

次世代観測機器でせまる 星形成研究

大向 一行
(国立天文台 理論研究部)

協力していただいた方々

- 犬塚修一郎(京大)さま
- 岡本美子(茨城大)さま
- 神鳥亮(総研大)さま
- 西合一矢(NAOJ)さま
- 酒向重行(東大)さま
- 田村元秀(NAOJ)さま
- 百瀬宗武(茨城大)さま

皆様どうもありがとうございました。

目次

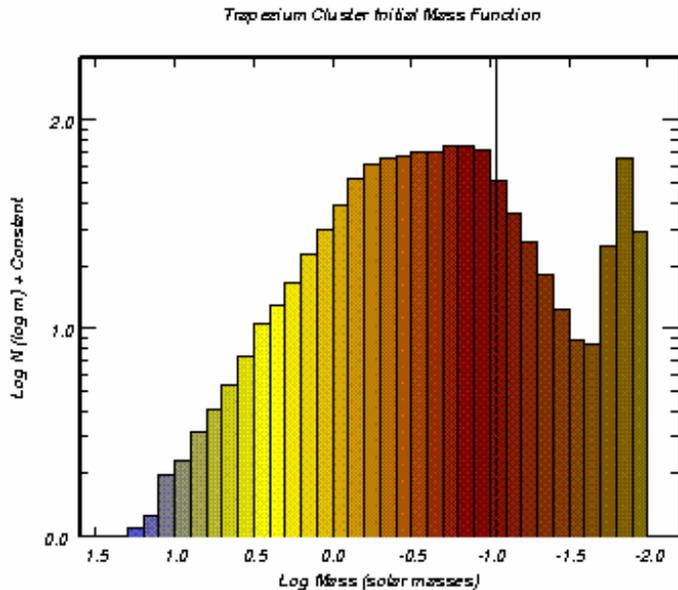
1. 星の初期質量関数と分子雲
2. 星団の形成と散逸
3. 大質量星の形成

1. 星の初期質量関数 と分子雲

提唱から50年、SalpeterのIMF $dN/dm \sim m^{-2.35}$ は
いまだに不動の地位を保つも、その起源は今もって不明。

星の初期質量関数 (IMF)

Orion Trapezium ClusterのIMF



Muench et al. 2002

High-mass側でpower-lawで落ちる。

$$dN/dm \sim m^{-2.35}$$

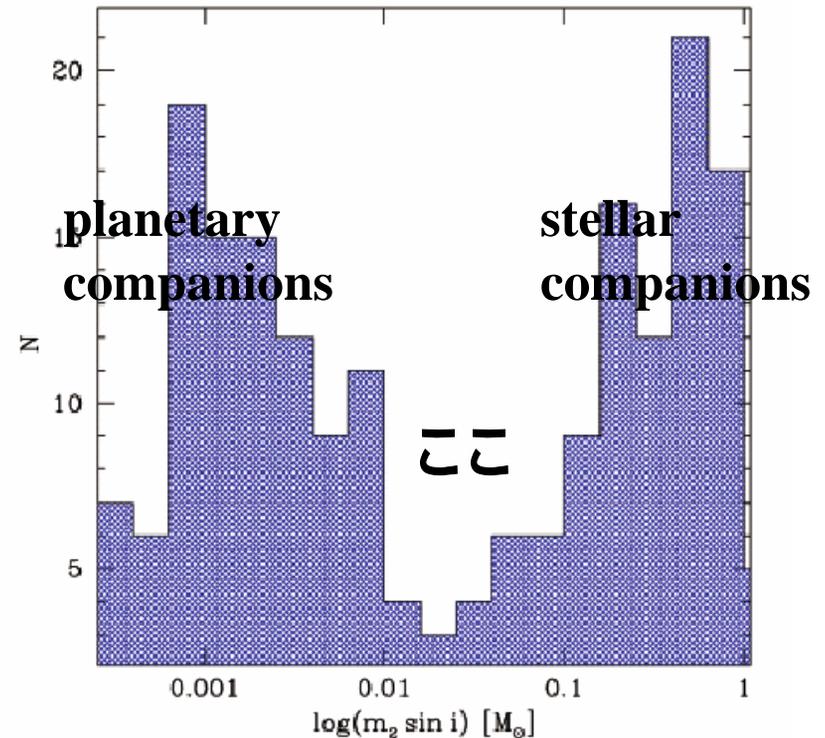
(いわゆる Salpeter IMF)

Peakが $0.1-1M_{\text{sun}}$ に存在し、それ以下では分布がflatないし減少となる。

Substellar Mass Function : Brown Dwarf Desert ?

- Doppler shift法による伴星探しの結果、Brown Dwarf ($0.01-0.1M_{\text{sun}}$)が少ない
- 長周期の伴星が受かっていない可能性がある。個々の星に分解して観測するのが必要。
- すばるなど8mで1000個くらい観測すると本当かどうか確認可能

