	Arcetri catalog
視線速度分布	単一鏡	大雑把な進化段階	Arcetri catalog
視線速度分布	干渉計(1回)	大雑把な進化段階、 大雑把な力学的年齢、乱流	VLA+continuum
強度変化	単一鏡（複数回） ($\sigma F/F < 10\%$)	変光の周期性及びその値、乱流	RT20m, Medicina
三次元速度 ベクトル分布	干渉計（複数回） ($\sigma < 1$ mas)	立体運動学的構造、力学的年齢、 進化段階、視差距離、 運動学的エネルギー、乱流	VLBA, EVN, J-Net VERA
視線速度ドリフト	単一鏡（多数回） ($\sigma V > 0.1$ km/s)	視線方向力学的情報（加速/減速） 強度分布の伝搬と区別できる？	RT20m, Medicina
加速度ベクトル	干渉計（多数回） ($\sigma < 0.1$ mas)	ガスの立体力学的情報 検出数が極めて少ない	RT Vir (Imai et al. 2004)
直線偏波	干渉計(LL,RR,LR,RL)	天球面に投影された磁場ベクトル 偏波率が小さい	W3 IRS5, Ori KL, W51M
ゼーマン効果	干渉計(LL,RR,LR,RL) ($\sigma V < 0.1$ km/s)	視線方向に沿った磁場強度 偏波率が小さい、効果が小さい	VLA, VLBA (Sarma, Vlemmings)

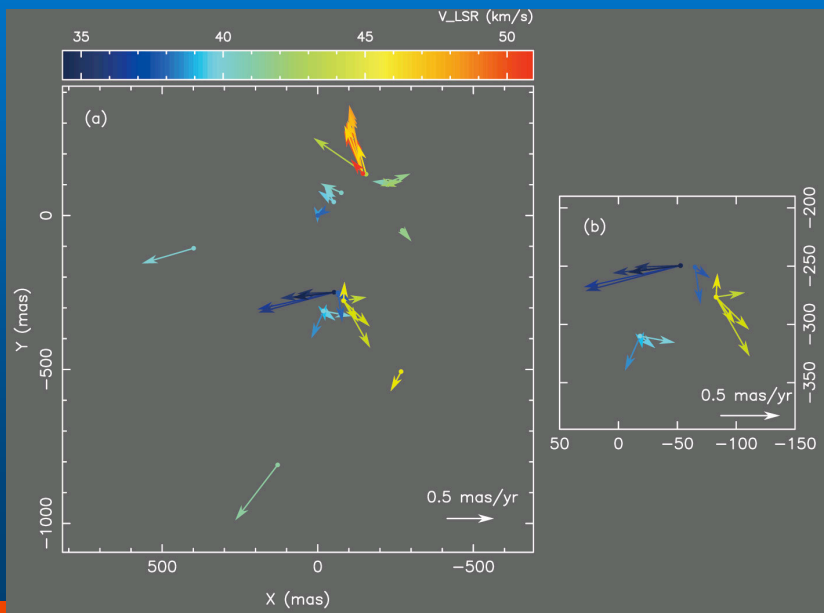
星形成 + 水メーザー ≠ 双極分子流



固有運動計測天体 (星形成領域) ~20天体

W3 IRS5 (Imai et al. 2000)

OH43.8-0.1 (Honma et al. 2005)

