

VSOP-2で狙う星形成

—非熱的連続波観測—

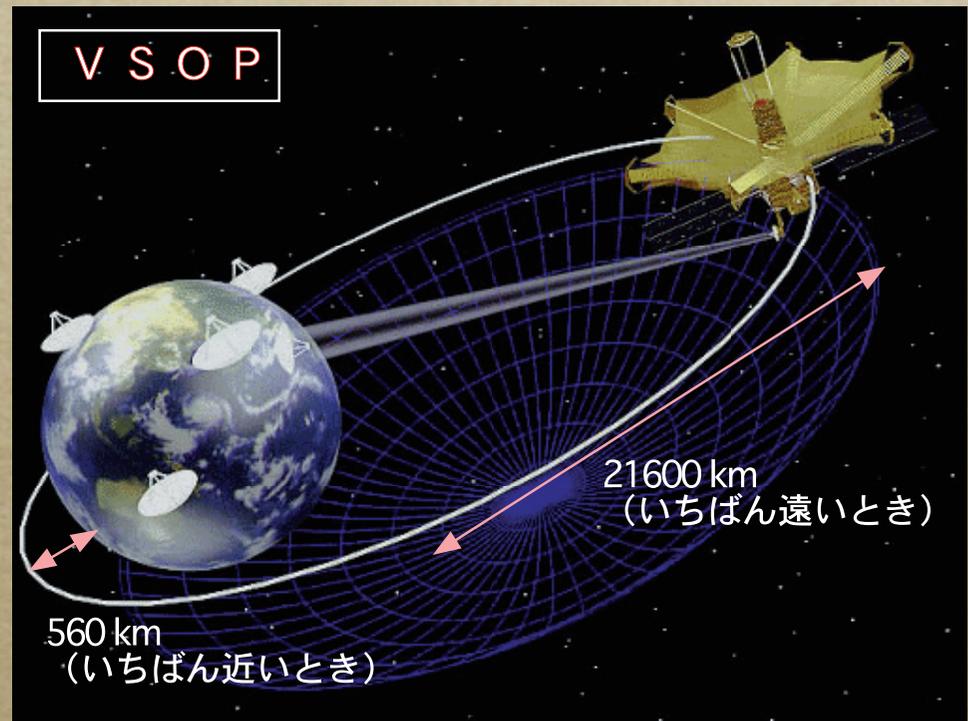
梅本智文（国立天文台VSOP室）

VSOP-2サイエンスワーキンググループ

サブミリアーク秒の角分解能で
探る星形成

Very Long Baseline Interferometer

- ミリ秒角の非常に高い分解能
- 非常にコンパクトで強い天体 (AGN, メーザー源)

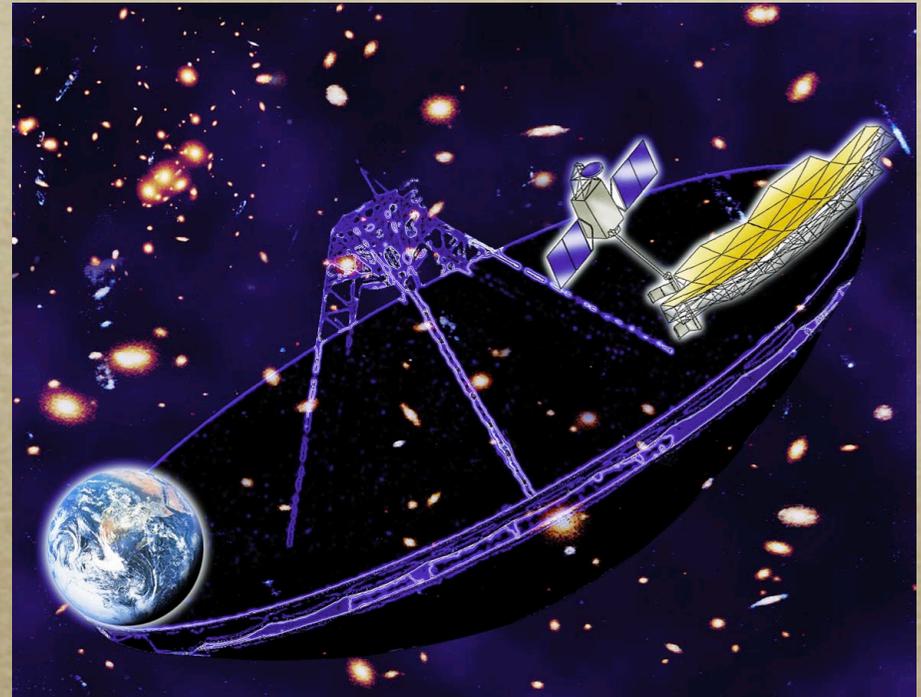


VERAは日本国内のVLBI観測網で、基線長は約2300 km。

楕円軌道を回る「はるか」は地球の直径12700kmと合わせると、約30000 kmの基線長を実現する。

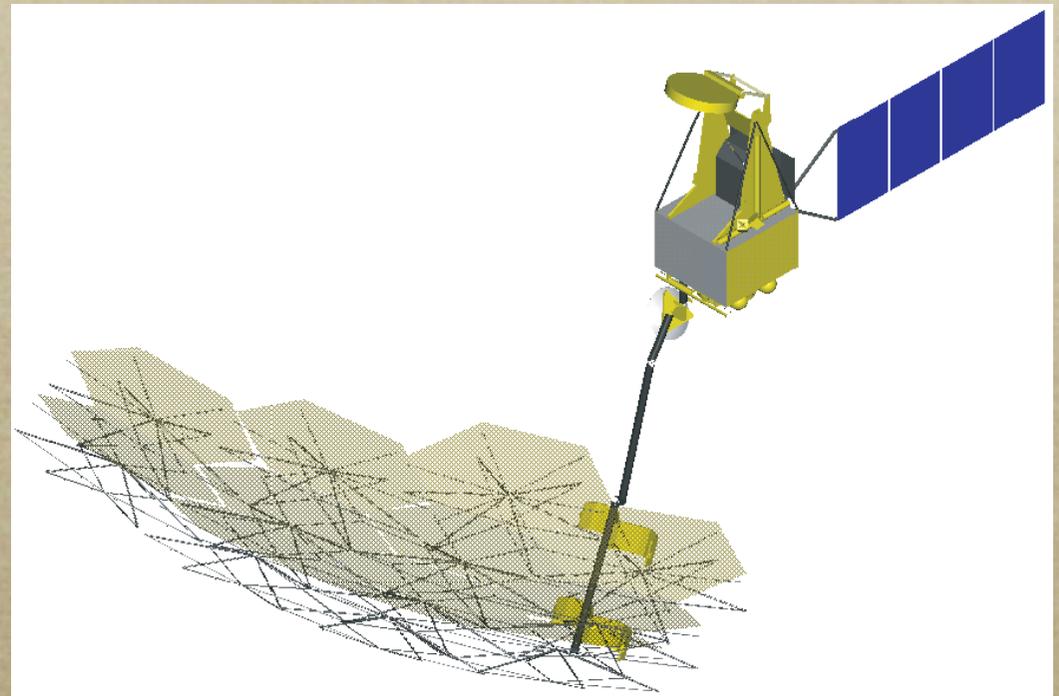
VSOP-2計画とは

- VLBIの手法を使って
38マイクロ秒角の分解能で撮像
- 地上望遠鏡と協力して
直径4万kmの開口合成望遠鏡
- VSOPより分解能10倍
感度10倍、観測周波数10倍