見つかった伴星の数分布

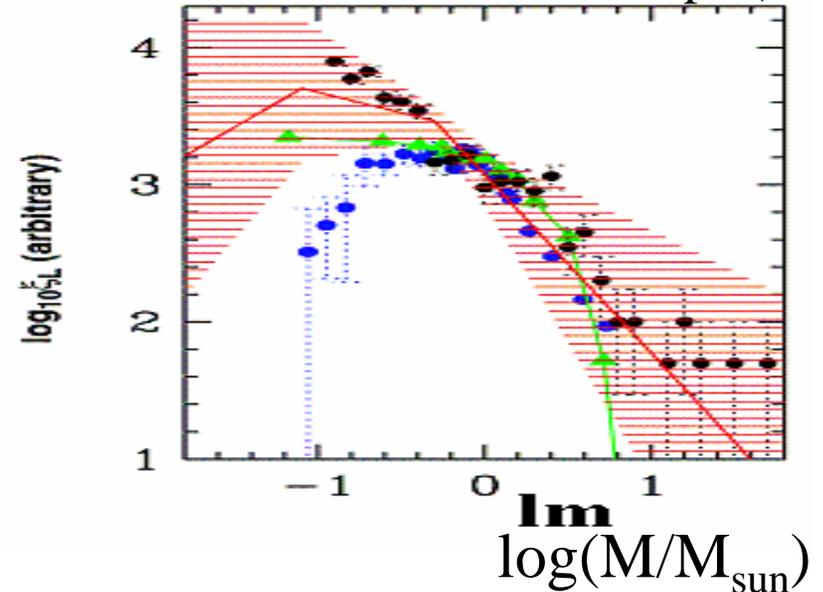


Santos et al. 2002 伴星の質量

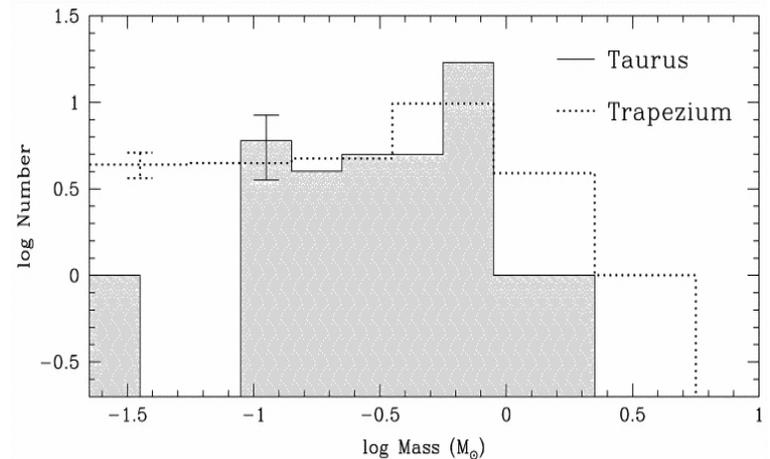
星形成環境とIMF

Kroupa (2002)

- あまり環境にはよっていないようである。
 - ✓ フィールドと星団で同じ。
 - ✓ 大質量星形成領域でも同じ。
 - ✓ 金属度にも依存している様子はみられない。



- しかしTaurus領域では異なる。
 - ✓ 褐色矮星すくない。
 - ✓ 大質量星もない。



Luhman 2000

IMFはユニバーサルか？

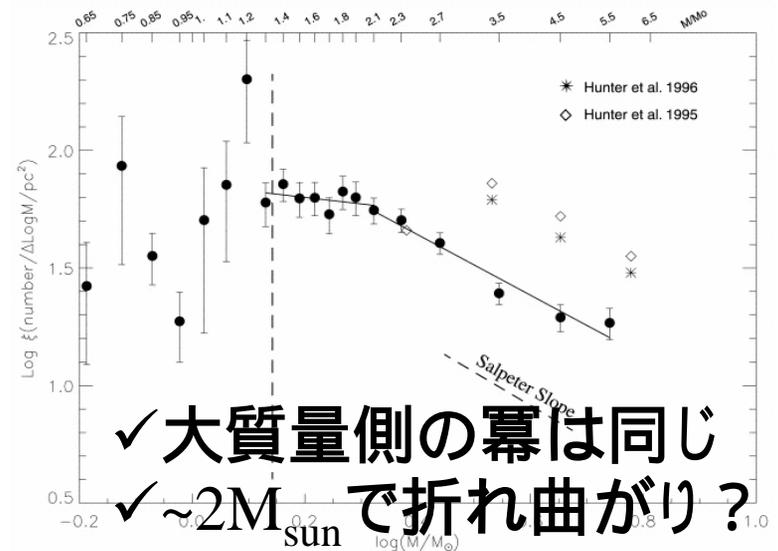
多数の若い星団の質量関数を調べる必要がある。

- ✓ ガス、ダストに覆われている
- ✓ Substellar天体は暗い
- ✓ 星団中心部は混雑

→ 赤外線大型望遠鏡が必要

- 8mでも赤外線補償光学(VLT)近傍(1kpc以内)では褐色矮星まで全部見つかる
- JELT(30m)があれば、
銀河全部(<10kpc)で可能。
LMCでも $< M_{\text{sun}}$ まで見える。