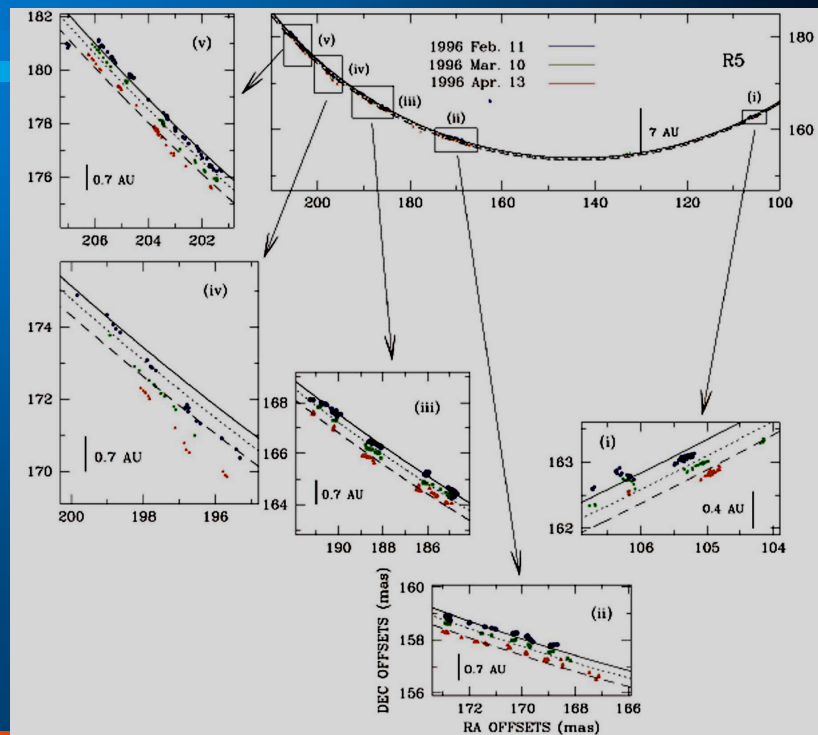


「バブル」の発見

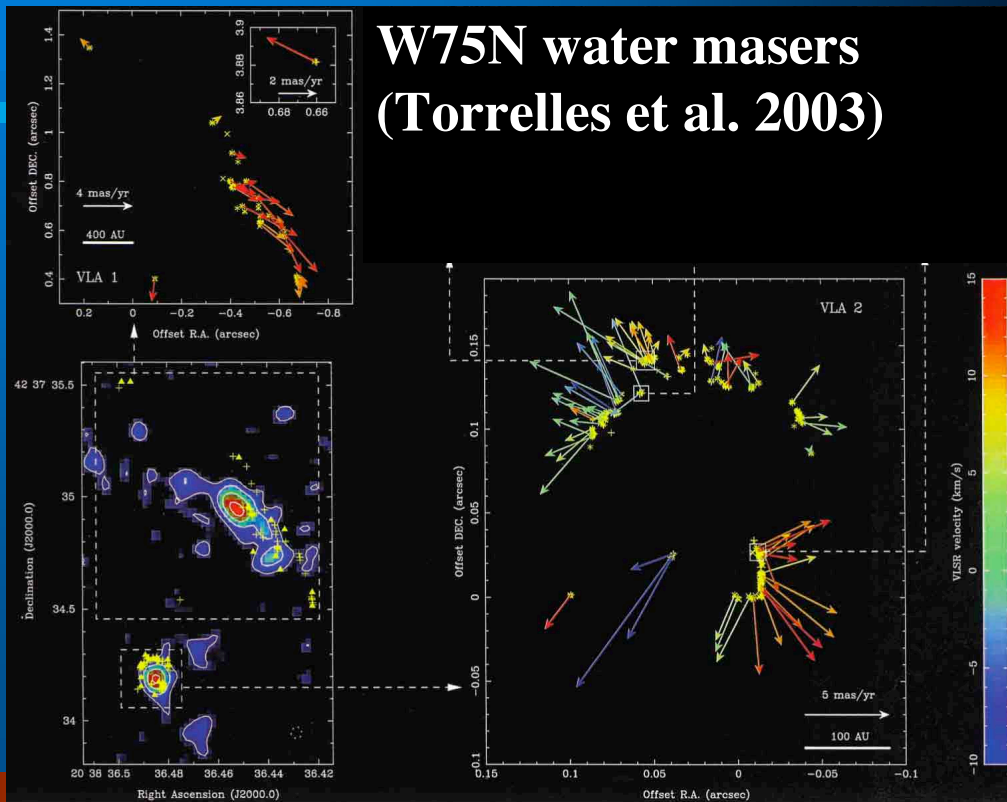
Cepheus A

(Torrelles et al. 2002)

- 力学的年齢はわずか50年
- 双極フローが見えない
- 円中心部に微弱連続波
- 超微細 HII 領域 (<1000 AU) 誕生瞬間?



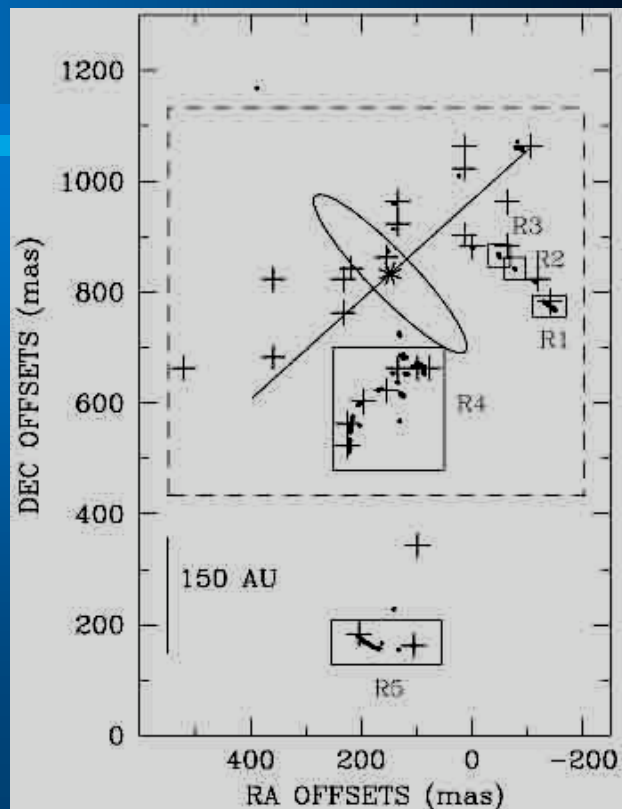
「統一モデル」は当てはまらない
 フロー形状・運動構造の進化を見ている？



星形成は正確に同時に始まる
 (星団形成)

- 同一領域の複数の分子流に
 メーザー源が付随
- 力学的年齢が揃っている：
 100--1000年
- **本当に同時形成？**

Cepheus A
 (Torrelles et al. 2002)

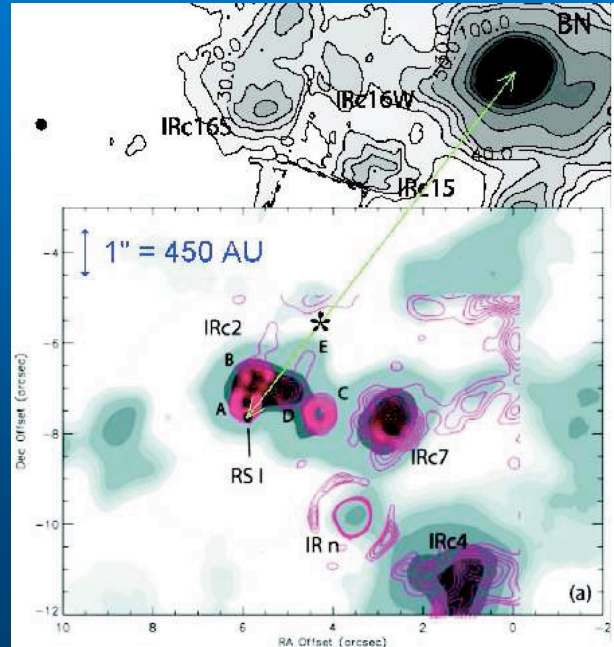


Runaway stars の発見

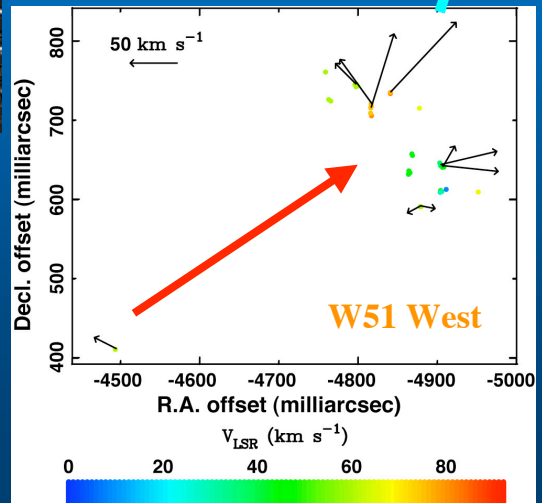
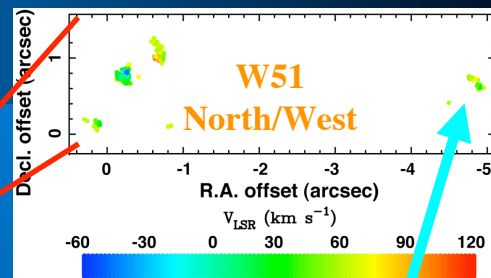
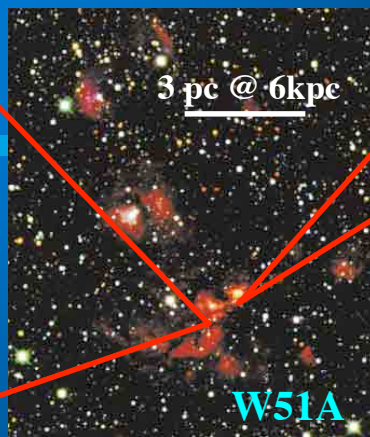
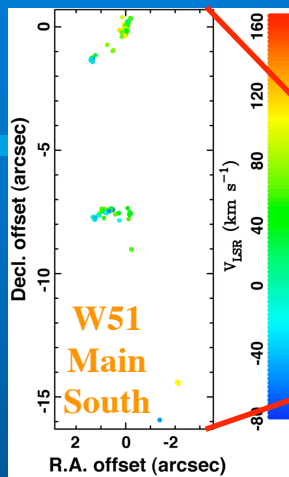
Proper motions of the source "I" and BN object (Rodriguez et al. 2005)