VSOP-2計画諸元

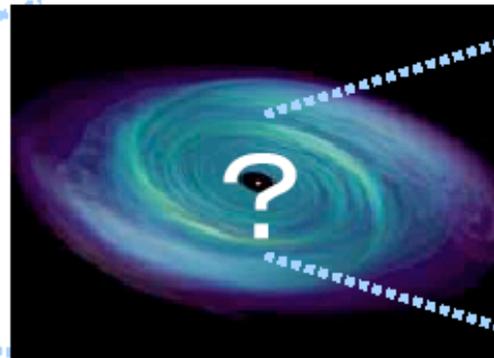
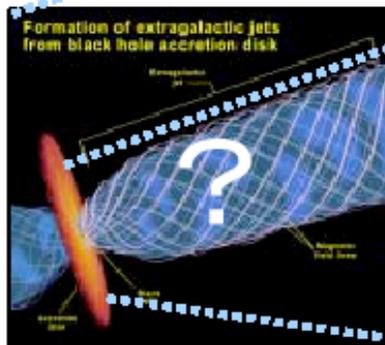
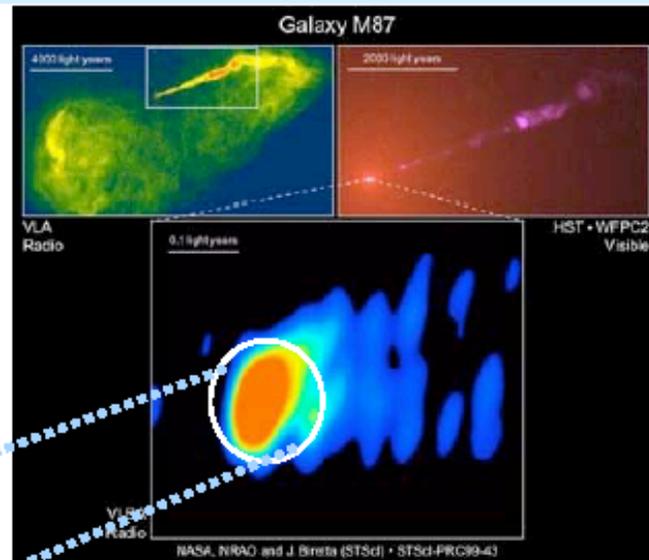
- アンテナ口径9 m、オフセットパラボラ
- 2010年M-Vで打上げ
- 遠地点25,000km、近地点1,000km楕円軌道
- 8, 22, 43GHzの3周波数で両偏波



- 高速スイッチングによる位相補償

VSOP-2が目指すサイエンス

Direct imaging of BH, Accretion Disk, and the region of beginning of the jet, and clarifying the accretion, outflow, radiation mechanism and BH characteristics.



原始星の概念図

原始星 近傍星形成領域 (d=150pc)

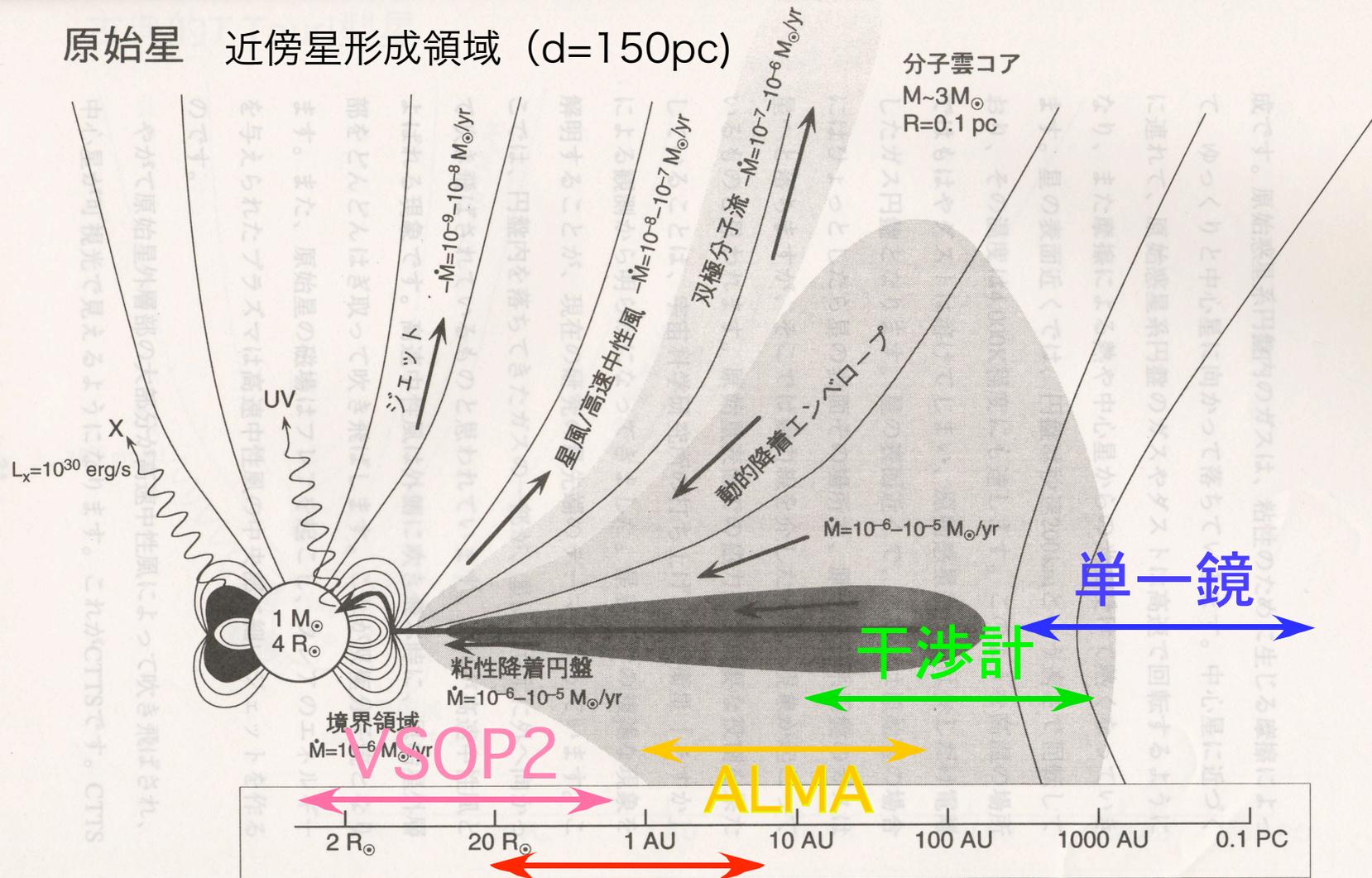


図19 原始星の想像図

VSOP-2で目指す星形成

- 。メーザー輝線観測により1-10AUスケールの原始星円盤（降着円盤）やジェットに付随したガスの3次元運動を探る
 - 。詳しくは次講演(望月)
- 。降着円盤より内側のYSO磁気圏と降着円盤との相互作用領域からの非熱的連続波を観測し磁場構造を探る
- 。分解能と感度向上による新しい領域