LMC中の大質量星形成領域
30DorのIMF



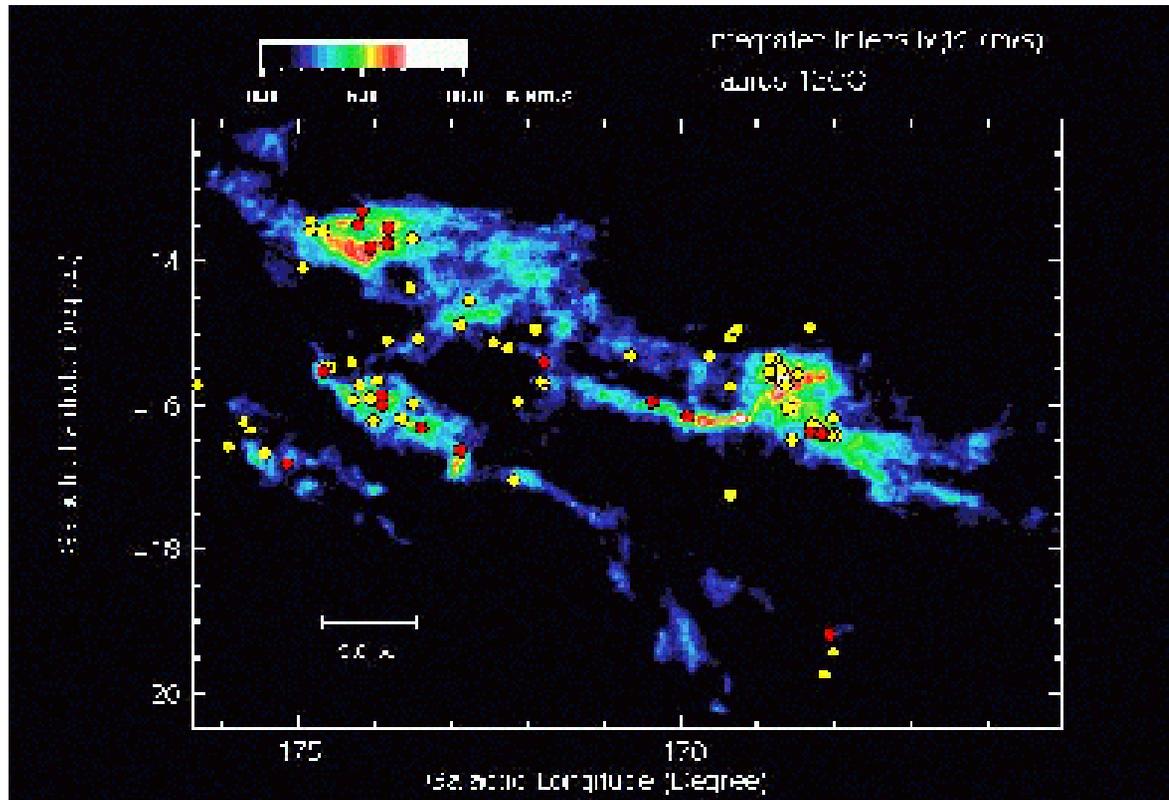
- ✓ 大質量側の冪は同じ
- ✓ $\sim 2 M_{\text{sun}}$ で折れ曲がり？

Sirianni et al. (2000)

IMFの起源

Taurus 分子雲 (^{13}CO による観測)

水野ほか(1995)



赤:Tタウリ型星
黄:IRAS源

- 分子雲 ($10^4\text{-}10^6 M_{\text{sun}}$; $>10^2 \text{cm}^{-3}$)
- 分子雲クランプ、コア ($1\text{-}10^3 M_{\text{sun}}$; $>10^4 \text{cm}^{-3}$)

分子雲、分子雲コアの質量関数

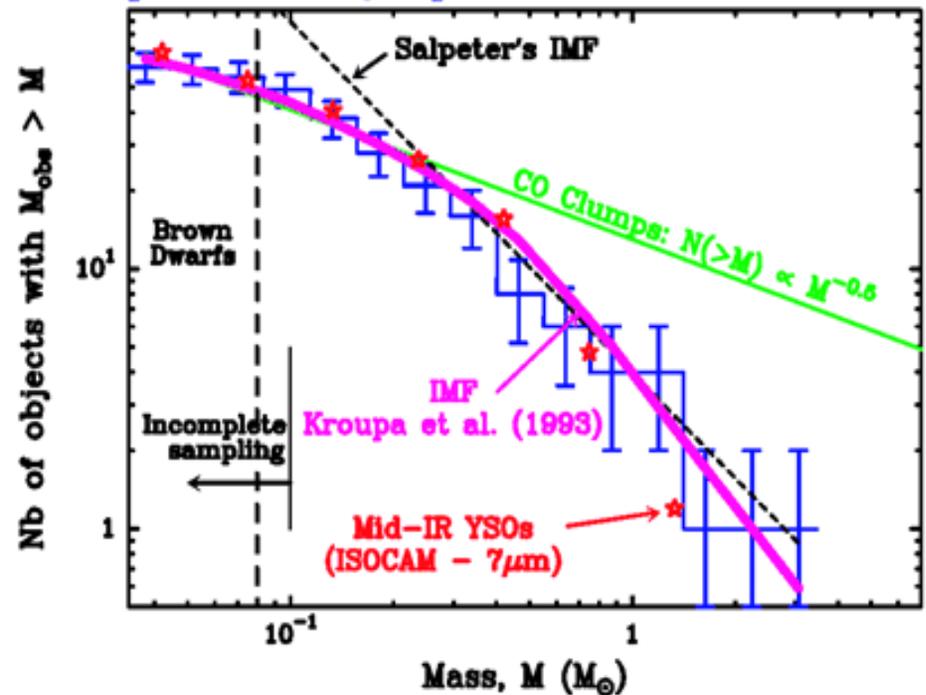
- 分子雲自身、および分子雲内のクランプの質量関数は星のIMFよりフラット

$$dN/dm \sim m^{-1.6}$$

- ダストで観測される高密度の分子雲コア($>10^6 \text{cm}^{-3}$)の質量関数は星のIMFとよく似ている

どうやら分子雲コアの質量関数がIMFを決めているようだ。

Mass Spectrum of ρ Oph Prestellar Condensations



Motte et al. 1998

ALMAで探るコアの質量関数

- ダスト連続波での観測
速度情報なし 本本当に星になるコア？
- 輝線での観測 柱密度が不明、化学過程の影響
- ☆ 両方で観測することによりコアの質量関数の質のよい情報が得られる。