- Coalescence formation of massive stars

- 中小質量星の合体→大質量星
- 連星系にもう1つ星が接近
- 星を1つはじき飛ばして残りの2星がより互いに接近
- 大質量星形成
→激しいガス放出の開始



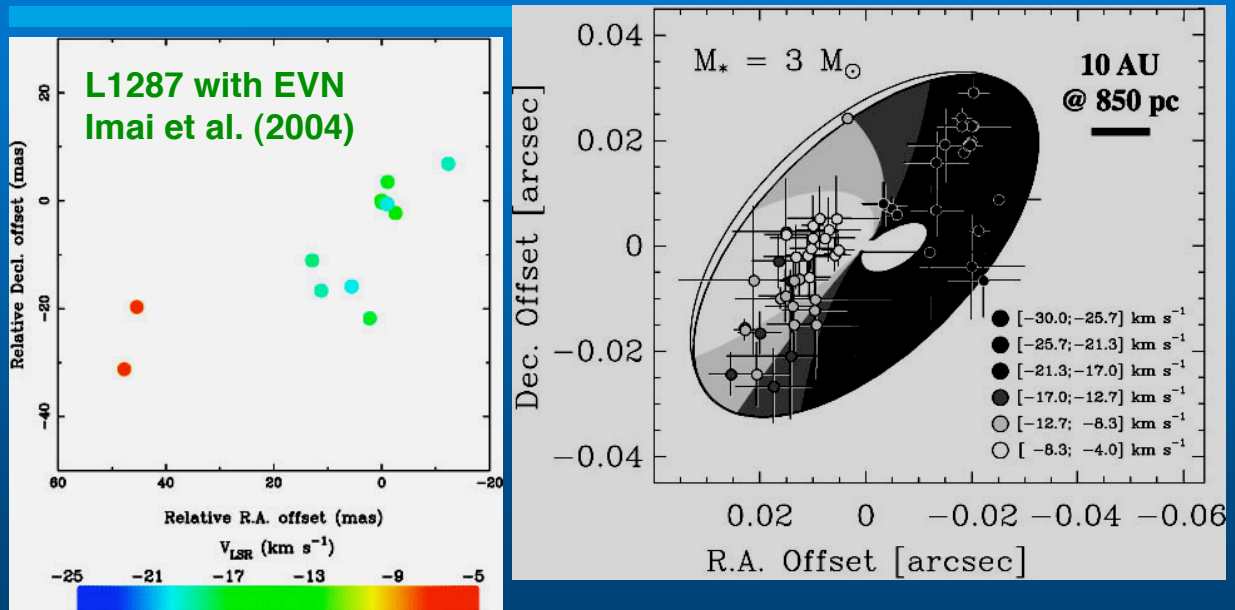
もう1つの runaway star?



- W51A領域の水メーザー源を伴う若い星々は10⁵年前はもともと1カ所にあったかもしれない

原始星ガス降着が見えるかもしれない

L1287 with VLA (Fiebig 1997)



原始星ガス降着が見えるかもしれない

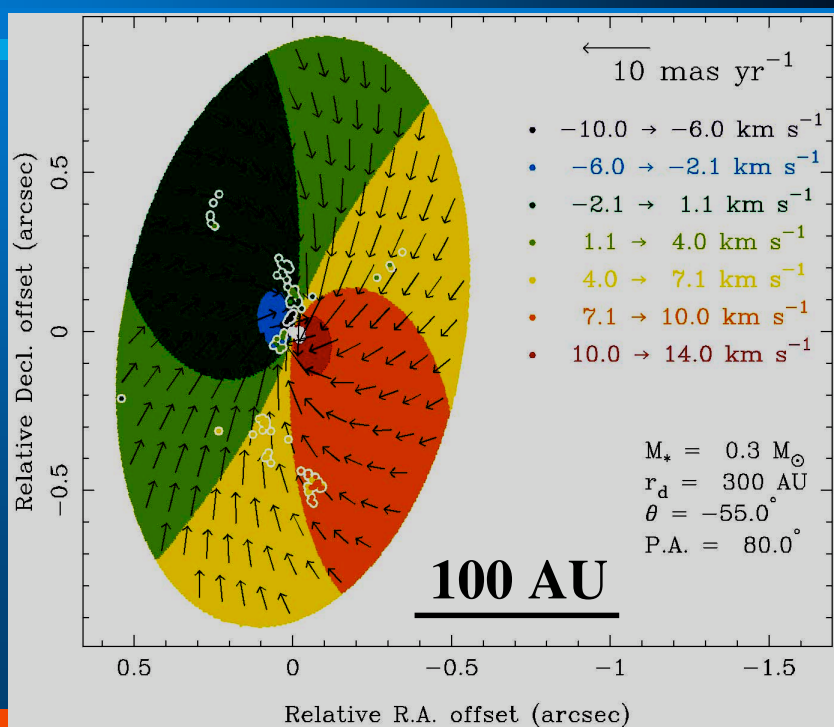
原始星直近に maser feature cluster

力学中心の追跡
↓
VLBI astrometry
が必要

短時間での固有運動
検出も必要

磁場計測も重要

IRAS16293-2422
(Imai et al. 1999)