YSO周辺の磁場構造の存在

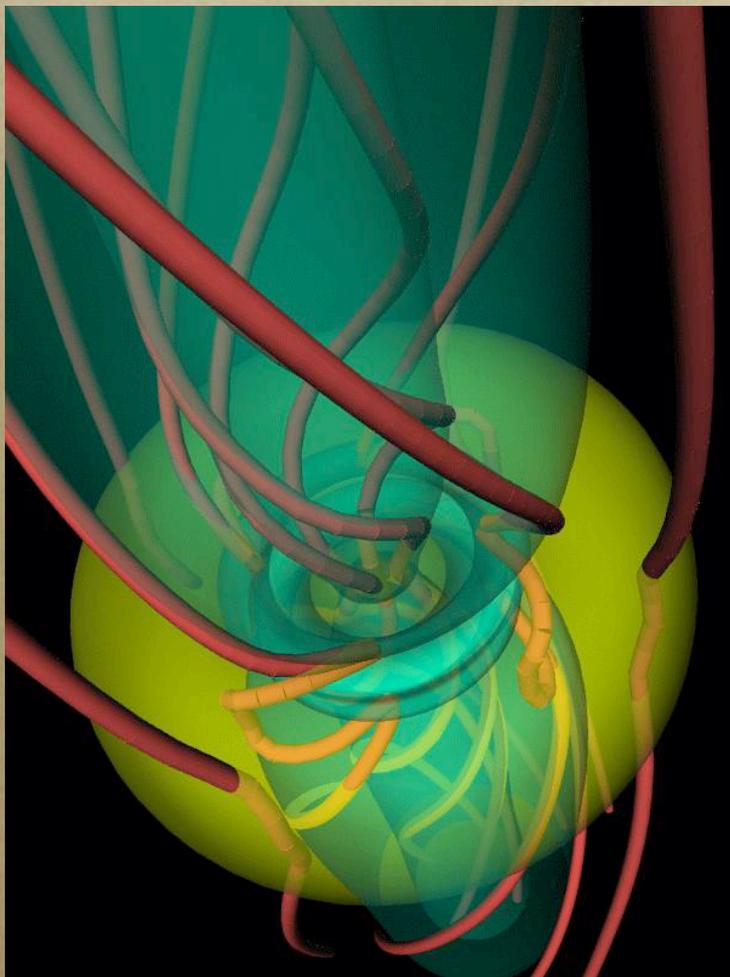
○ 理論的傍証

- outflowの収束・加速 (Uchida & Shibata 1984 , Shu et al. 1997)
- 降着円盤の角運動量制御 (Bouvier et al. 1993 , Montmerle et al. 2000)

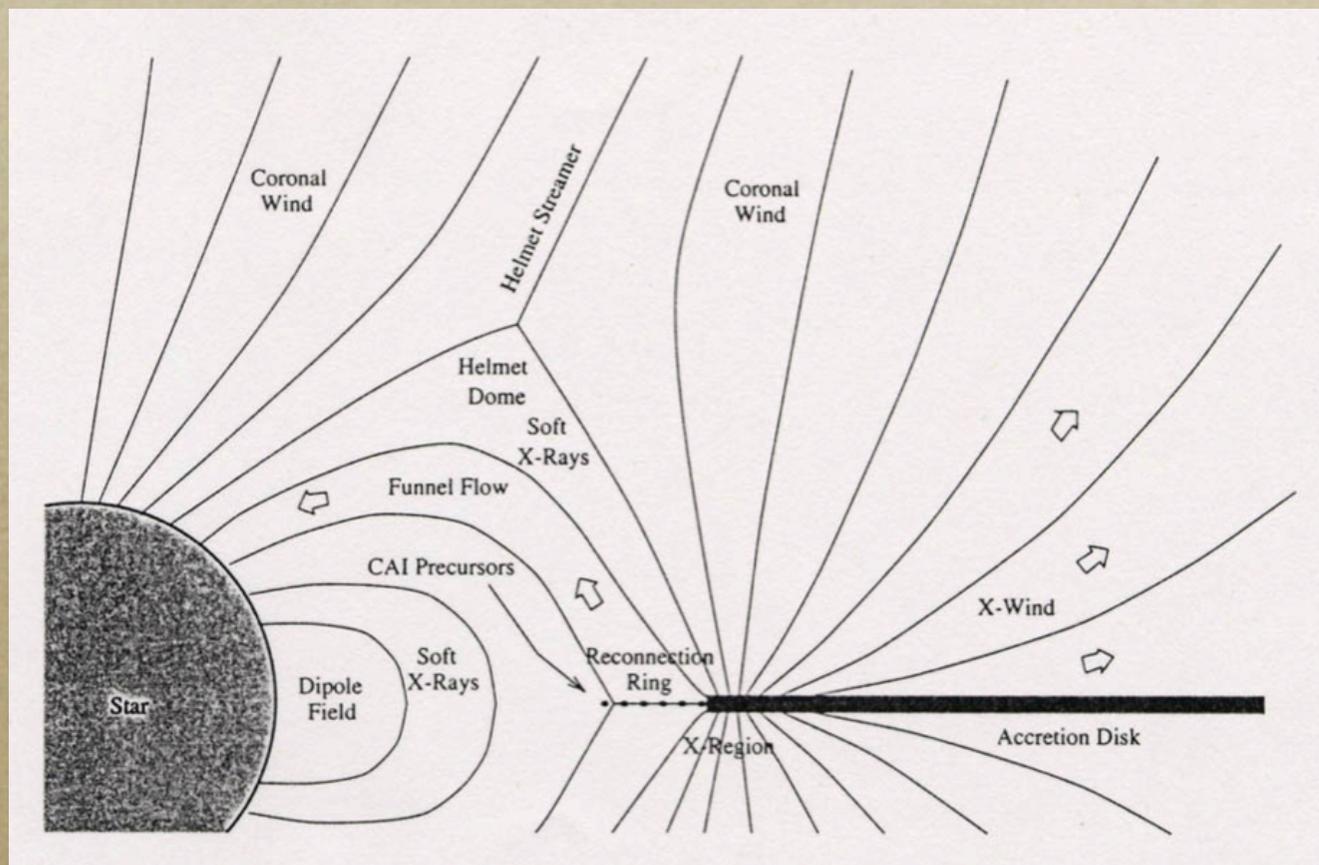
○ 観測的傍証

- T Tauri星や原始星からのX線 (Koyama et al. 1996, Feigelson & Montmerle 1999)
- 円偏波・直線偏波 (Andre et al. 1992, Phillips et al. 1996, Feigelson et al. 1998)
- WTTSからの非熱的連続波電波 (Andre 1996)