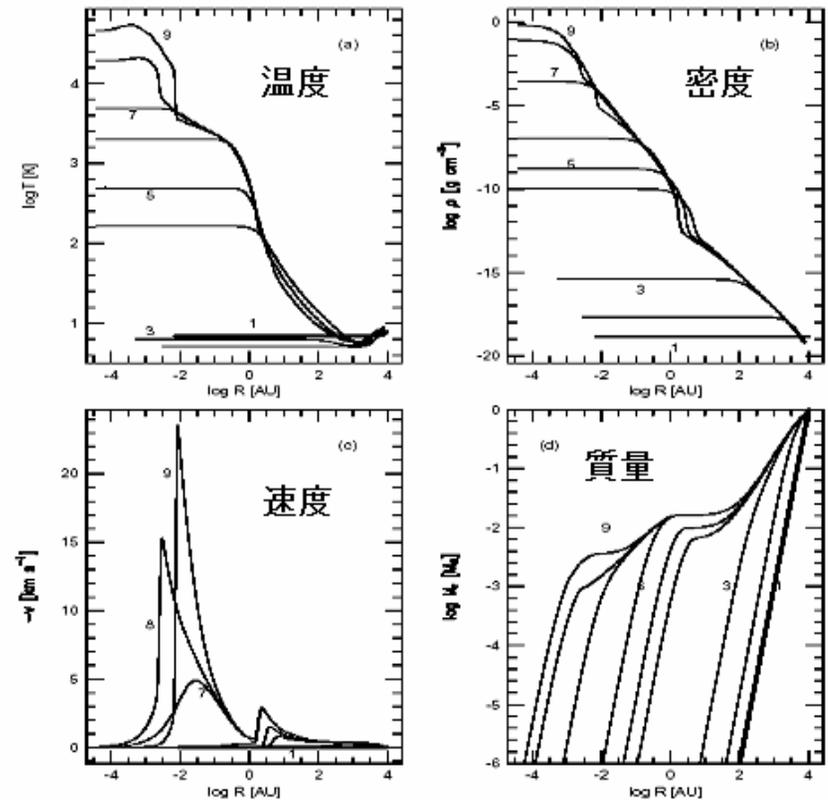
ALMAでは、

- ◆ 近傍分子雲中では、substellar massのコアまで観測可能
- ◆ 遠方(銀河系内、マゼラン雲)の領域でも $\sim M_{\text{sun}}$ スケールの観測は容易にできる。
→さまざまな環境下(輻射強度、重元素量、重力の強さ)におけるコアの質量関数と星のIMFの関係に対する理解が進む

個々のコアの構造とその進化

- 理論的にはモデル化がなされている。
- 観測的には $> 10^3$ AU スケールでの構造しか分かっていない。

コアから星への進化(理論モデル)



増永 & 犬塚 2001

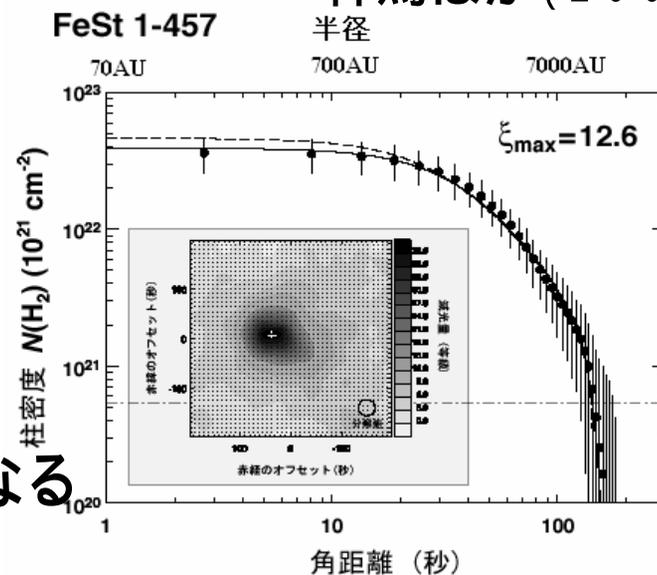
コア構造の観測

- ダストからのサブミリ波放射
 - ALMAができると、
 - 星団中のより混雑した領域も観測可能。
 - インフォールなどの運動もラインで観測できる。
- ダストによる背景星の減光
 - 現在 (JHK) の限界 $A_V \sim 50 \text{ mag}$
 - Astro-F, Spitzer, SPICA, JWST 近赤外の長い波長 $3\text{-}5 \mu\text{m}$ では $A_V \sim 200 \text{ mag}$ まで観測可能
 - 30m 望遠鏡 限界等級、背景星増える

Bok Globuleの減光観測



神鳥ほか(2004)