原始星ガス降着が見えるかもしれない

NGC2071 IRS1

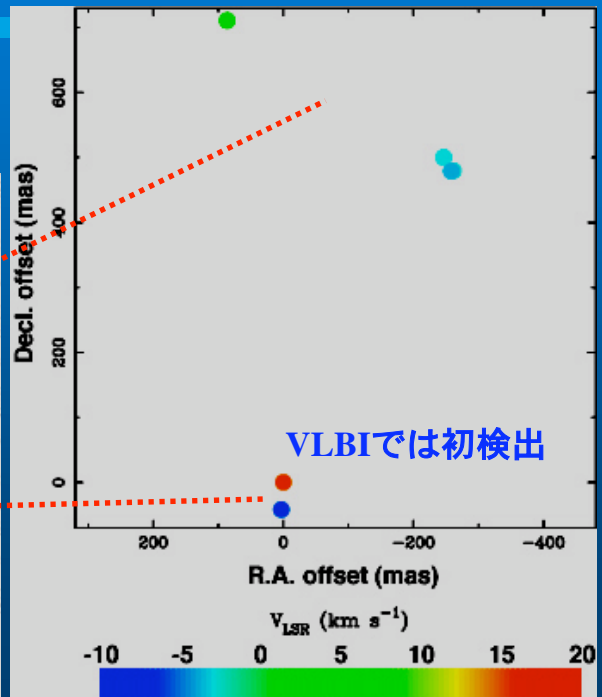
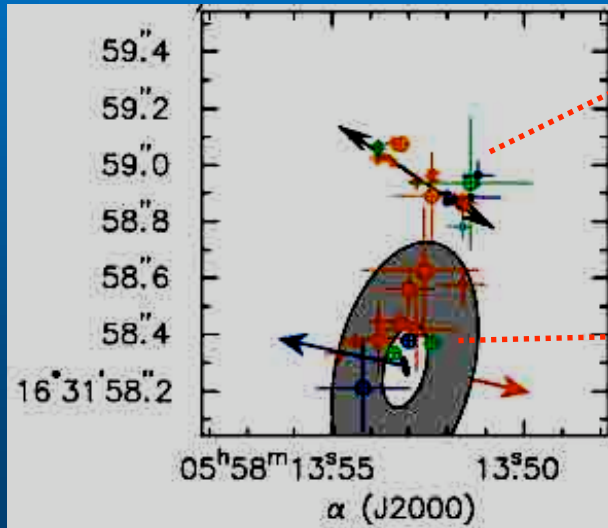
(Seth et al. 2003)

G192.16-3.84

(Shepherd et al. 2004;

Imai et al. 2005)

J-Net (r05084a)



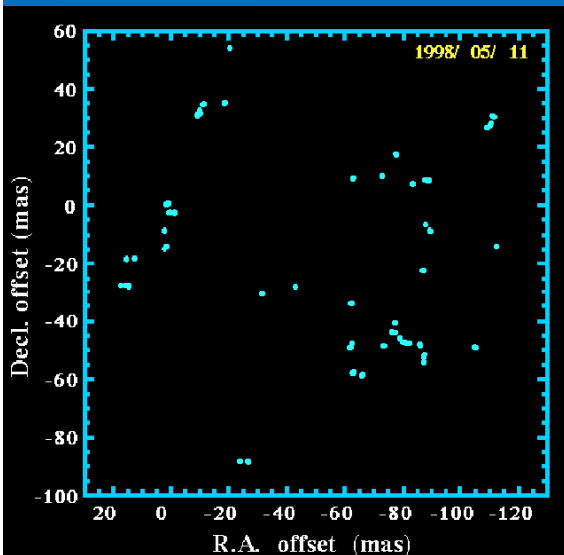
水メーザー源運動学的構造の統計的解析

- 双極流／恒星風／HII領域の進化
 - フロー速度・collimation(絞り込み)のきつさ・
 - フロー発生源からのmaser features群までの距離
- V.S.
 - 力学的年齢・他の電磁波(赤外線／電波輝線、等)
 - そのほか年齢の指標になるもの
- 原始星(その直近にあるガス円盤)へのガス降着の仕組み
 - 降着継続期間
 - 単位質量当たり角運動量(局所比角運動量)の動径分布
- 同一星形成領域内の水メーザー源間の相対運動
 - Coalescence massive star formationの検証

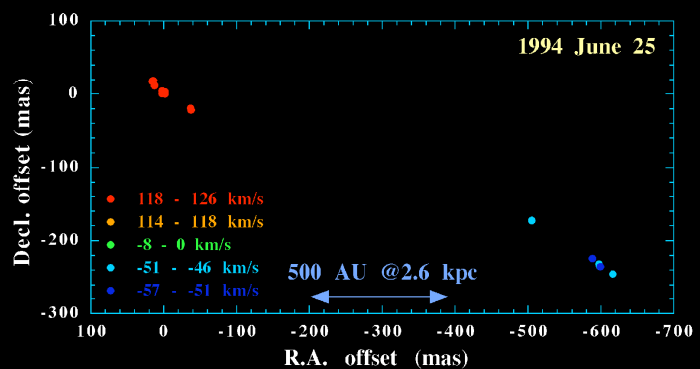
フロー／ジェットは恒星進化初期／末期で見られる共通の現象

RT Vir (Semiregular variable)
(Imai et al. 2004)

最後の1000年間の恒星進化

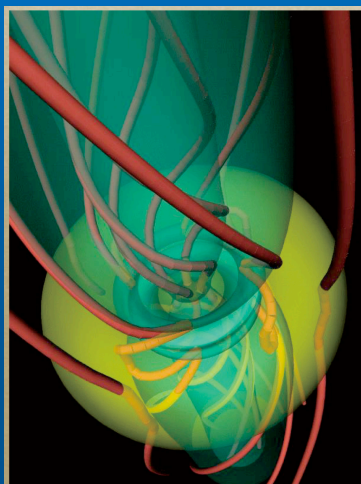


W43A (OH/IR star)
(Imai et al. 2002)