Outflow モデル



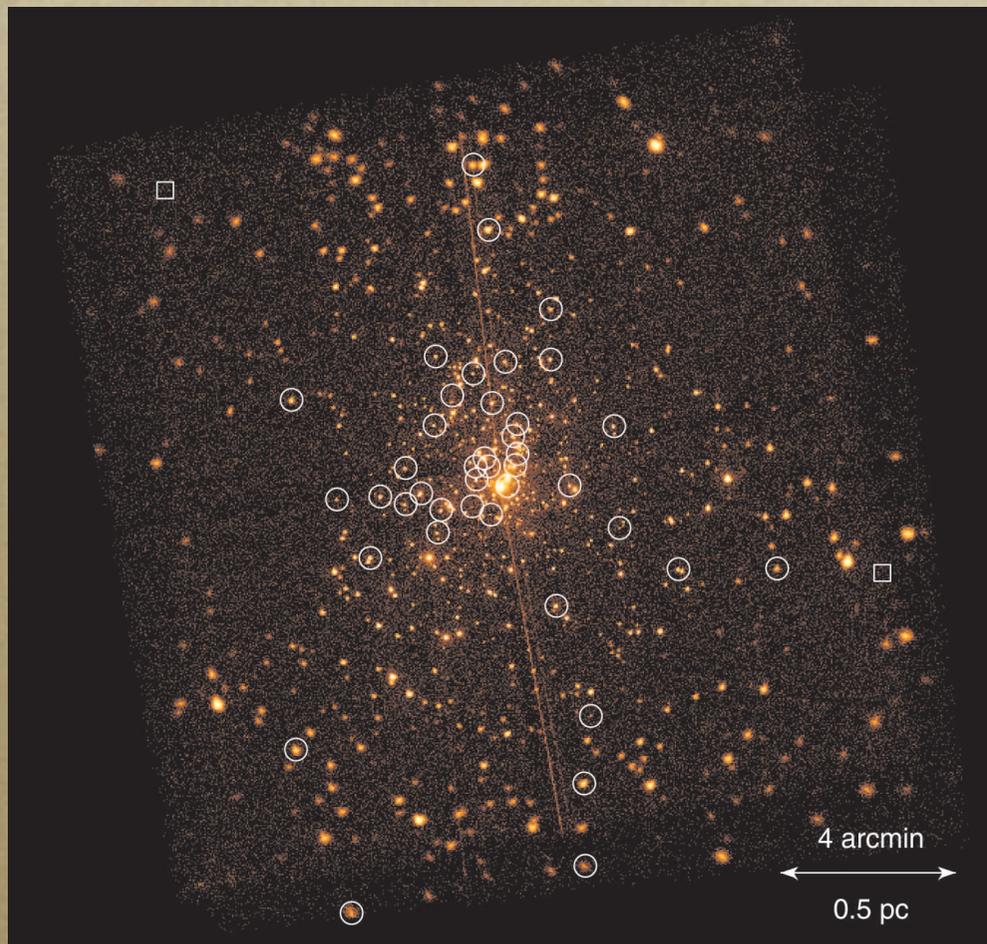
MHD disk wind model (Uchida et al.)



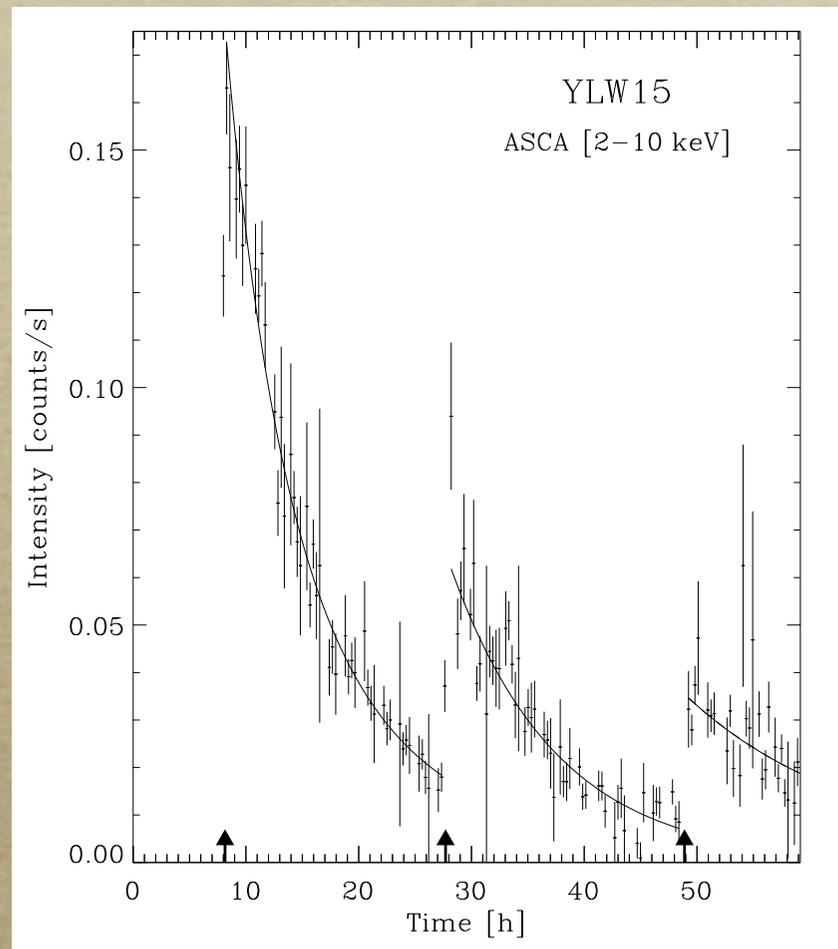
X-wind model (Shu et al. 1997)

YSOsからのX線放射

頻繁にX線フレア



X線天文衛星Chandra でみたOrionクラスター (Feigelson et al. 2002)



X線天文衛星ASCAによるYLW15のX線フレア (Tsuboi et al. 1999)

非熱的連続波電波の起源

- 円偏波

- MeV電子、B~kGからのジャイロシンクロトロン放射

- X線光度と電波光度に相関 (Gudel 2002, Furuya et al. 2003)

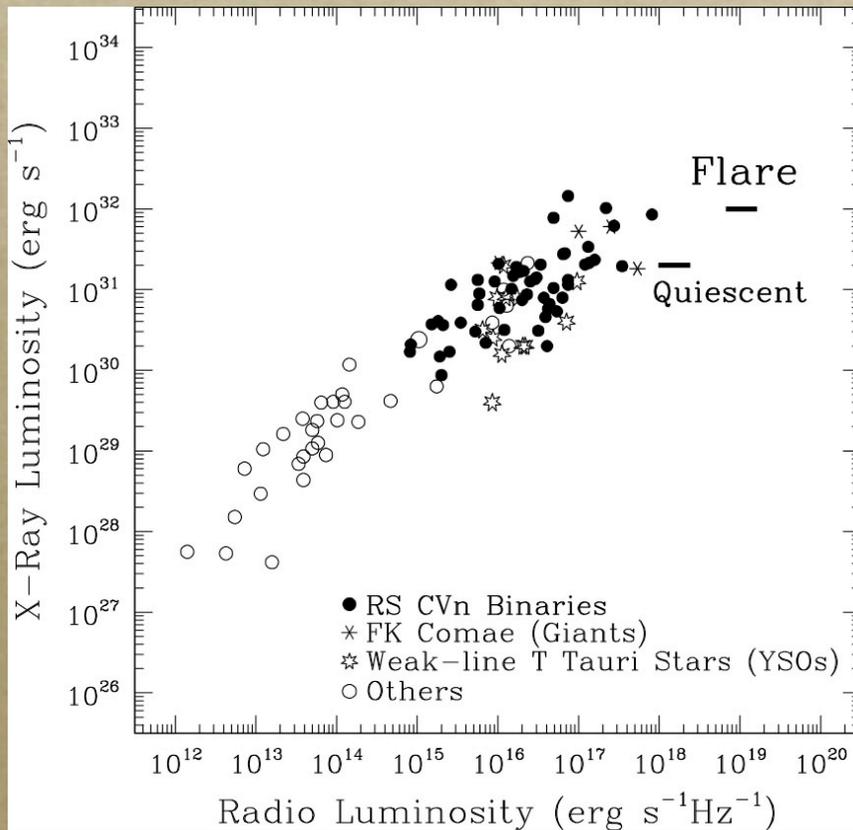
- 放射メカニズムや場所に密接な関係

- 太陽フレアとのスケーリング則 (Shibata & Yokoyama 1999)

