

SKA-VLBIと(大質量)星形成

山口大学

元木業人

本検討のテーマ

SKA-VLBIで

熱放射

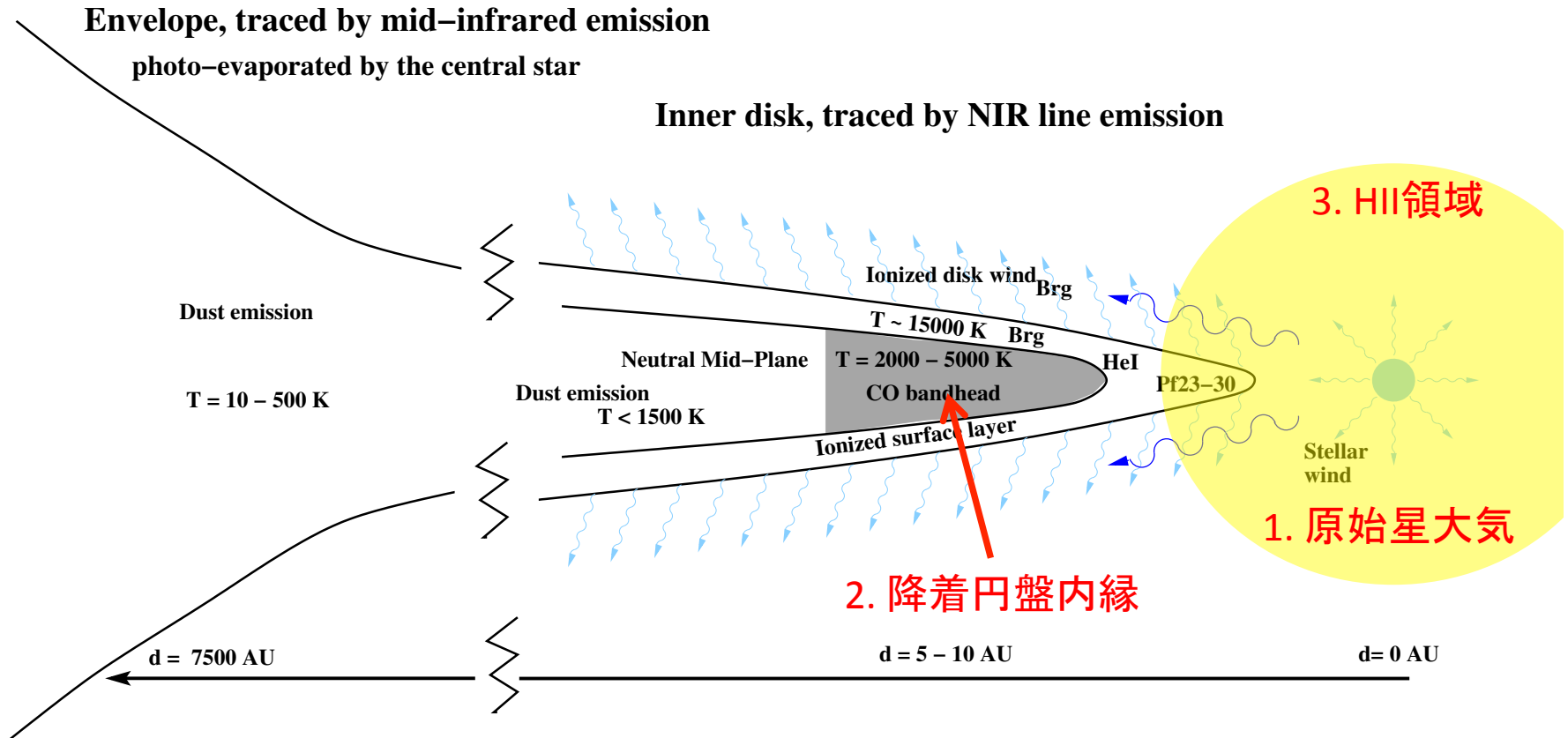
見えますか？

目次

1. 観測可能性のあるターゲット
2. SKA-VLBIにおける感度見積もり
3. その他検討事項

観測可能性のあるターゲット

大質量星周りの”高輝度”熱放射



赤外線観測から推定される降着円盤内奥の構造(Bik et al. 2008)

大質量星周りの”高輝度”熱放射

1. 原始星大気

→サイズ/輝度温度/光度の直接決定

2. 降着円盤内縁

→星表面への降着率/geometry

3. 極小HII領域

→核融合開始はいつか？

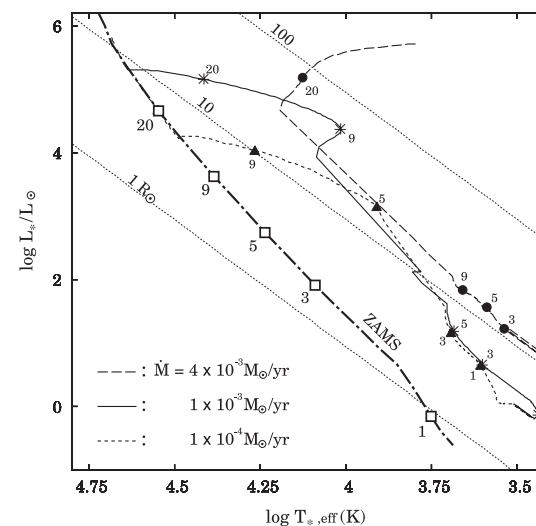
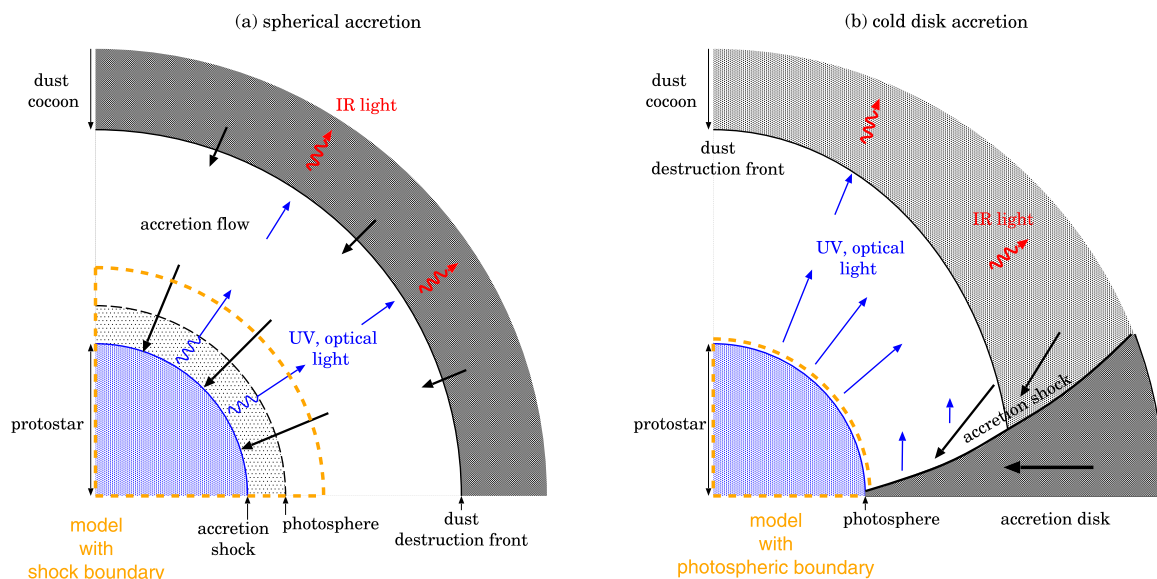
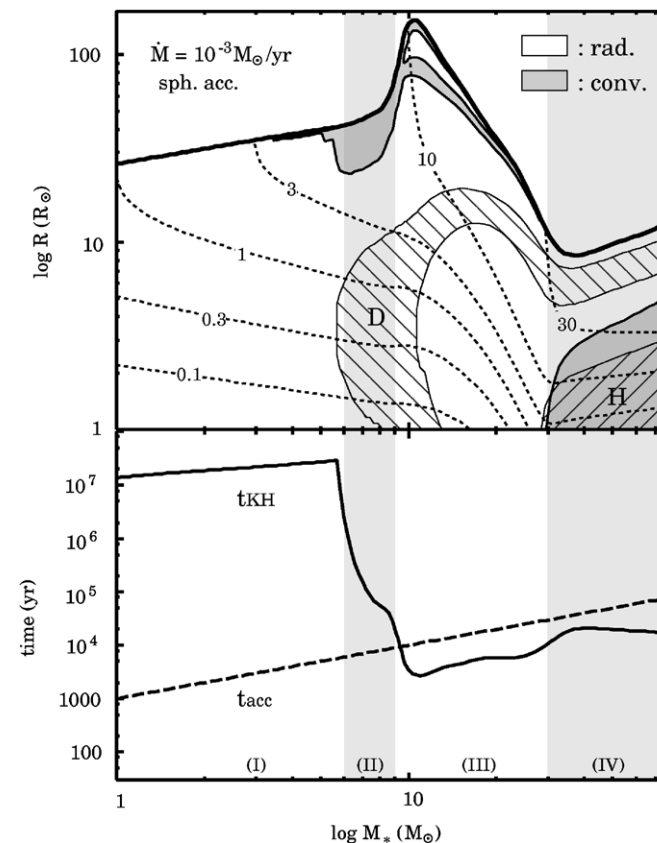
1. 原始星大気の直接撮像 (水沢VLBI観測所SKA検討WGより)