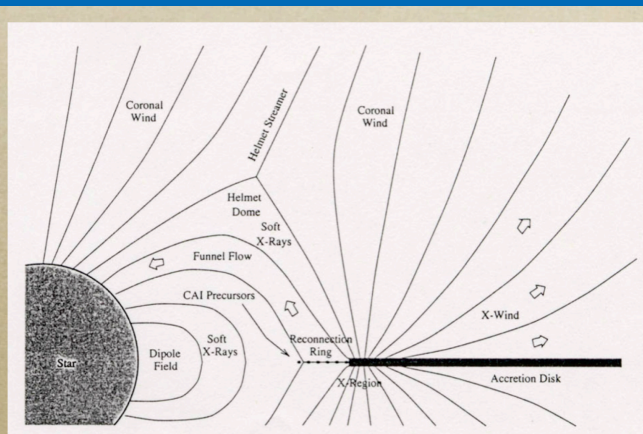


そもそもフロー／ジェットの形成メカニズムは？

- 磁気流体力学的(MHD)ジェット
 >>> ジェット放出天体周辺の強力な磁場・ヘリカル磁場・ヘリカル運動・ジェットの加速・ジェットの絞り込み
- ジェット形成に連星系が必要？
 >>> host star, companion の軌道計測
- 脈動変光星： 衝撃波伝搬 >>> 加速



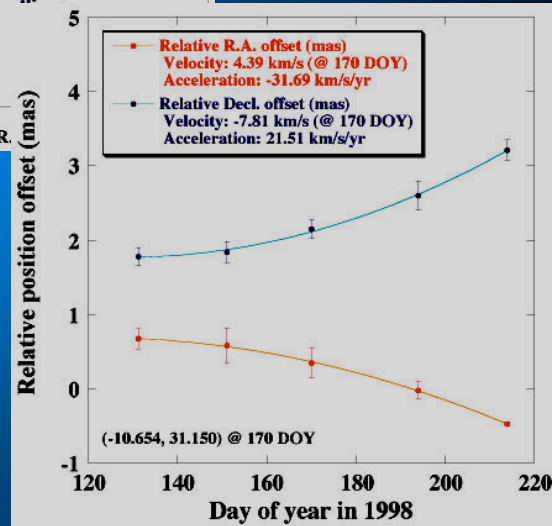
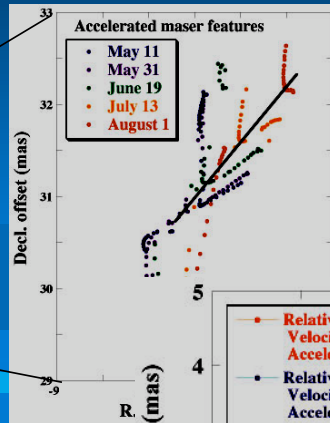
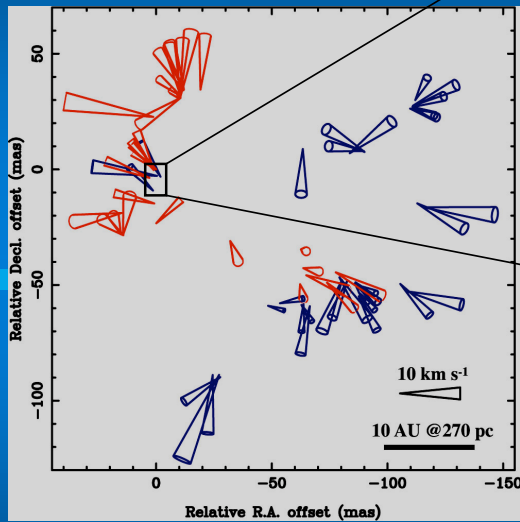
MHD disk wind model (Uchida et al.)



X-wind model (Shu et al. 1997)

脈動変光衝撃波の検出

RT Virginis
(Imai et al. 2004)



Feature 中の最も明るい部分を
追跡して行く
タイムスケール~数週間

分子雲コア真芯・恒星付近の磁場構造

- Spectral line VLBI polarimetryの確立
 - 右旋/左旋円偏波成分の同時観測
 - Cross circular polarization データの較正手法の確立
 - Stokes parameters (I, Q, U, V)
- OH, SiO, H₂Oメーザーなどで観測

$$\begin{aligned}
 I &= E_X^2 + E_Y^2 = \frac{1}{2}(RR + LL) \\
 Q &= E_X^2 - E_Y^2 = I \cos 2\theta \cos 2\chi = \frac{1}{2}(RL + LR) \\
 U &= 2E_X E_Y \cos \delta = I \cos 2\theta \sin 2\chi = \frac{1}{2}(LR - RL) \\
 V &= 2E_X E_Y \sin \delta = I \sin 2\theta = \frac{1}{2}(RR - LL)
 \end{aligned}$$

Polarization degree :

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}$$

Polarization position angle (PA)

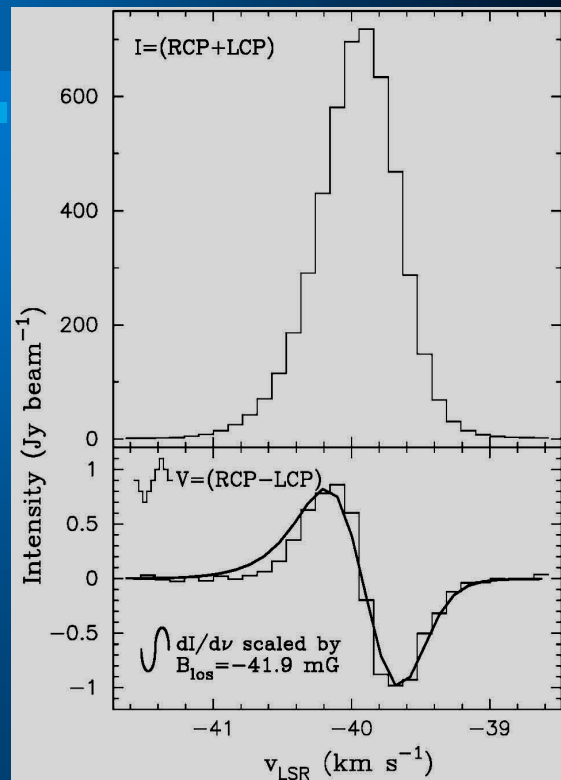
$$\chi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{U}{Q}$$