→理論モデルとの詳細な比較が可能となる

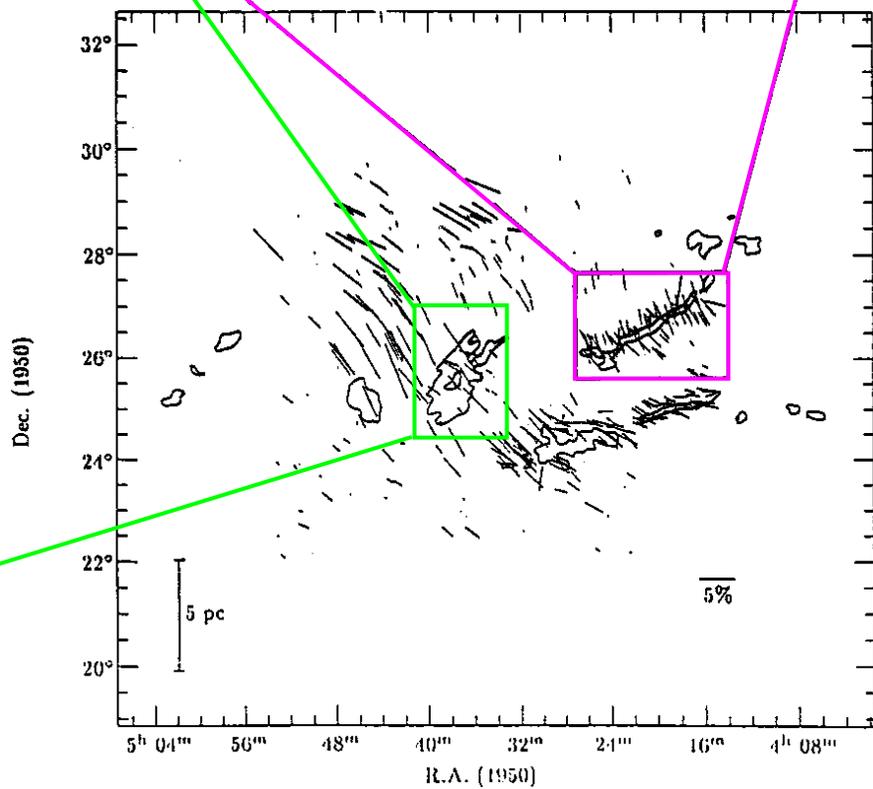
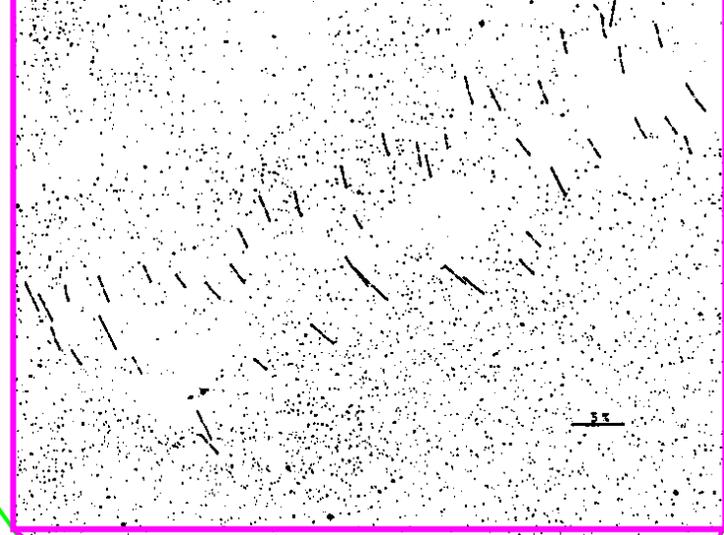
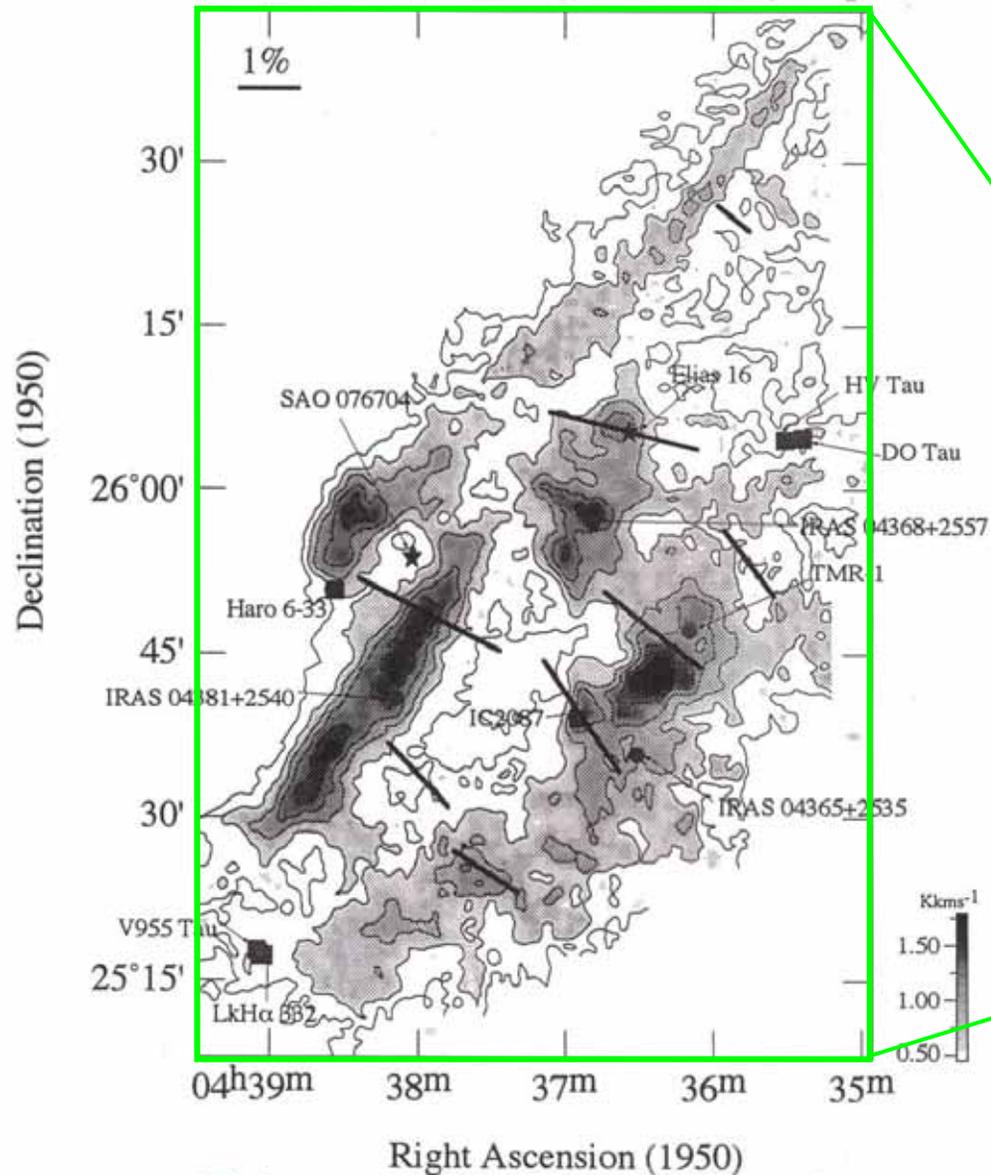
コア収縮時の磁場の役割

- 磁場構造はダストの整列による偏光(典型的には数%程度)を用いて調べられている。
- 分子雲全体程度の比較的大きいスケールでの磁場構造はすでに知られている。
- ALMAにより、より高密度領域の磁場構造も同様の手法で明らかになるであろう。
 - コア収縮の際の磁場の役割の解明につながる