原始星の直接撮像

- 最も欲しいブレークスルー。
→星本体が見えれば大部分の物事が解決する
- “星形成”なのに星までたどり着いてない
→光球サイズはVLBIの分解能
と比べてもまだ小さい
- 現状では間接的な研究
SEDによる議論
→パラメータだらけ、データ点不足
時間変動現象
→観測手段に難あり、全天体ではできない

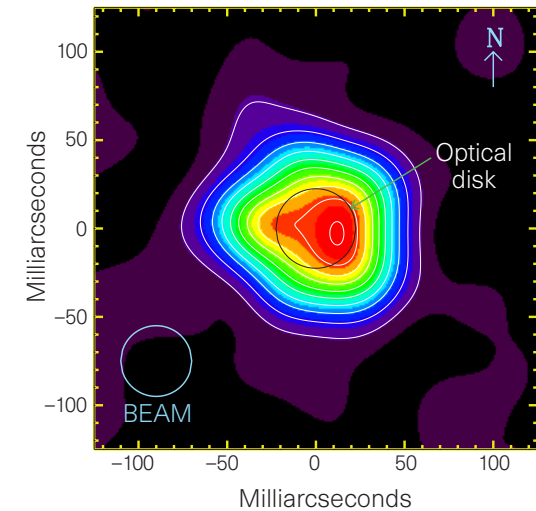
大質量原始星の進化

- 高降着率では**膨張** (Hosokawa+ 2010)
 光球サイズ $\sim 100 R_{\text{sun}}$
 低温 $T_{\text{eff}} < 10^4 \text{ K}$ (A型星相当)
 大光度 $10^5 L_{\text{sun}}$
- 進化パスは冷え方(= geometry)に依存
 → エントロピーをどこで捨てるか？



Radio Photosphereはどこか？

- ベテルギウスの例
電波帯での光球サイズ
→低周波程大、温度勾配を反映
(Lim et al. 1998)



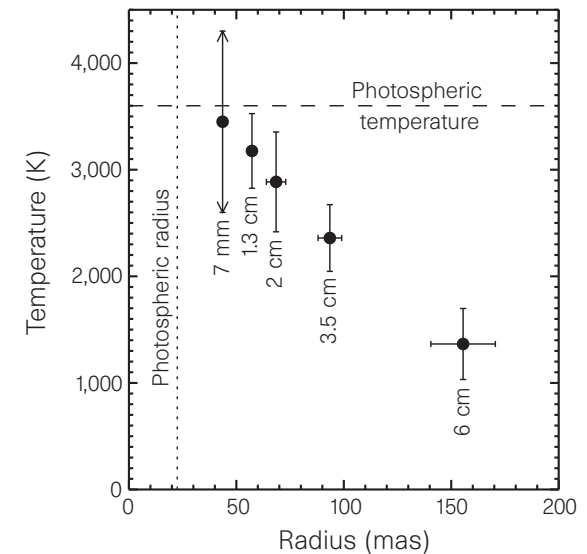
- 膨らんだ原始星も似た構造なら

$$R_{\text{opt}} = 100 R_{\text{sun}}$$

で

$$R_{\text{rad}} = 1000 R_{\text{sun}} \sim 4.7 \text{ AU}$$

- 視直径 $\sim 10 \text{ mas}$ @ 1 kpc
- GHz帯なら分解可能？



放射機構は何か？

- いわゆる H⁻ free-free
→ H, H₂ と e⁻ の散乱
(e.g., Reid & Menten 1997)

< 4000 K では低電離度のため
free-free よりも効く
- Orion KL の円盤でも見られる (?)
→ 他の YSO でも星近傍では
数千 K のガスが観測されている
(e.g., Bik et al. 2008)

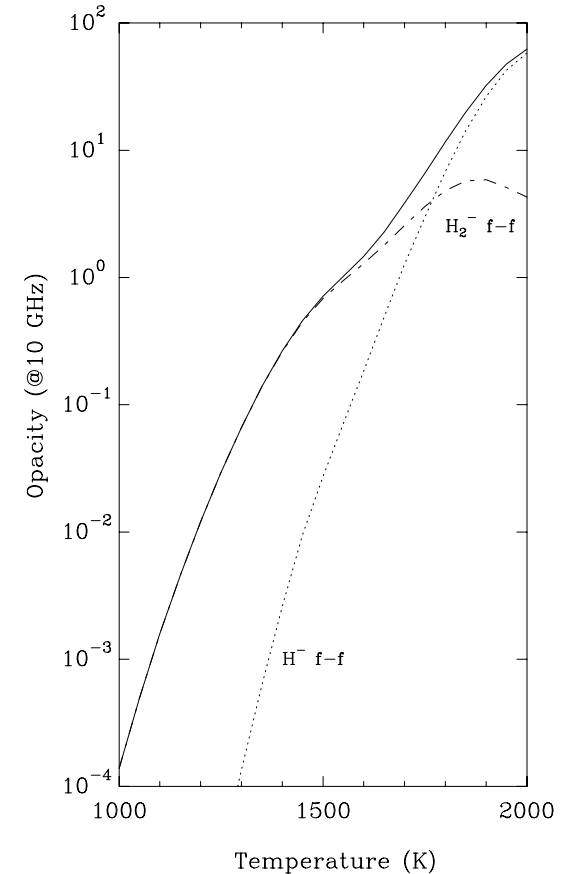


FIG. 6.—Opacity at 10 GHz vs. temperature. H⁻ and H₂ free-free opacities, resulting from the interactions of free electrons with neutral H atoms and H₂ molecules, are indicated with a dotted line and a dash-dotted line, respectively. Opacities are for a uniform slab of total (H + 2H₂) density of $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ and a thickness (path length) of $3 \times 10^{12} \text{ cm}$ (0.2 AU). The solid line is the total opacity.