水メーザーに見られるゼーマン効果

$$V_v = aI_v + \frac{zB\cos\theta}{2} \frac{dI_v}{dv}$$

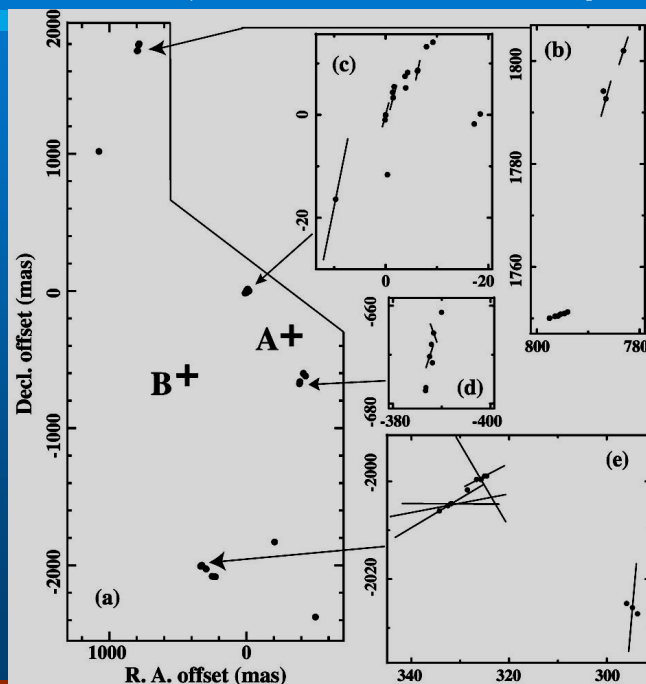
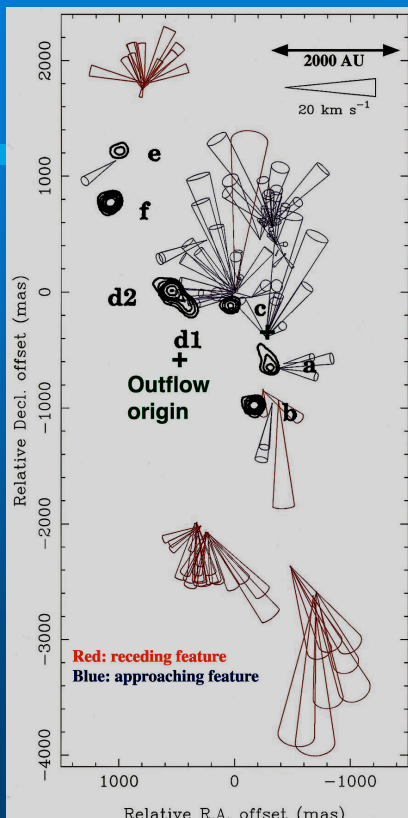
- 視線速度分解能 0.1 km/s と image dynamic range >100が必要
- 4 massive YSOs で検出 (Sarma et al. 2001, 2002)
- 磁場の視線速度成分強度 : 10--30 mG
- 磁場-ガス密度の観測経験則を満たす(Clutcher 1999)

$$B \propto n_{H_2}^{0.46}$$



三次元磁場構造を捉える

- 広い範囲でEVPAが揃っている (W3 IRS5, Imai et al. 2003)

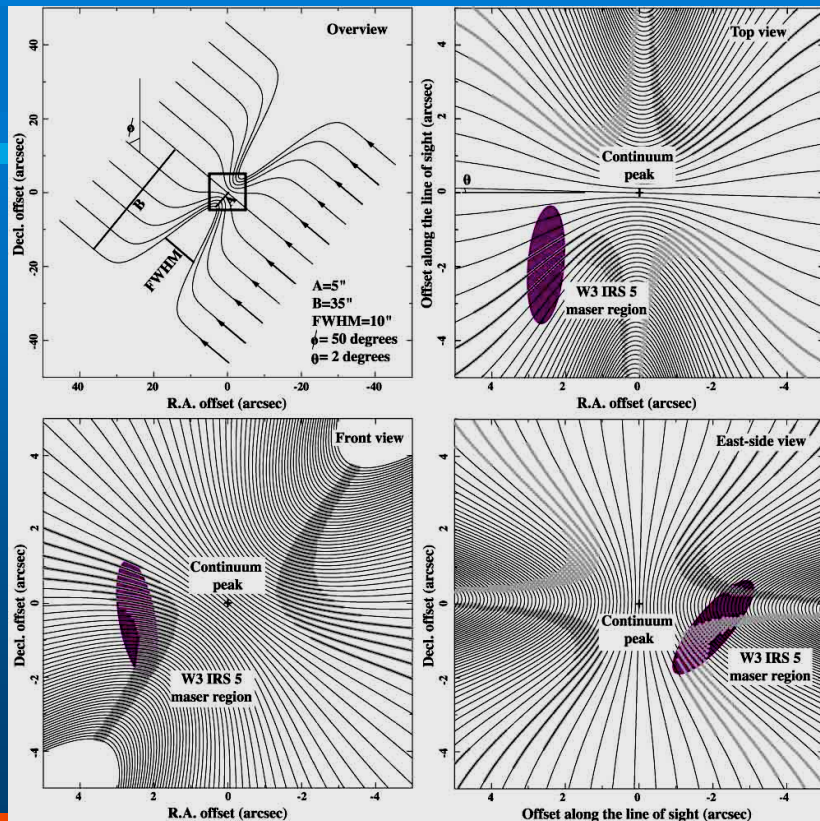


三次元磁場構造を捉える

- 磁力線はほぼ天球面に平行
- ⇒EVPAは磁場天球面成分に垂直
- JCMT polarimetryで大域磁場は把握されている

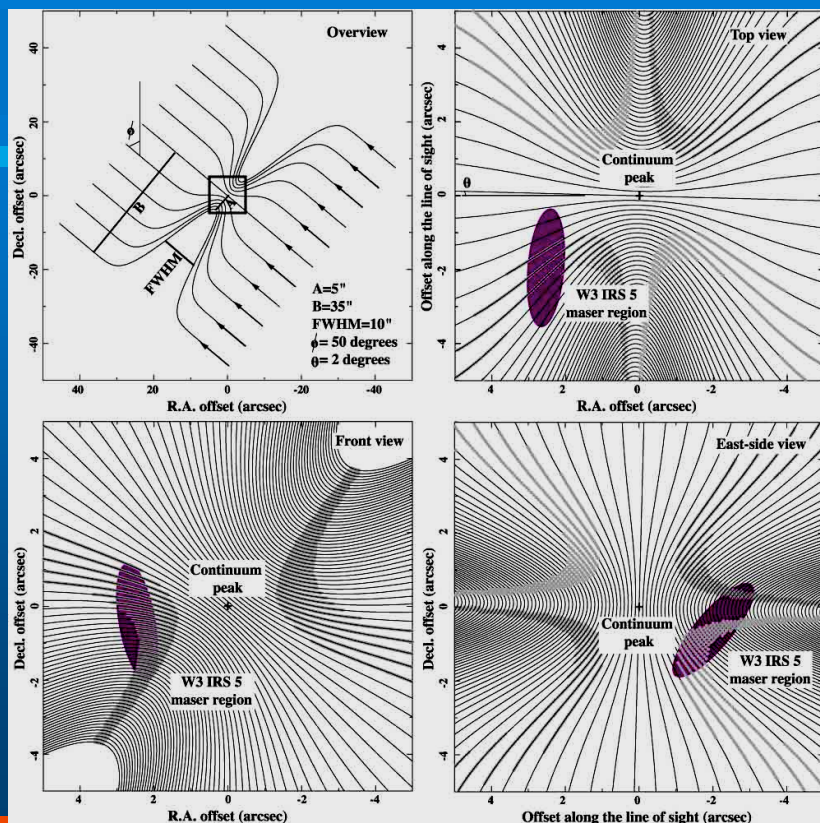
(Greaves et al. 1994)