- 磁気リコネクションによる巨大フレア ($R > 20 R_{\odot}$) (Hayashi et al. 1996, Montmerle et al. 2000)

Lx-Lr, T-EMの相関関係

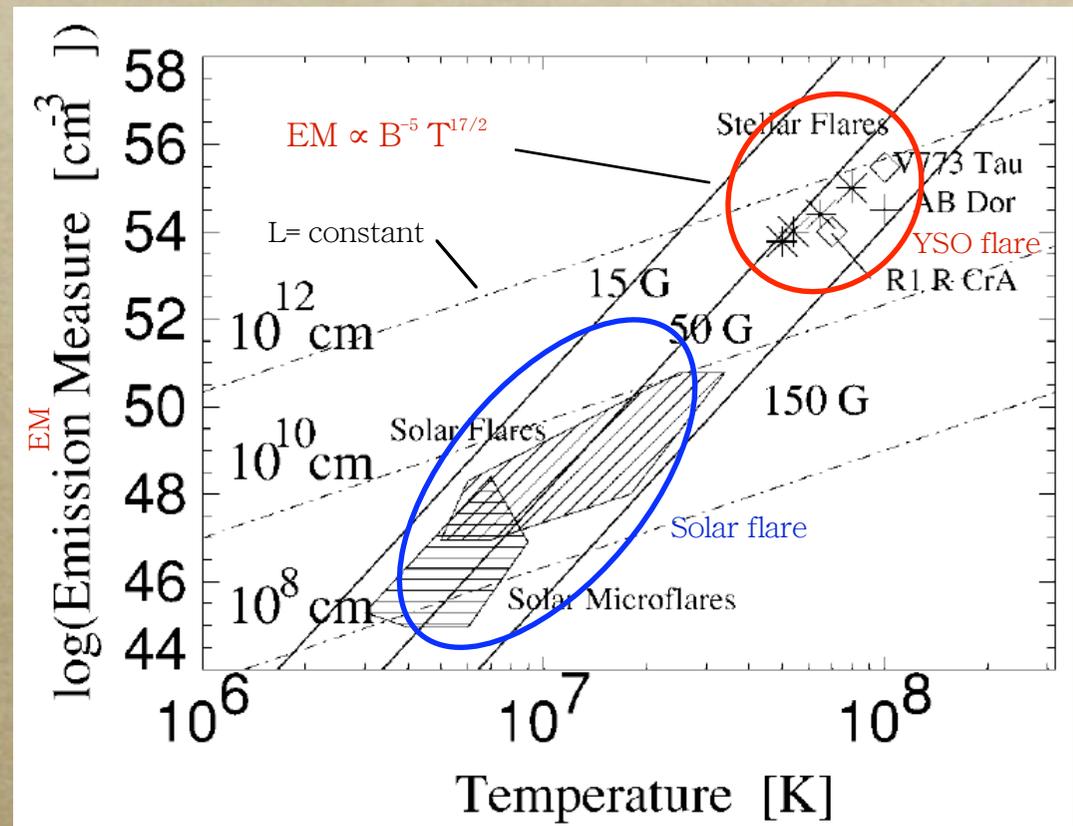
$L_x/L_r \sim 10^{15}$



X線光度と電波光度の相関

(Furuya et al. 2003, originated from Gudel 2002)

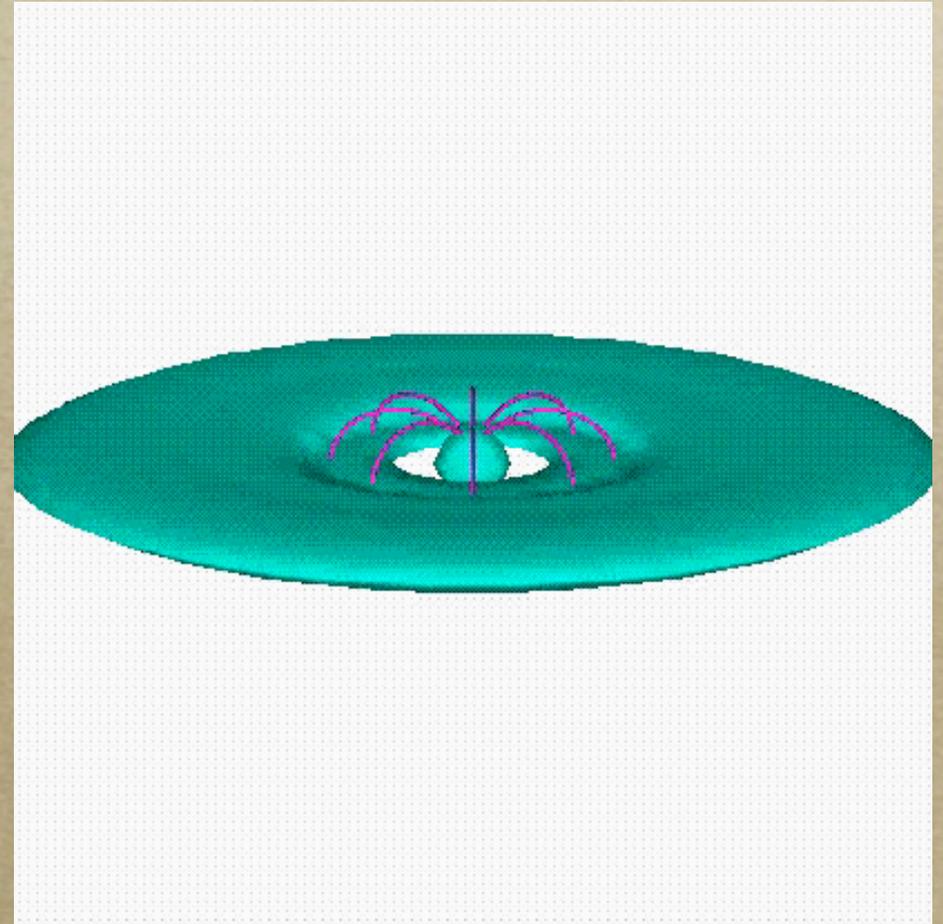
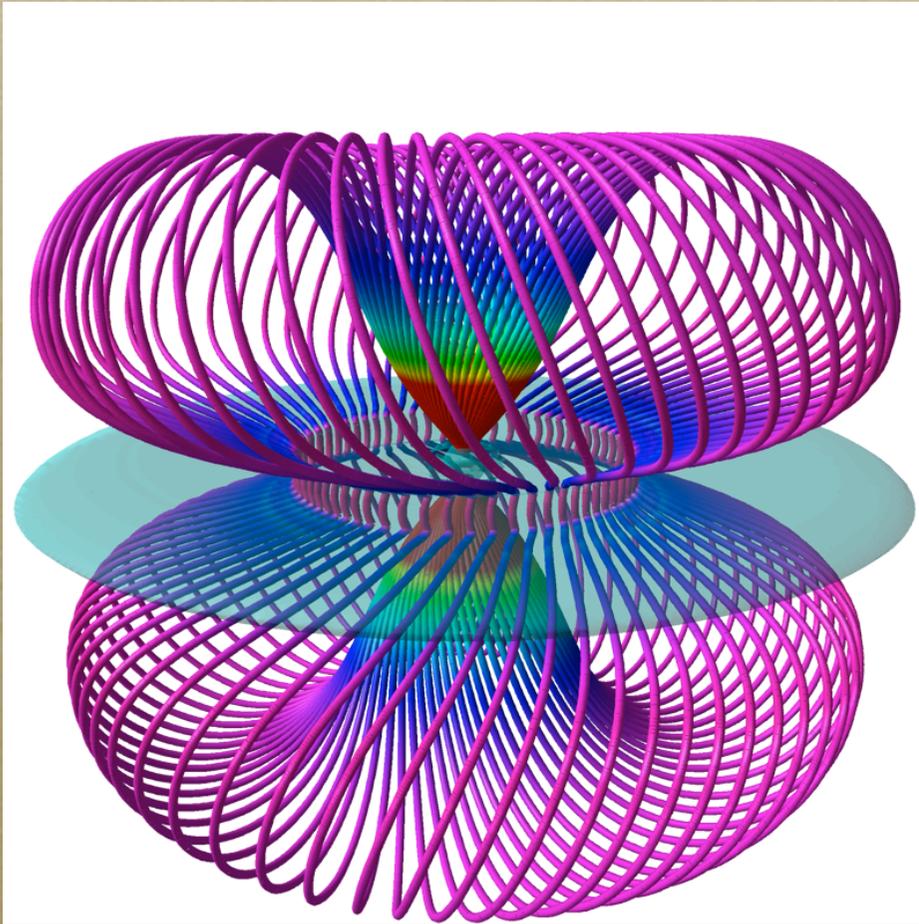
太陽フレアとの類似性