分子雲中の磁場

Helix Cloud 2

C¹⁸O (J=1-0) Total Integrated Intensity Map



Sunada et al. 1998 (NRO45m)

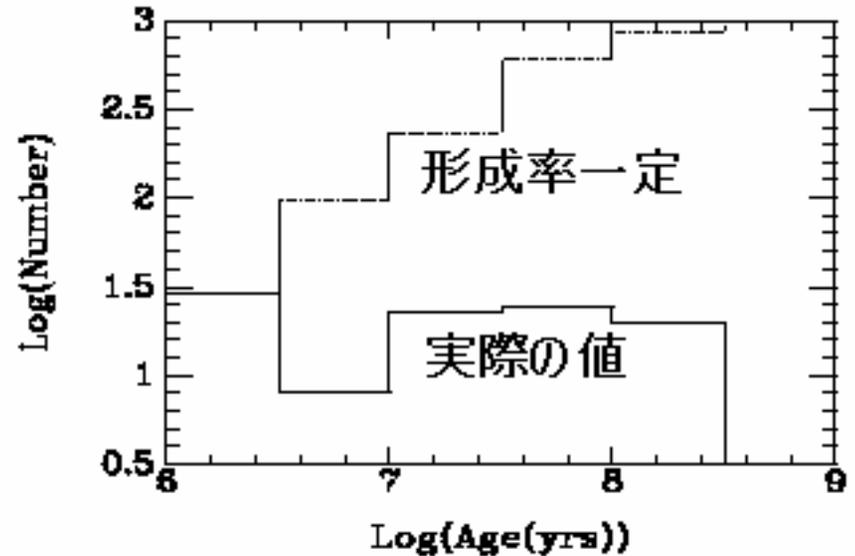
2 . 星団の形成と散逸

星のほとんどは星団中で形成されるが、
ほとんどの星団はなぜか短命なようである。

星団の散逸

- 形成された星団の大部分は若くして散逸してしまう。
 - すばるの年齢 (10^8 年) まで生き残る星団は稀 (<10%)
- 星形成によるフィードバックの結果、ガスが散逸し、重力的に束縛されなくなる

星団の年齢分布



Lada & Lada 2003

ガス散逸の影響

埋没星団 RCW38

- ガスが瞬時に散逸するとすると (星形成効率) $> 50\%$ でないと重力的に束縛されなくなる。
 - cf. 星団中での星形成効率 $\sim 10\text{-}30\%$
- ガスがゆっくり ($t_{\text{散逸}} > t_{\text{cross}} \sim \text{Myr}$) 散逸する場合は星形成効率がもっと低くともよい。
- どの段階、どれくらいの速さで散逸がおこっているか？



光学



近赤外

Alves

星団散逸現場を観測できるか？

星団中の個々の星の速度を明らかにする。

- 可視－赤外線の高分散分光で、星のドップラーシフトを観測。多数の吸収線をもちいる(8m 赤外で~km/sの分光)。
 - 星周円盤のラインを用いる (red-shiftとblue-shiftを平均して星の速度を求める)。周りのガスとの混同を防ぐためにサブミリ(ALMA)がよい。
- どの段階、どの速さで星団が散逸しつつあるのかが分かりそれを通じて星団形成に必要な条件を知ることができるであろう。

球状星団の形成



Wilson et al. 2000

- HSTなどの観測により、Interacting galaxies, starburst galaxies中に、若い球状星団とおぼしき天体が多数見つかっている。

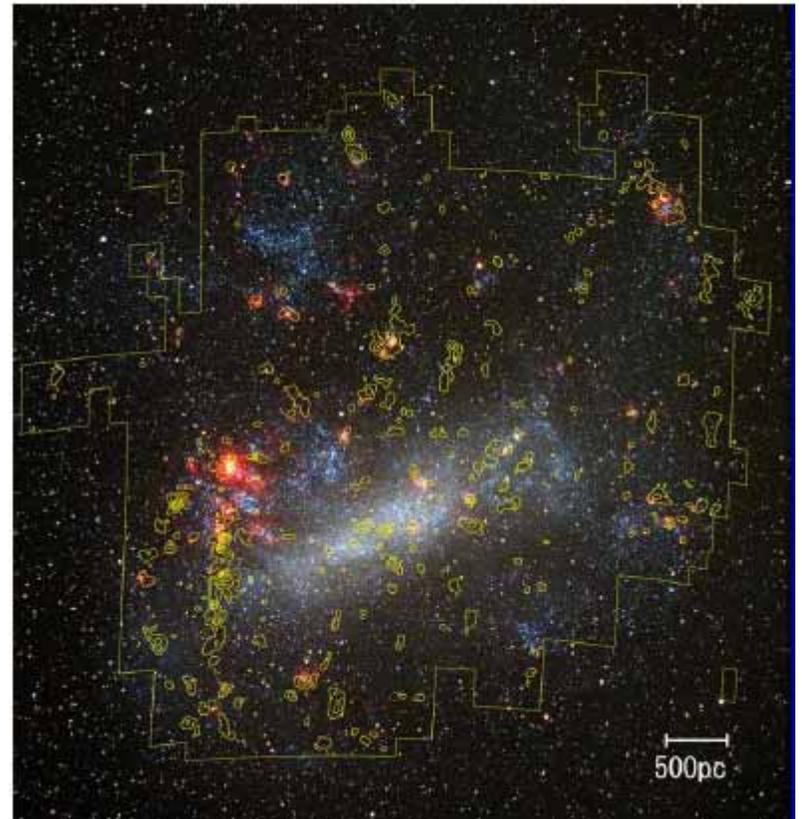
- アンテナ銀河には1000個ほどの若い星団があって、そのうちのいくつかは $10^6 M_{\text{sun}}$ くらいである(Super Star Cluster)。これらは超巨大分子雲中で形成されている。