- 磁力線収束点はメーザー源のすぐ近く
- (一致はしていない)



三次元磁場構造を捉える

- Pinch ratio がかなり大きい
- 磁力線をひきずって分子雲コアが収縮したらしい



磁場構造と星形成・双極流駆動

- 大質量星形成分子雲コア：Magnetically supercritical collapse
(磁気圧に逆らって自己重力によって収縮)
- メーザー領域まで大域的磁力線が
閉じ込められて収束してくる
(メーザースポット内ではさらに強められる)
- W3 IRS5 におけるエネルギー密度： $E_{\text{outflow}} > E_{\text{magnetic}}$
磁気流体力学的(MHD)ジェットよりも恒星風が優位
- MHDジェットを駆動する磁場の強さを
より正確に推定できそう
- 星形成進行段階が若いほど磁力線が
良く並んでいるらしい (Momose et al. 2001)
- 星形成進行段階の診断に使いそう

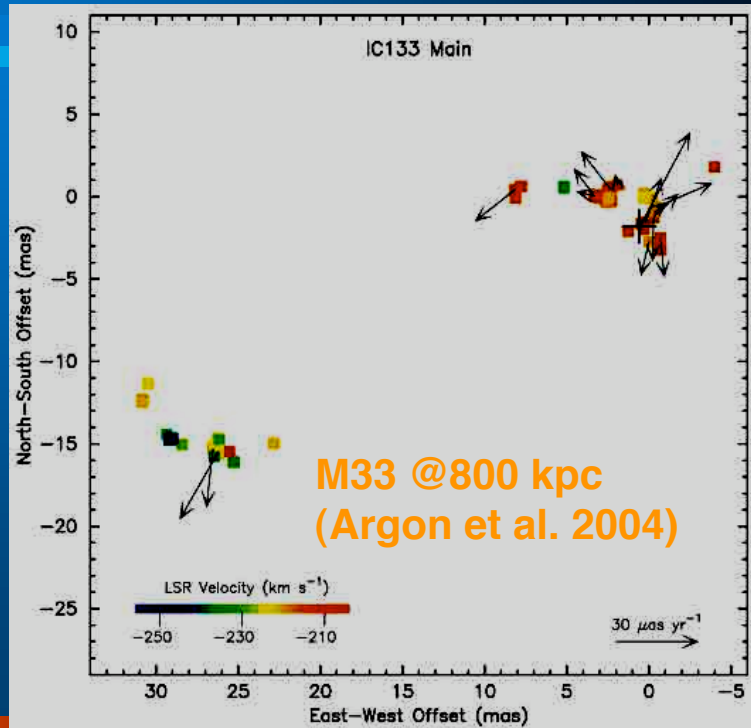
VSOP-2編：

角分解能 $80\mu\text{as}$ で見る水メーザー源

- Maser feature positions: $\sigma \sim 0.5 \times \theta_{\text{beam}} / \text{SN_Ratio} \sim 1 \mu\text{as}$
- 地球自転とは全く異なる人工衛星軌道
- どの天域でも世界中の望遠鏡と組み合わせて観測（像合成）できる
- 太陽近傍 ($< 500 \text{ pc}$) 以内の水メーザー源は分解されて殆ど見えない
 - spot size : $\sim 1 \text{ AU} \Rightarrow 1000 \mu\text{as}$ @ 1 kpc
- より広大に見える水メーザー源
 - Features 分布サイズ : $\sim 10,000 \text{ AU} \Rightarrow 10''$ @ 1 kpc
 $\Rightarrow 1,000,000$ grids for a $10 \mu\text{as}$ grid
- Maser featuresが消える前に固有運動計測が可能（1カ月以内）
- 数週間スケールの加速度運動まで計測できてしまう
- 遠方メーザー源（大質量星形成領域・隣の銀河まで）の精査

近傍銀河中のメーザー源の 三次元内部運動さえ計測できる

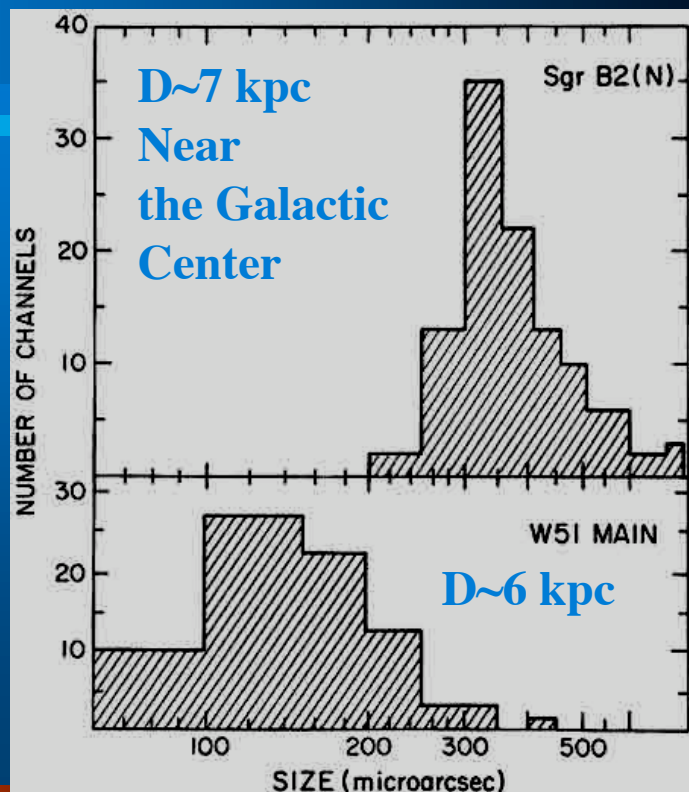
- 最高精度 : $30 \mu\text{as yr}^{-1}$
- M33 (800 kpc)
水メーザー源の
高速フロー ($>100 \text{ km/s}$)
- NGC4258 回転ディスク
(1000 km/s)
- 銀河($<1 \text{ Mpc}$)の固有運動
IC10, M33
- 銀河($<10 \text{ Mpc}$)の
距離計測
NGC4258