Shibata & Yokoyama (1999)

温度(T)とemission measure(EM)スケーリング則

磁気リコネクションによるX線フレア



画像提供：林 満 (国立天文台)

YSOsからの非熱的連続波

VLBI観測の結果

<5-30R_o 10⁷-10⁹K

Object	Region	Spectral Type	Log(L _{5GHz}) (erg s ⁻¹ Hz ⁻¹)	Source Radius (R _* ≈ 3 R _⊙)	T _b (10 ⁸ K)	Ref.
HD 283447	Taurus	K3	17.5	< 5 to 15	~ 10	PLF
HDE283572	Taurus	G9	16.8	< 4 to 9	3-6	PLF
Hubble 4	Taurus	K7	16.9	< 4 to ≲ 17	0.8-10	PLF
HP Tau/G2	Taurus	G1	16.7	< 3.5	> 6	PLF
DoAr21	Oph	K0	17.5	up to 11	≲ 10	PLF
ROXs39	ρ Oph	K5	16.6	< 10	> 0.1	ADPL
WC3	ρ Oph	F7 (IR)	17.2	< 10 to 25	0.3	ADPL
VSSG 11	ρ Oph	M3 (IR)	16.6	< 10	> 0.1	ADPL
ROC16	ρ Oph	Cool (IR)	16.9	< 10	> 0.2	ADPL
VSSG 14	ρ Oph	A7	17.4	< 10	> 0.6	ADPL
S1	ρ Oph	B3	17.3	~ 7	1.5	APLK
Θ ¹ Ori A	Orion	B3/TTS	18.6	~ 50	≳ 0.4	(1) FMC

T Tau Sb	Taurus	M	16.9(8.4GHz)	14.5 R _o	0.4-1.0	(2)
GMR-A	Orion	K5	19.6(86GHz)	<36 R _o	>0.5	(3)(4)

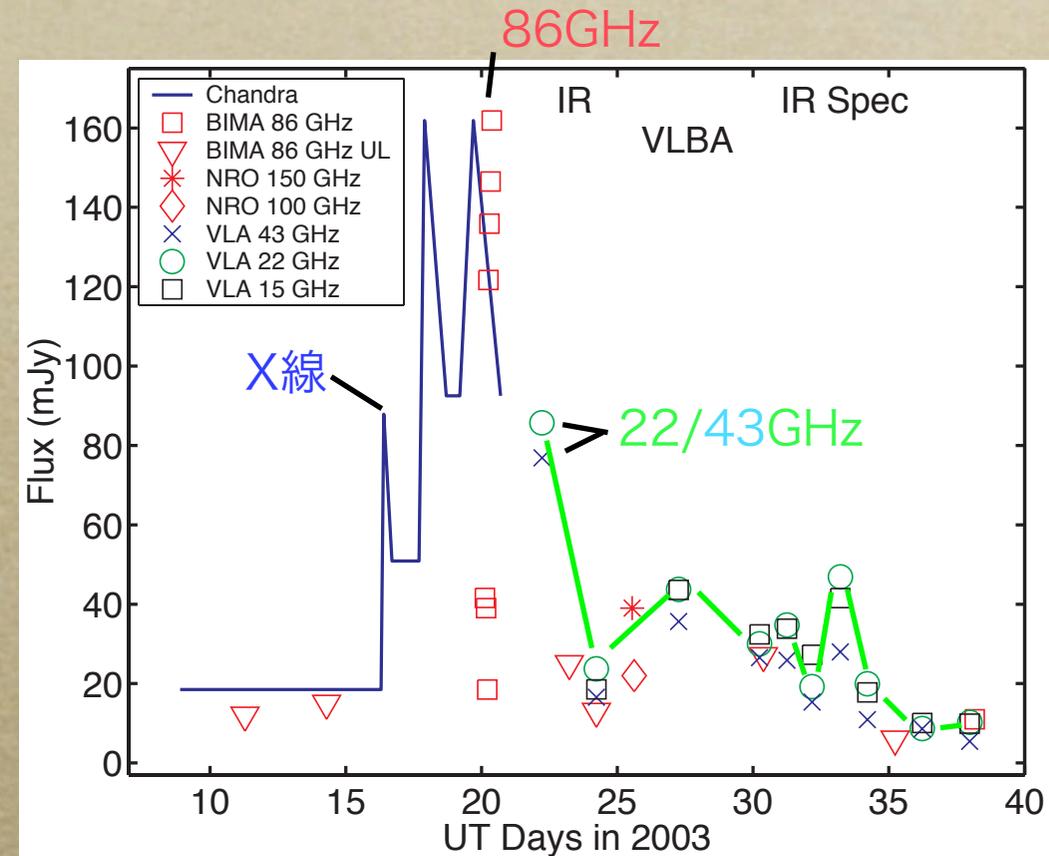
最近進展

PLF = Phillips, Lonsdale & Feigelson (1991); ADPL = André et al. (1992); APLK = André et al. (1991); FMC = Felli, Massi & Churchwell (1989)
from Table 1 in Andre (1996)

(1) Garrington et al. (2002), (2) Smith et al. (2003), (3) Bower et al. (2003), (4) Furuya et al. (2003)