予想されるFlux

- ベテルギウスの例を当てはめる
可視光球サイズ $100 R_{\text{sun}}$ 、1kpcとすると...

Freq	Teff	視直径	Flux
20 GHz	3200 K	2.5 AU	4.5 μJy
15 GHz	2800 K	3.0 AU	3.2 μJy
10 GHz	2500 K	3.8 AU	2.0 μJy
6 GHz	1500 K	6.4 AU	1.2 μJy

→ 1 μJy @ 5σ なら行けそう？

→ そもそももう少し高温の可能性もあり？

どんなメリットがあるのか？

- 高降着率下での原始星進化パスの決定
 - 理論モデルの直接証明
- 多周波でサイズと輝度分布を測定
 - 原始星内部の温度分布
 - 重要パラメータの多くが決定可能
(SED頼みの不定性の多い議論から脱却)
- 固有運動測定可能
 - 降着系内での星団/連星系の軌道
 - Global Collapse / Competitive Accretionモデルへ制限

どんな天体がターゲットか？

必要条件

1. 比較的近傍(< 2 kpc)で
2. Massive IRDC内で最初に作られる天体の
3. 膨張時期($t \sim a \text{ few} \times 10^3 - 10^4 \text{ yr}$)

→主降着期の期間を $\sim a \text{ few} \times 10^5 \text{ yr}$ とすると
全MYSOの1-10%ぐらいいはいてもいい？

→高分解能かつ広視野での探査が必要

具体的には

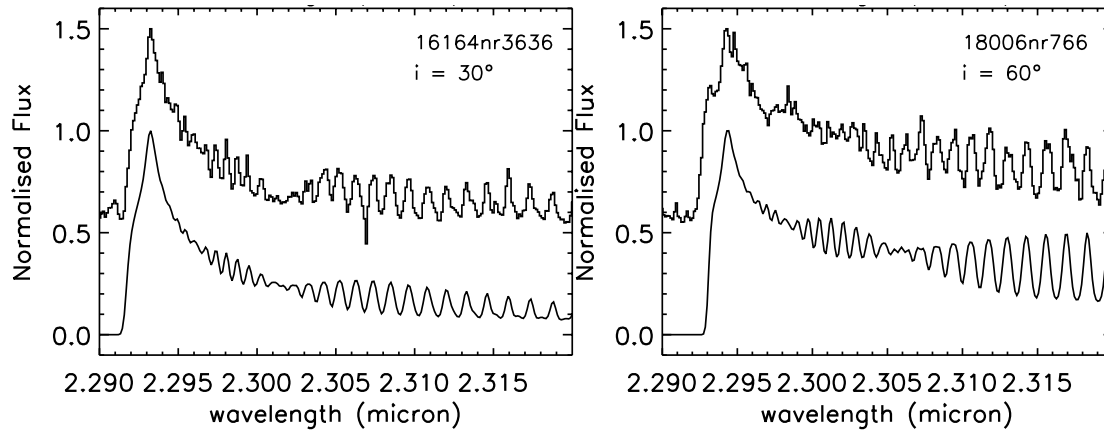
- 明るいHerschel点源を含むMassive IRDCを狙う？
- 原始星脈動の予想時期に一致 (Inayoshi + 2013)

→周期変動メタノールメーザー源

かつHII領域不在の天体を狙うと確率up?

2. 降着円盤内縁 (降着流)の撮像

円盤内縁(〜10 AU)の近赤外線観測 (e.g., Bik+ 2008, Wheelwright+2010)

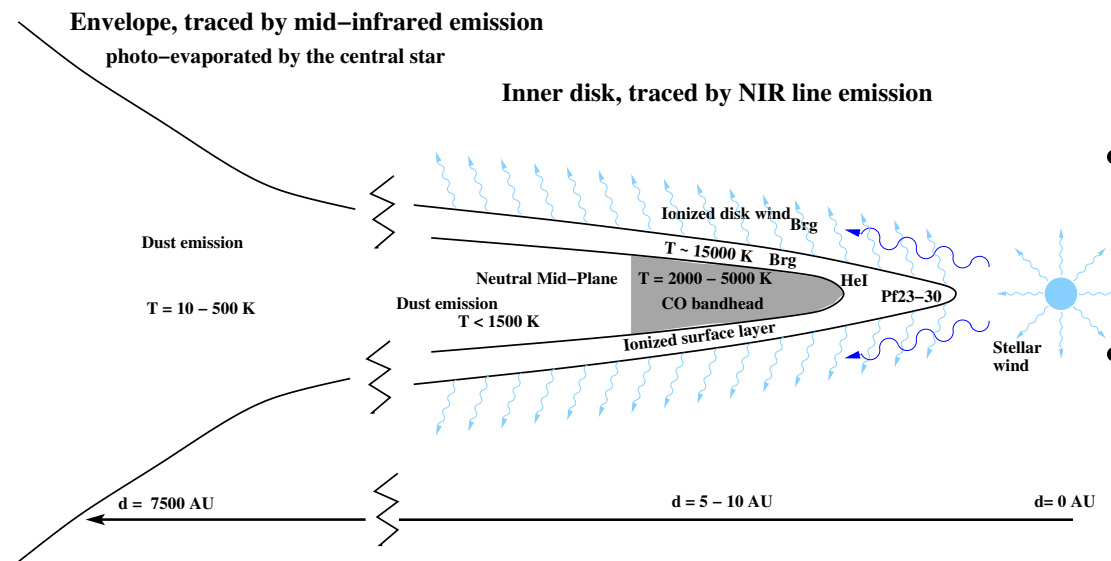


- CO-bandhead輝線
($T_k \sim 3000$ K)
→ 晩期星の表面温度くらい
→ H⁻ free-freeで見える?