球状星団も宇宙初期だけではなくて、十分な量のガスがあれば形成されるようである。

LMCの若い球状星団？

- LMCにはpopulous cluster とよばれる質量 $\sim 10^4 M_{\text{sun}}$ 、年齢 10^{7-8}yr の星団が存在
- LMC内の分子雲内の詳細な構造 (ALMAで500-5000AUスケール) が明らかとなる。これらから、星団形成の初期条件を知ることができる。

なんてんによる
LMCの巨大分子雲分布



名大 なんてんグループ

3 . 大質量星の形成

標準シナリオの確立した小質量星形成に対し、
大質量星の形成過程はいまだ謎に包まれている。

大質量星の役割

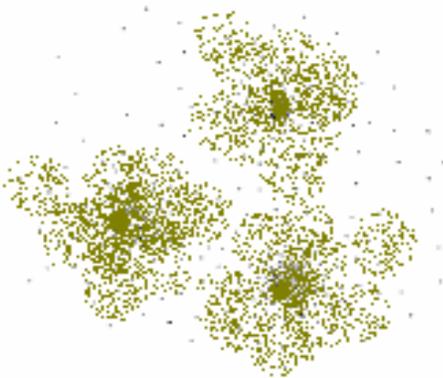
- 輻射、SNによる分子雲へのフィードバック
- 宇宙論的にも重要
 - 重元素の合成サイト
 - 系外銀河の星形成率の決定
 - ガンマ線バーストのプロジェクター

星形成領域、銀河の進化に対してきわめて重要

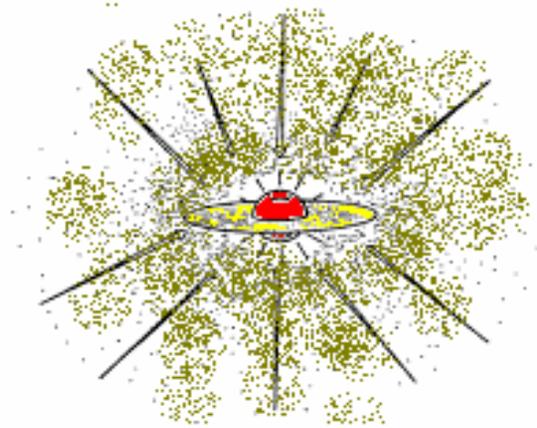
小質量星と違い、形成過程の
標準理論が未開拓

小中質量星形成の標準シナリオ

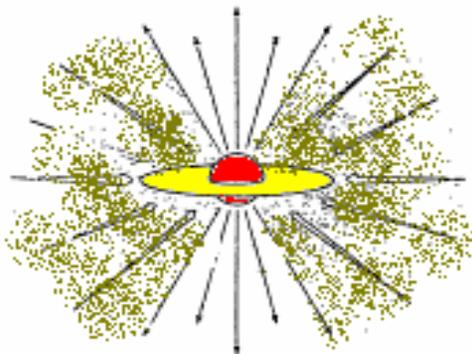
Shu, Adams & Lizano (1987)



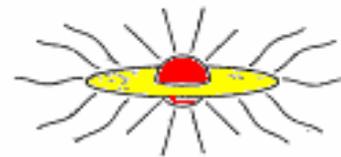
A. Dense cores form within molecular clouds.



B. A protostar forms at the center of a core, growing in mass by accretion of ambient matter.



C. A stellar wind breaks out, creating a bipolar flow



D. The infall terminates, revealing a newly formed star with a disk.

大質量星形成の問題点

標準モデルでの質量降着率

$$\sim c_s^3/G = 2 \times 10^{-6} (T/10\text{K})^{3/2} M_{\text{sun}}/\text{yr}$$

1. 形成時間問題

形成時間が星の寿命より長くなってしまふ

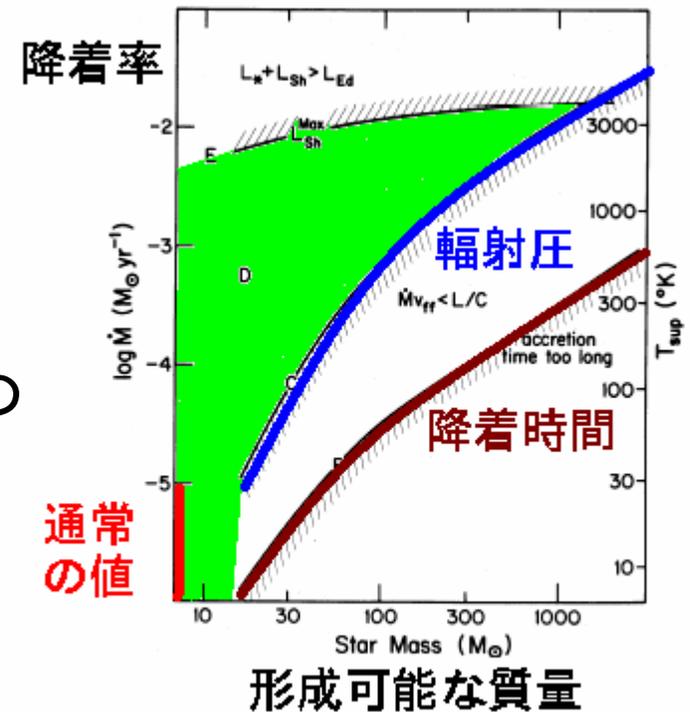
2. 輻射圧問題

中心星からの輻射による降着流中のダストへの輻射圧が強くて降着できなくなる

3. 形成場所問題

星団の中心付近で形成されている

降着率と星の上限質量



2つのシナリオ

その1 大降着率説 (e.g., Nakano et al. 2000; McKee & Tan 2002)

高温分子コアのスペクトル
大きい乱流速度
強いアウトフロー
短いジェットの高齢



$\sim 10^{-3} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ を
示唆

その2 合体説 (e.g., Bonnel et al. 1998; Stahler et al. 2000; Portegies Zwart et al.)