巨大電波フレアの例:GMR-A

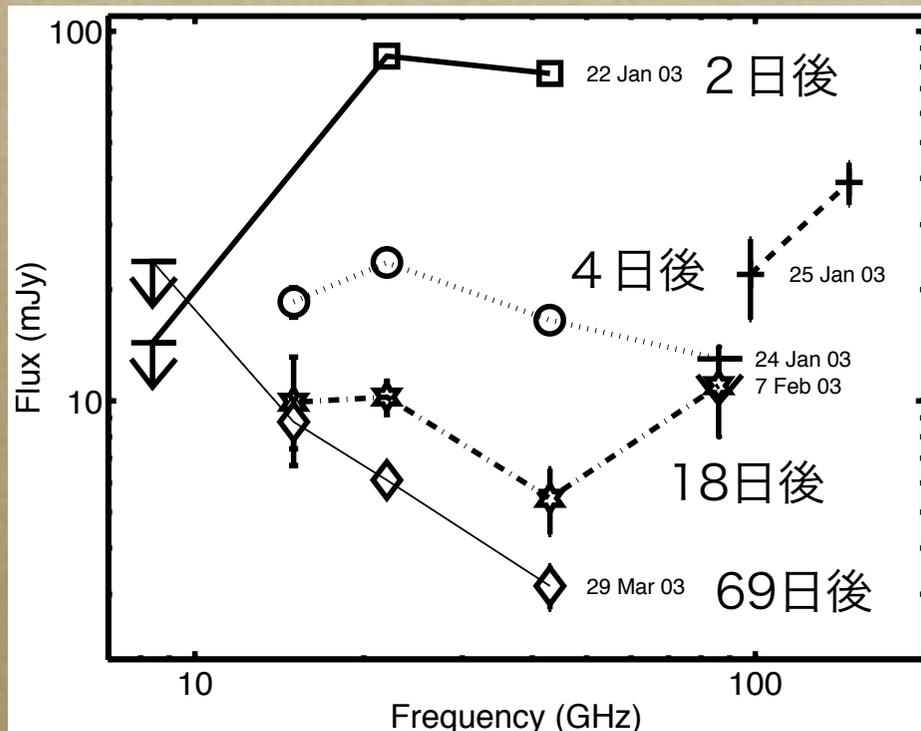
- WTTS in Orion(450pc)
- 86GHzで巨大フレア
 - 数時間以内～160mJy
 - X線フレア直後
 - 変動大きい
 - 70日後までセンチ波で検出
- 円偏波を検出
 - ジャイロシンクロトロン放射
- 地上VLBIでは分解されず



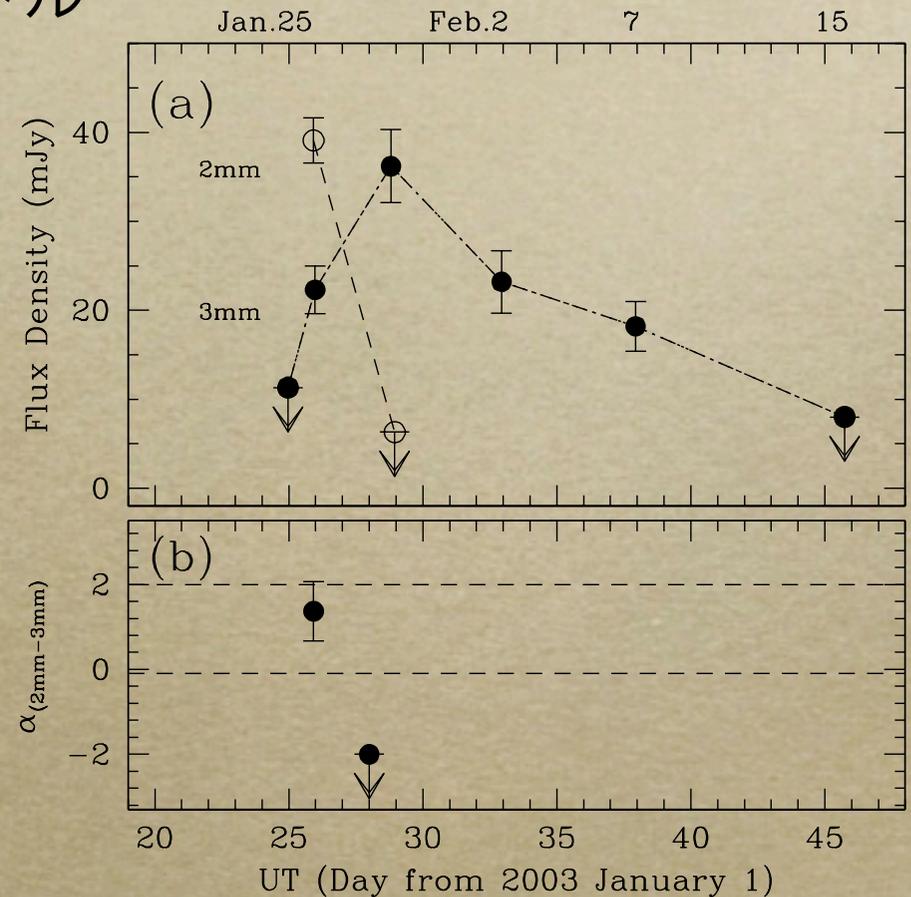
GMR-Aのミリ波、センチ波、X線での光度曲線
(Bower et al. 2003)

GMR-Aのスペクトル時間変化

高周波で強い／フラットなスペクトル



GMR-Aのスペクトルの時間変化
(Bower et al. 2003)



野辺山ミリ波干渉計によるGMR-Aの光度曲線
(Furuya et al. 2003)

未確認の磁場構造の存在

- 原始星 (R CrA IRS5; Feigelson et al. 1998) から円偏波を検出
- 原始星から巨大X線フレアの検出 (Tsuboi et al. 2000)
 - 磁場構造の存在を示唆
- CTTS/原始星では非熱的電波受からない
 - これまでは光学的に厚い低周波のみ
 - 伴っている電離ガスのwind/jetによる自由-自由吸収またはシンチレーションによるサイズ拡大 (Andre et al. 1992)
- 光学的に薄い20-40GHzのVLBIで初めて検出可能

VSOP-2の重要性

○ 近傍の星形成領域(距離~150pc)

○ VSOP-2の分解能：
 $38\mu\text{as}(@43\text{GHz})=1.2R_{\odot}$

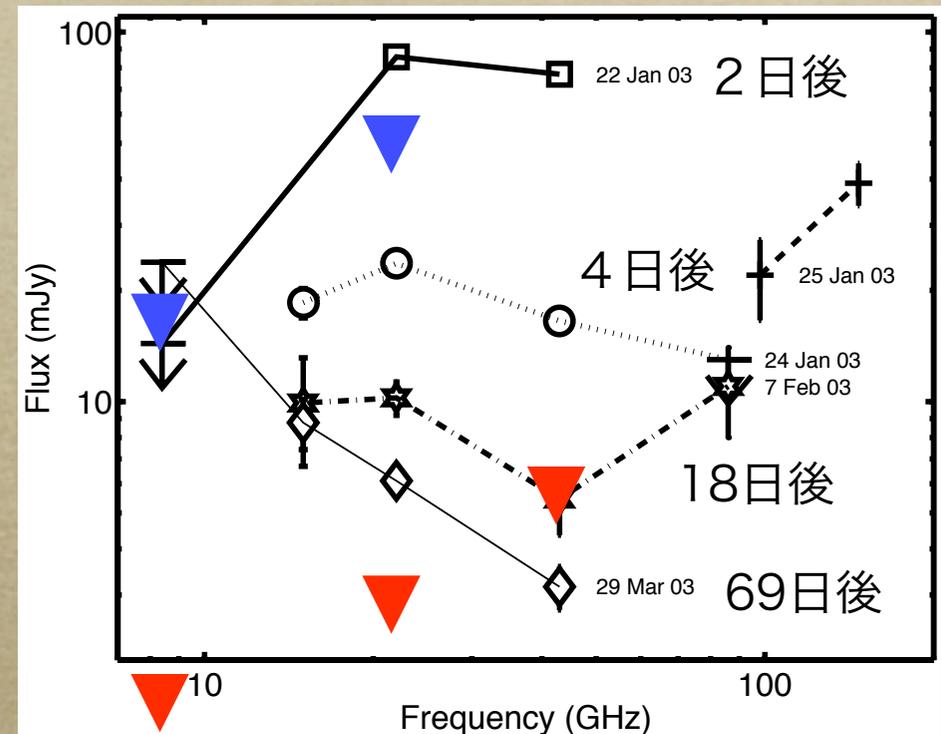
○ フレアを起こす磁気圏を
詳細にマッピング

○ フレアの直後

○ 高周波で (cf. GMR-A)