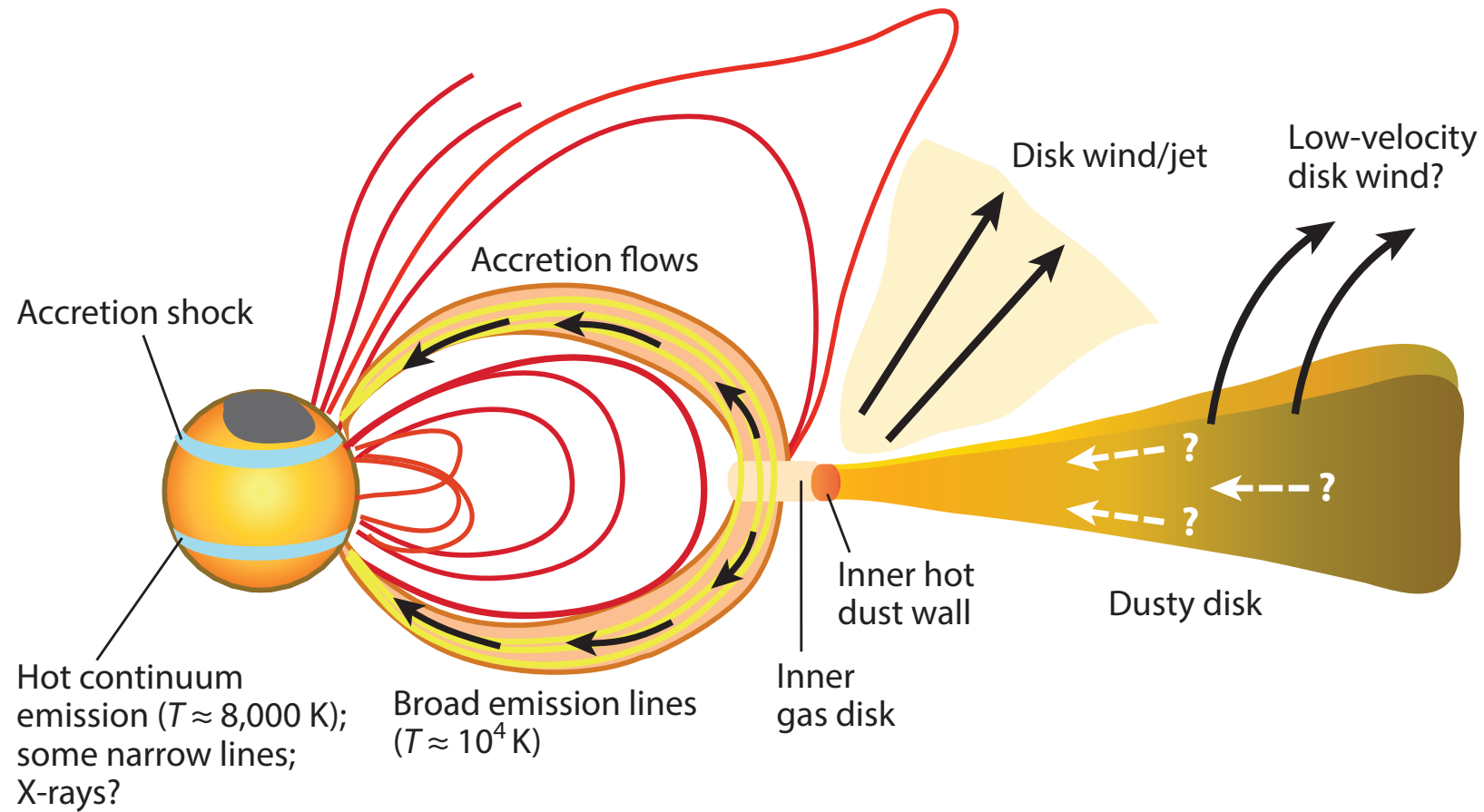
- 視直径は大きめ(〜10 au)
→ 輝度温度感度を稼げる

- スペクトル形状はケプラー円盤で再現可能

- 空間的には未分解



前主系列星近傍の場合 (Hartmann et al. 2016)



星表面への降着パスは？ (低質量星の場合)

- Takasao et al. (2018)
 - 円盤に捻られた増幅磁場ではね上げられた
ガスが極圏へ降着(Non-Radial)
 - 弱磁場でも増幅されるのでOK = 大質量星でもOK?

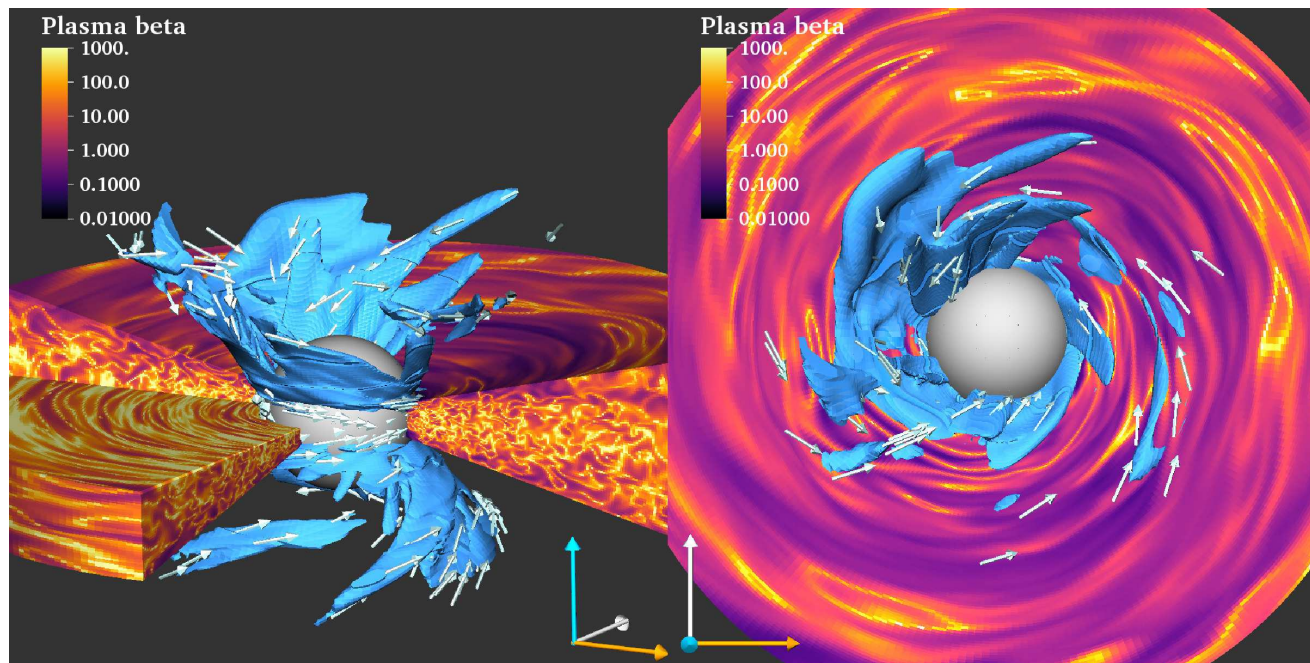


Figure 14. Snapshot of funnel-wall accretion flows onto the central star at $t = 285t_{K0}$. The central star is shown as the central sphere, and the inner disk is colored with the value of plasma β . The blue regions indicate the fast accreting material ($v_r < -0.2v_{K0}$). Arrows denote the direction of velocity vectors.