見かけの水メーザースポットサイズ

Gwinn (1988)による
統計的考察

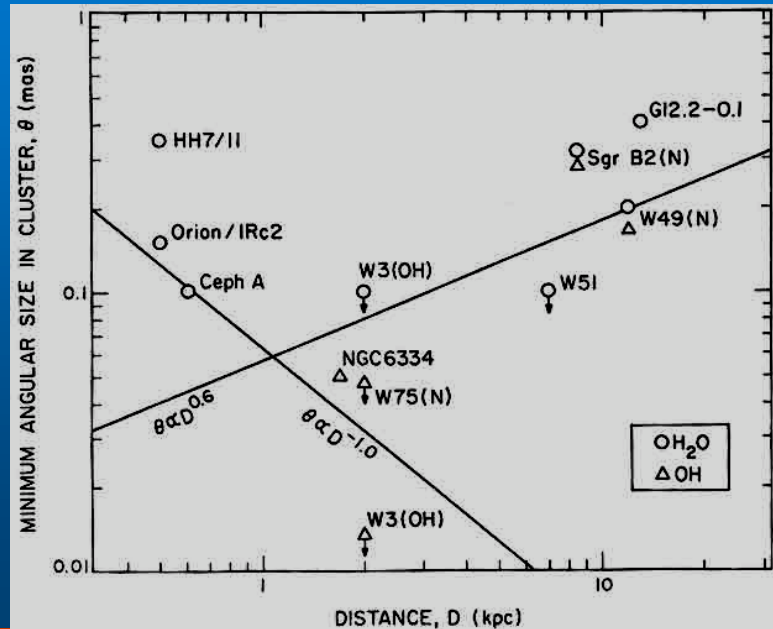
- 遠くなっても小さく
見えない場合がある
- 等距離でも見かけの
サイズが異なる
(銀河系中心方面)



見かけの水メーザースポットサイズ

Gwinn (1988)による
統計的考察

- 2 kpc以内：
距離に比例して
小さくなる：
実サイズに依存
- 2kpc以遠：
距離にやや比例して
大きくなる：
銀河系内プラズマ
による散乱に依存



結局 VSOP-2で何を見る？

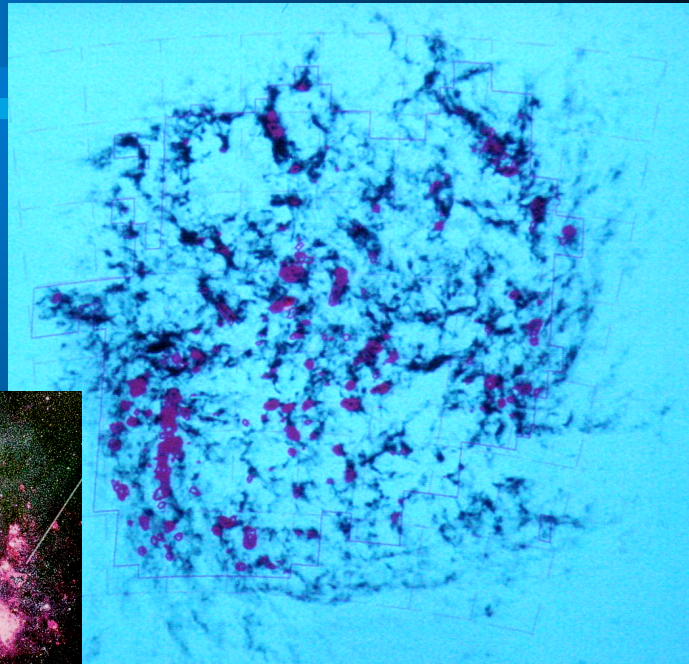
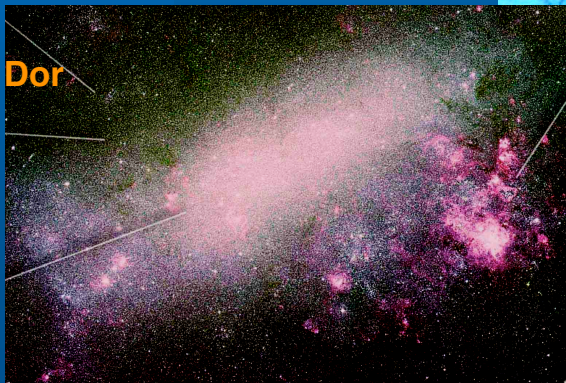
- フィールド：1 kpc -- 1 Mpc
 - 1 kpc 以内の天体は観測に適さない
Orion KL, NGC2071, Cepheus A、近傍変光星 (RT Vir, W Hya)
 - 銀河系中心方向も適さない：Sgr B2
- 銀河系外縁部
 - W3(OH), W3 IRS5, W51, W75N など
 - Astrometryとの関係：銀河系外側の回転曲線の計測
- 三次元運動 + 加速運動 + ヘリカル運動
 - 1-2ヵ月で計測する⇒短時間連続観測必要
 - Astrometry ⇒ジェット/フローの発生源位置の推定
- Polarimetry ⇒ 磁場
- メーザースポットを知り尽くす：乱流
- 既存VLBI観測装置とテーマが重なってしまう

大小マゼラン雲の探求

- 距離~50 kpc
- 南天
- 若い球状星団
- 活発な星団形成

可視光線

30 Dor



HI(グレー) +
CO (マゼンダ)輝線の分布

大小マゼラン雲における星形成の探究

- 銀河系とは異なる星形成史
 - 銀河系にはない「若い」球状星団
 - 多数大質量星を含む大星団の存在： 30 Dor
 - 星形成が活発ではない巨大分子雲の存在
 - 星集団形成のタイムスケールが比較的長い ~20 M years
 - 金属量（リチウムより重い元素）組成比が比較的低い
 - 銀河系による潮汐力を受けている
- 水メーザー源を指標として星形成を探求する
 - メーザー源探査があまり進んでいない
 - メガメーザー探査と同じくらい希少価値がある？
 - VLBI観測局が少ない： 豪州（6局+ペルー+VSOP-2）
 - Astrometric reference sourcesの探査が必要