大質量星は星団の中心部(星密度大)で形成
Mass segregation, gas drag により合体しやすくなる

形成中の大質量星まわりの円盤

Chini et al. 2004

◇ いくつかの観測によると
形成中の大質量星のま
わりには大質量の円盤が
見つかっている。

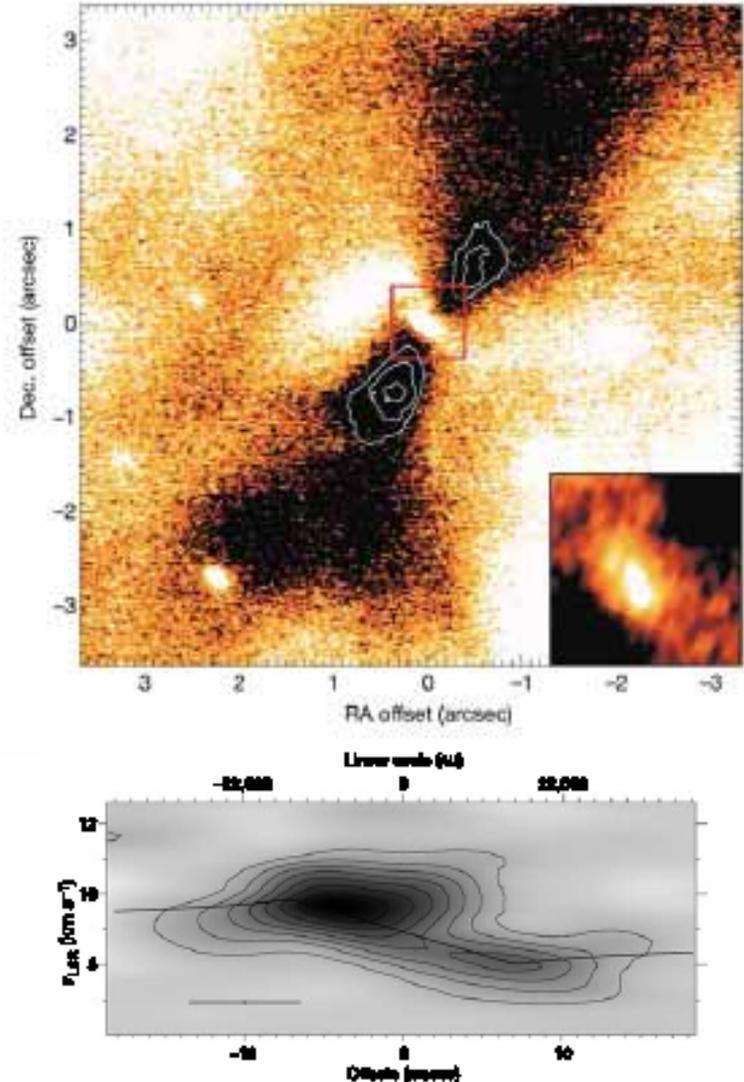
Chini et al. 2004

- 中心星が $20 M_{\text{sun}}$ 、円盤に $100 M_{\text{sun}}$

酒向ら (2004)

同じ天体に対して

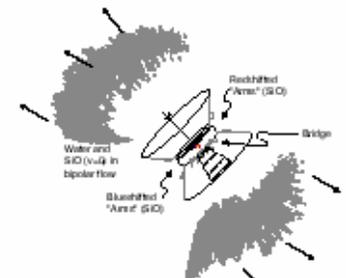
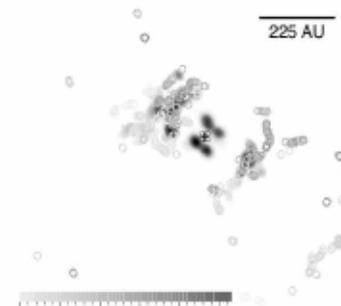
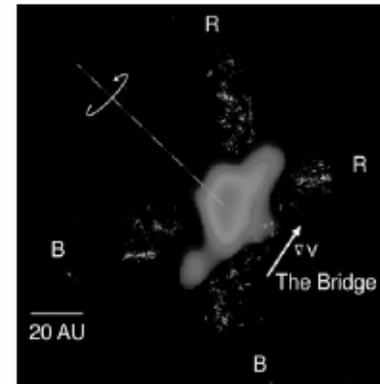
- 中心星が $5 M_{\text{sun}}$ 、円盤に $10 M_{\text{sun}}$
 - 電離領域がない
 - ^{13}CO の Conversion factor の違い



Orion KL天体中の大質量原始星

- 大質量原始星(電波源 1)の周りに円盤状のガスが干渉計により見つかった(H-f-f放射)。
- その外側にアウトフロー状の構造がSiO, H₂Oメーザの観測から見つかった。

中心円盤の回転などの速度構造は不明



大質量原始星まわりの円盤の検出

- いくつかの円盤状構造の発見は小質量星形成の場合と同様なシナリオを支持している。
- とはいえ、いまだ決定的な証拠はなく、本当に降着円盤かどうかは速度構造の観測が必要
- ALMAによる輝線の観測で決着がつかず。

降着率とその時間進化

- 大質量星形成時は降着率が大きいと予想されている
- 小質量星でも初期には大きいと予想
- 降着率は多くの場合、アウトフロー率から推測されているのみである。
- ALMAにより、原始星エンベロープの内側(数100 AU)を分解し、降着率(密度、速度分布)の動径分布を探る。それにより降着率の時間変動を調べる。

まとめ

- **星の初期質量関数**
 - brown dwarf desertの確認
 - 多様な環境下での星 & コアの質量関数
 - 収縮の際のコア構造の進化
- **星団の形成**
 - 散逸過程の直接観測
 - マゼラン雲における球状星団の形成過程
- **大質量星形成**
 - 大質量円盤の探査
 - 星周ガスの運動の直接観測による降着率の導出