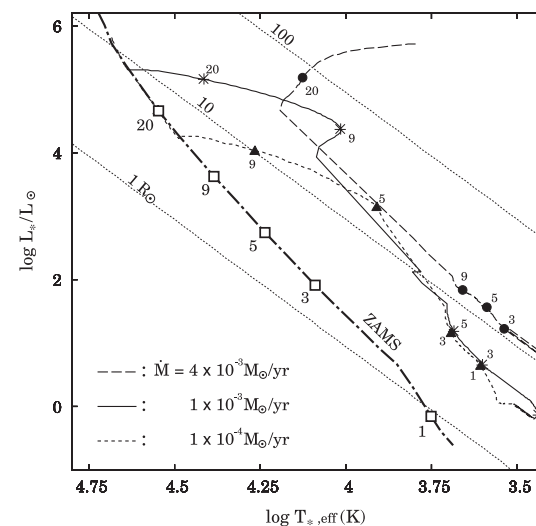
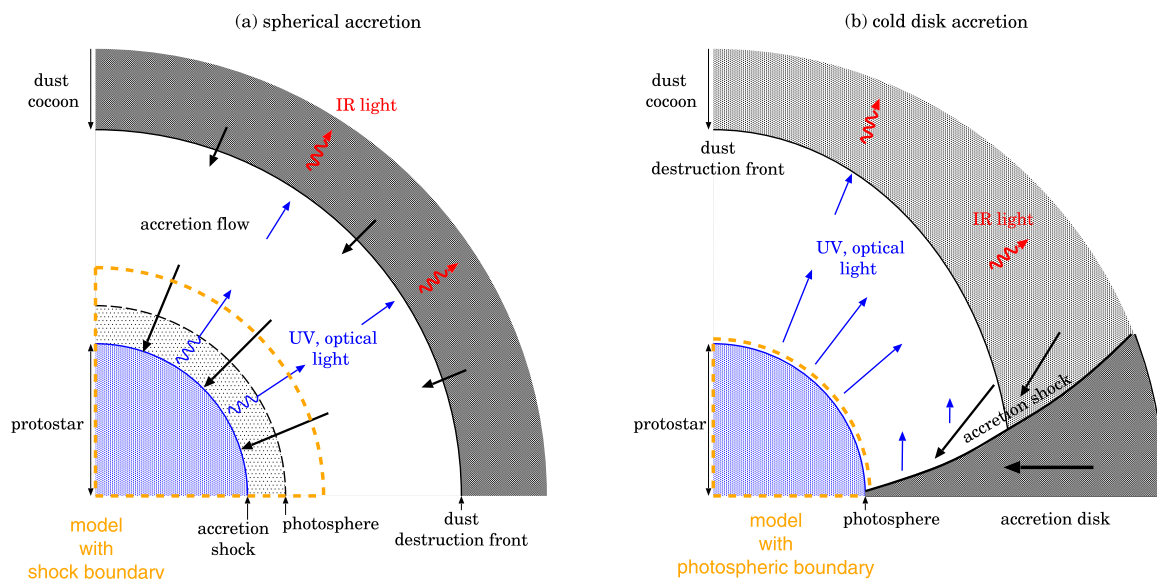
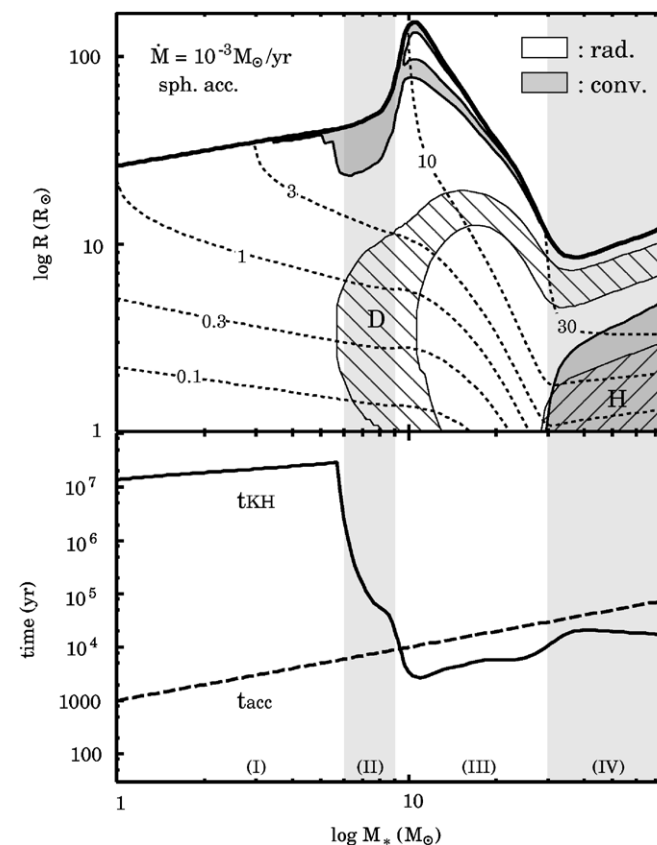
何がわかる？

- 原始星表面への降着率/Geometryの推定
→原始星進化へ決定的な影響
- 原始星大気と降着流の境界はどこ？
→星が膨らんでいれば降着衝撃波が
“Hot Spot”として見える？
- そもそも降着流が邪魔で星が見えない？

3. 極小HII領域

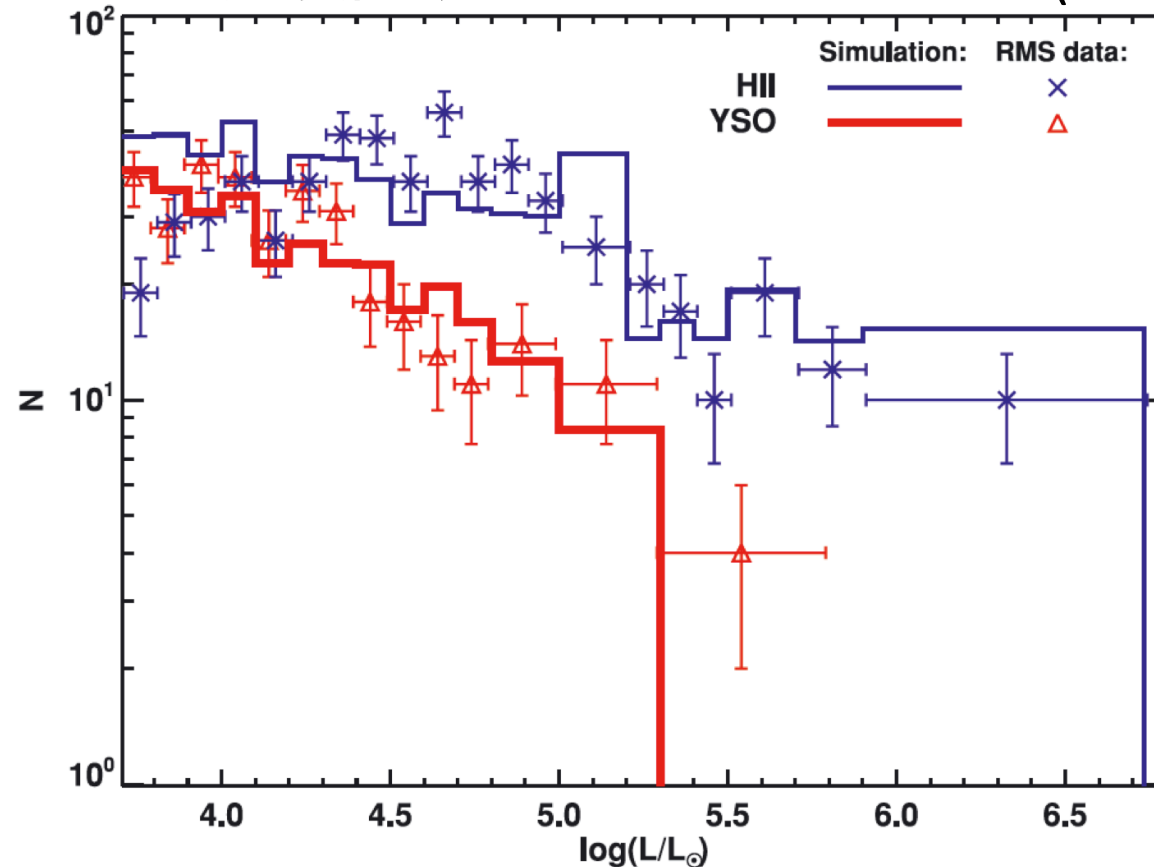
大質量原始星の進化

- 高降着率では**膨張** (Hosokawa+ 2010)
→核融合開始の質量が大きくなる
(最大で30 Msun?)
- 天体ごとの個性がどの程度効くのか?
→降着率/Geometryの多様性