○ 位相補償を行えば十分検出

○ 偏波観測で磁場構造を探る



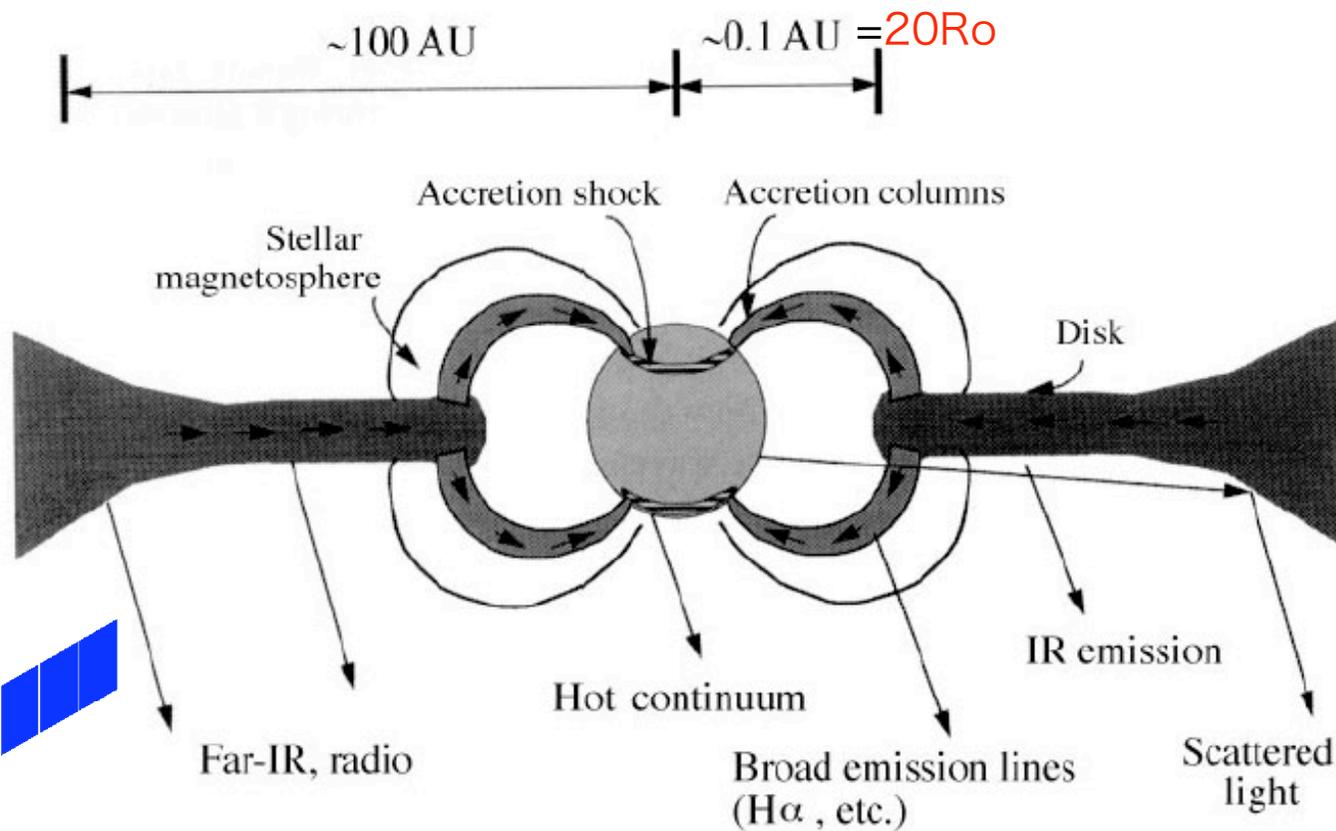
GMR-Aのスペクトルの時間変化 (Bower et al. 2003)とVSOP-2の検出感度 (▼)。位相補償した場合の感度は (▼) で示す。

YSO磁気圏の構造

- YSOからのX線：
 - 星形成過程のシナリオに多大なインパクト
- 日本のX線天文学：
 - 原始星からのX線の発見など世界をリード
 - だがX線フレアを直接的撮像は困難
- VSOP-2で直接的証拠へ：
 - フレアを直接撮像し、磁気リコネクションを検証
 - X線観測で蓄積された知見をさらに発展

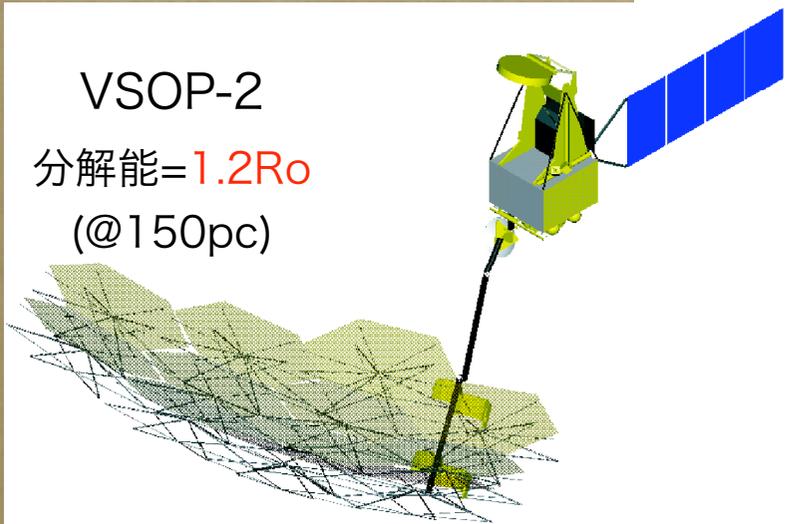
YSO磁気圏の模式図

X線では分解できない
フレアの様子／運動



VSOP-2

分解能=1.2 R_o
(@150pc)



Hartmann (1998)

降着円盤から中心星への質量降着が
起こっている領域の様子を解明したい

星形成のサイエンス

- YSO磁気圏の構造
- X線／電波フレアのメカニズム
- 磁場による星-円盤の相互作用
- メーザー源の力学的中心
- 近接連星系
- アストロメトリー etc

ALMAによる高感度観測

- *Rate of Flaring Activity* (Bower et al. 2003)

$$N(S > S_0) = A \left(\frac{S_0}{100 \text{ mJy}} \right)^{-\alpha}$$

$$A = 0.01 - 0.1 \text{ day}^{-1}; \alpha = 1$$

~100-1000 flares at 10 μ Jy by ALAM

- ALAMだと数時間の積分で数百個検出