観測から示唆されるHII領域形成時の質量

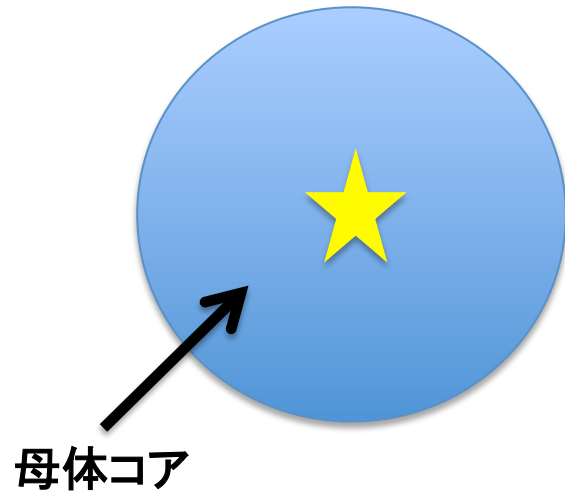
系内MYSOの光度関数とベストフィットモデル(Davies+ 2011)



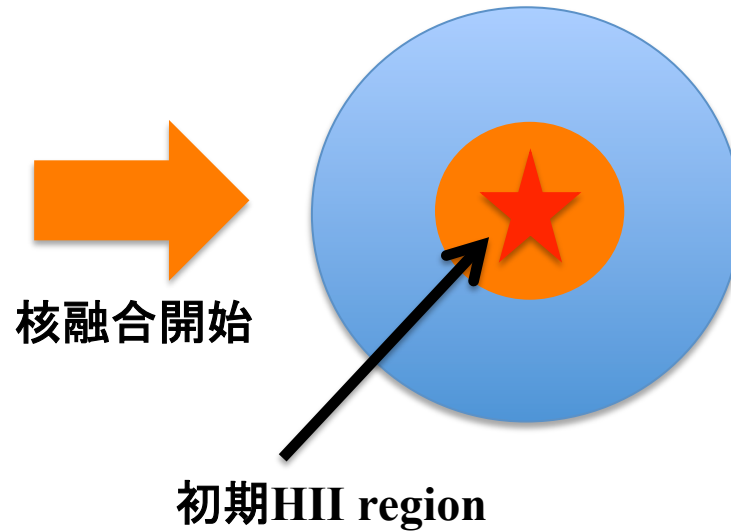
○HII領域無し天体の上限質量 $\sim 25 M_{\text{sun}}$ 前後
→理論的な予想とよくあう？

HII領域の初期進化過程

1. 大質量原始星段階

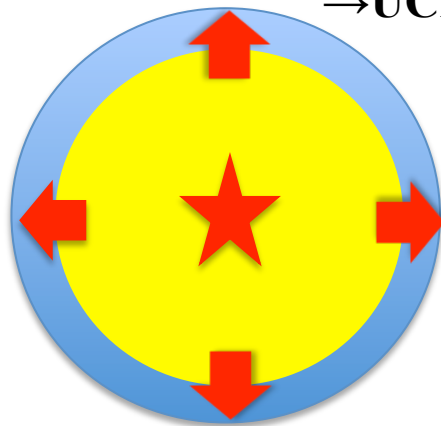


2. 電離平衡で決まるHII領域 (ストームグレン球)



降着による光子消費
&
重力 + 外圧
による閉じ込め

3. 圧力平衡で決まる半径へ膨張
→UCHII領域



放射圧 + 熱的圧力
> 外圧 + 重力

予想される天体サイズ

- 単純な電離平衡から予想されるHII領域サイズ

$$R_0 = 50 \left(\frac{N_L}{10^{47.36} \text{ s}^{-1}} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{n_{\text{H}_2}}{10^7 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{2}{3}} \text{ au}, \quad (20 \text{ 太陽質量のZAMSを仮定})$$

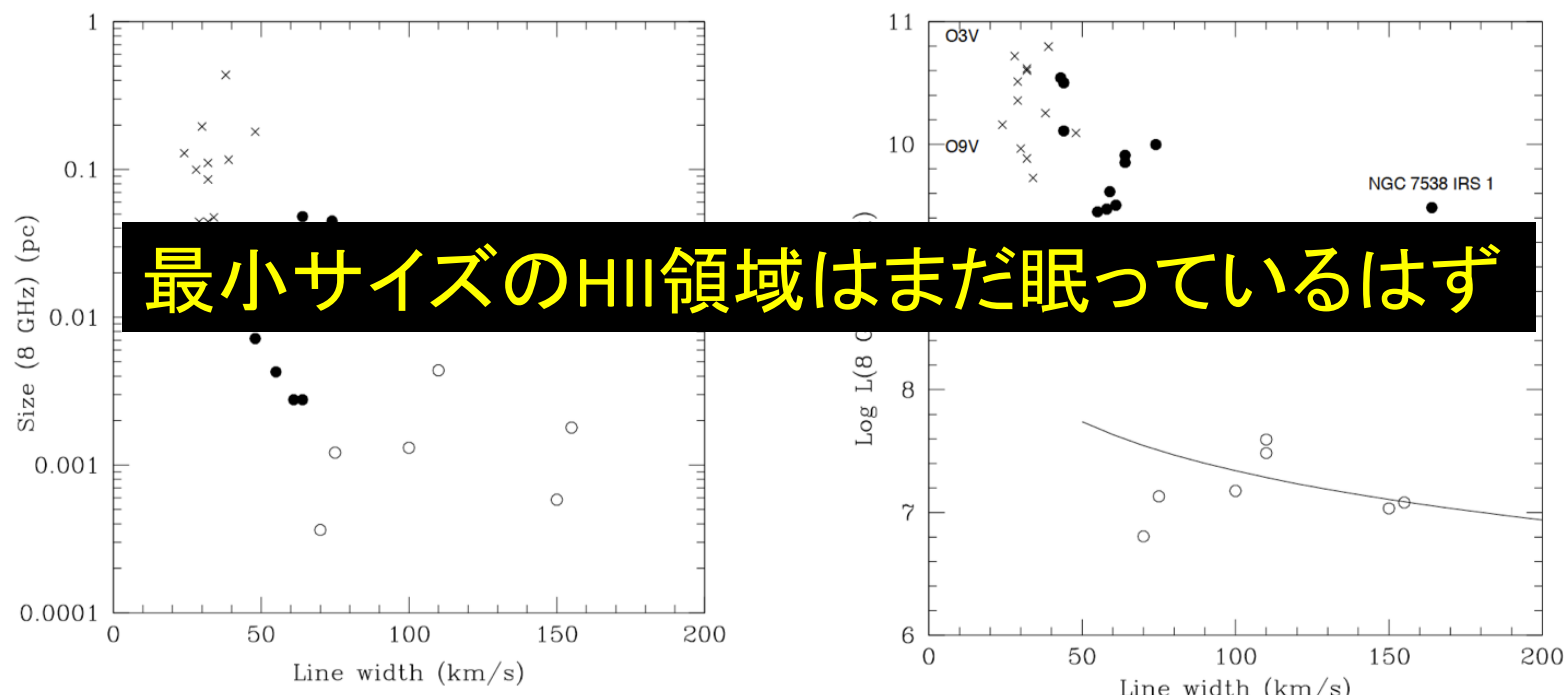
- 電離ガスに対する重力半径

$$R_g = \frac{GM_*}{c_i^2} = 10^2 \left(\frac{M_*}{20 M_\odot} \right) \left(\frac{T_e}{10^4 \text{ K}} \right)^{-1} \text{ au.}$$

ここで $R_g > R_0$ であればHII領域は圧力膨張できない
→HII領域の**最小サイズ**が R_g となる

実際に観測されるHII領域のサイズ

- 基本的には ~ 1000 AU
- 最も小さいもので ~ 300 AU程度

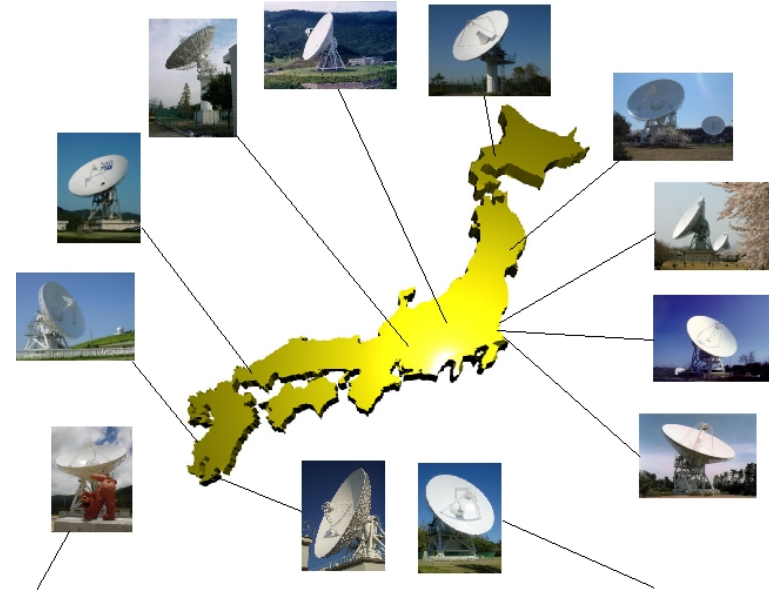


最小サイズのHII領域はまだ眠っているはず

縦軸: HII領域のサイズor 電波/赤外光度比 (× UCHII, • HCHII, o大質量原始星)
横軸: RRLの線幅 Hoare et al. (2007)

JVN茨城基線によるFRINGEサーベイ

基線長: ~ 82 km
帯域: 512 MHz
30m級アンテナx3台



角分解能: 80 mas (X)
基線感度: 0.6 rms (10分積分)

- 輝度温度で ~ 10000 K (7σ)
- 極小HII領域を1000天体規模でサーベイを予定
- イメージングはSKA(-VLBI)でやれば良い?

何がわかる？

- 核融合開始時の星質量/バラツキ
- 最初期HII領域の形状
 - 降着流の空間分布にも制限
- 降着流の変動性
 - 物量変化による電離半径の増減
 - 円盤内縁のタイムスケールで生成消滅？

SKA-VLBIにおける感度見積もり

ターゲットの輝度温度と視直径

	輝度温度	視直径
原始星大気	3000 K	5 au
降着流	3000 K	10 au
HII領域	10000 K	100 au

- 500 - 1000 K (1σ) 程度の感度が必要
- 分解能は1 - 2masあれば十分
→既存望遠鏡との基線は1 - 2 mas (C/X)
(* 5-10 mas分解能で点源仕事なら受かる?)
- あまり低周波だと前景放射が邪魔

FRINGE検出できるか？

- Effelsberg級を想定(SEFD \sim 20 Jy, 帯域2 GHz)
- SKA2でのFRINGE検出感度 (10分積分)

周波数	平均Beam (mas)	1 σ ノイズ (μ Jy)	輝度温度 (K)
5 GHz	1.7	3.5	60000
8 GHz	1.0	3.9	70000
20 GHz	0.4	6.0	110000

というわけで論外

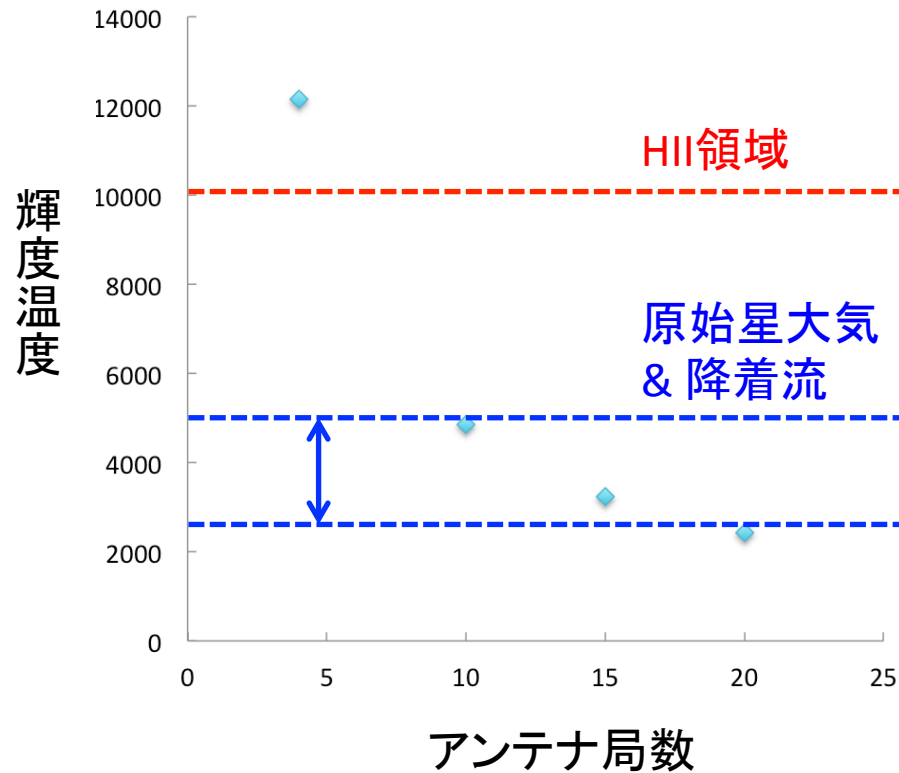
位相補償イメージングでの検出

- Effelsberg級x4局 (SEFD \sim 20 Jy, 帯域2 GHz)
- 5時間積分を想定

周波数	平均Beam (mas)	SKA1 輝度温度(K)	SKA2 輝度温度 (K)
5 GHz	1.7	7500	2400
8 GHz	1.0	7700	2400
20 GHz	0.4	10000	3111

- HII領域を5 σ 検出は可能っぽい
→中/短基線で10 masビームくらいに抑えれば
十分に検出できる

何局あればいい？



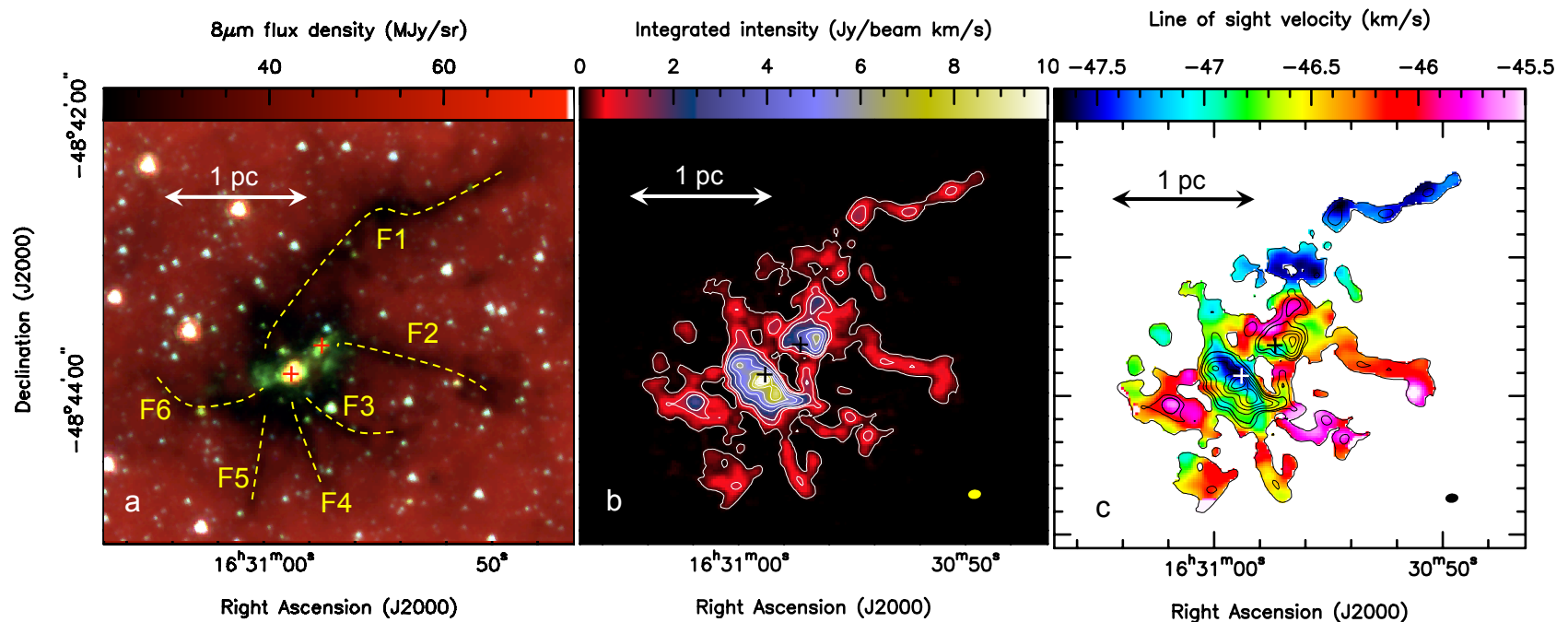
○8.4 GHzでの5 σ イメージング感度

- HII領域はある程度
余裕で検出可能
- 原始星大気 or 降着流の検出には
SEFD 20 Jy級局が最低10以上...
- 光学的に厚いためスペクトル指数 ~ 2
→なるべく高周波(> 10 GHz)で
分解能を1-2masに抑えたいところ
- 仮に新設望遠鏡を考えるなら
中基線に高感度の局が欲しい
- SKA2で3000 km基線があるなら
ギリギリそれで足りる？

その他検討事項

視野は十分か？

- 基本SKA局の視野で制限？
 $\sim 0''.07$ @ 8.4 GHz x 4 Beam
- 分子雲コアスケール < 0.1 pc に相当
 → 星団形成クランプの中心部付近のコアを狙う？



(Peretto et al. 2013)

天体サンプル数は？

- 予想されるタイムスケール

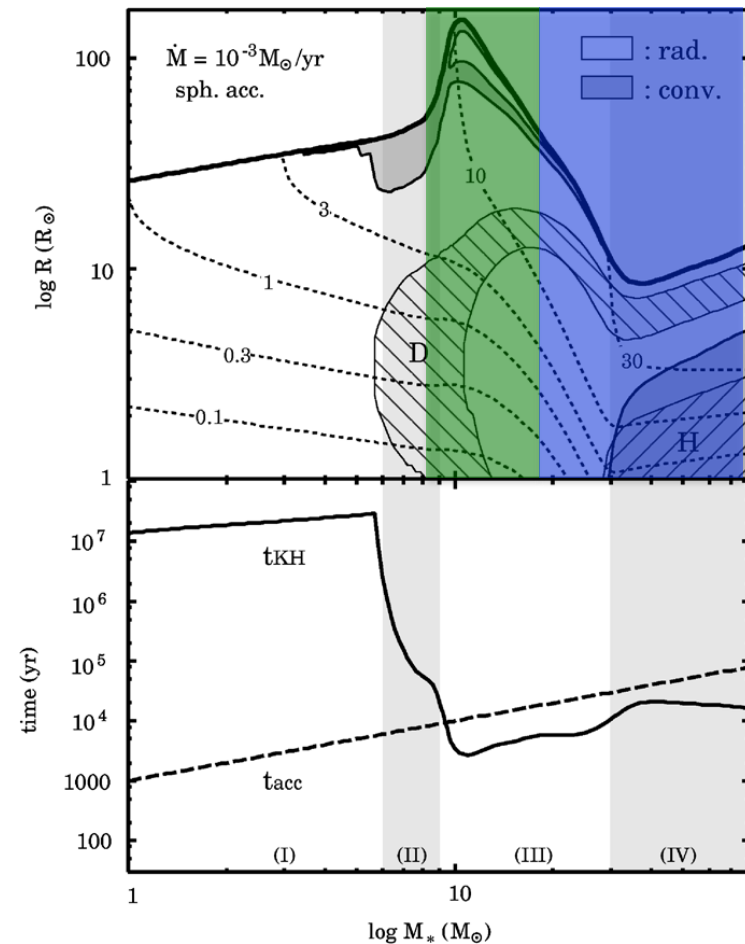
1. 極小HII領域

2. 膨らんだ原始星大気
+ 降着流

→ざっくり 10^4 yr程度？

- 降着期のタイムスケール
は $< 10^5$ yr程度

→実は10%くらいは
観測ターゲットかも



ざっくり結論: SKA-VLBIで熱放射が見えるか？

- 可能性のあるターゲットは
(1) 原始星大気 (2) 降着流 (3) 極小のHII領域
- 空間スケールは5 - 100 au、輝度温度は3000 - 10000 K
- SKA1ではまず無理
- SKA2では厳しいが可能性0ではない
 1. フリンジ検出は無理、位相補償必須
 2. イメージングは相手局の数と感度次第
(→e.g., SEFD \sim 20 Jyを10局、帯域2 GHzで長時間)
→HII領域の方は真面目にターゲットになりうる
- 10 GHz以上で分解能を1-2 masに抑えて輝度温度感度を確保したい
- 視野はSKA局1ビームあたり分子雲コア1個
→星団形成クランプの中心付近をターゲットサーベイする？
- 天体数は若いMYSOの100個に1 - 10個くらい