

原始星の形成と進化

林フェイズ以前・以後

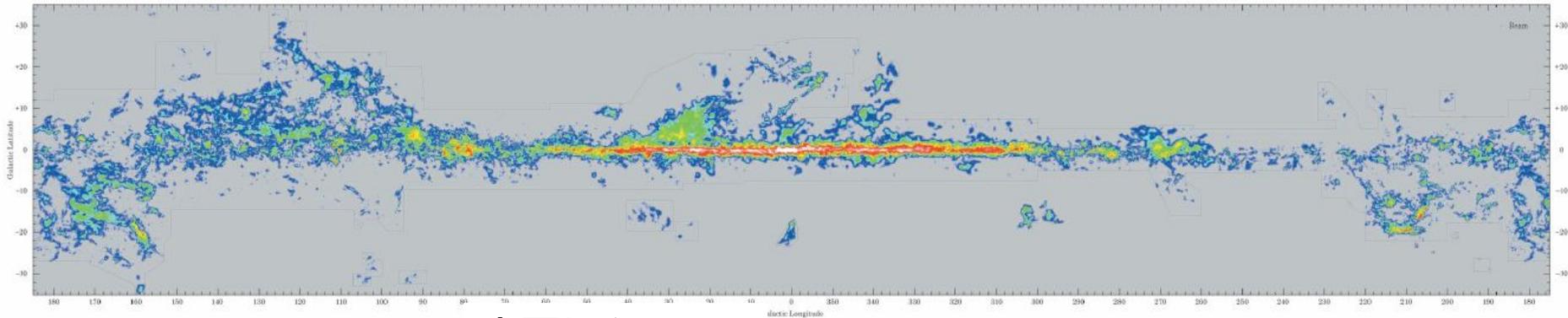
大向一行

京都大学・天体核グループ

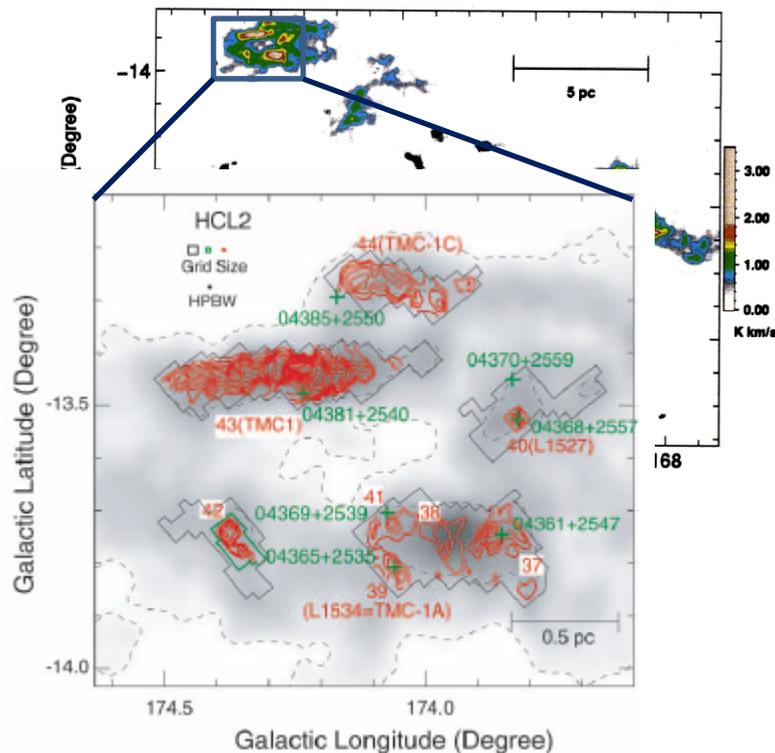
目次

0. はじめに
1. 分子雲コアから原始星へ
2. 原始星から前主系列星へ
3. 前主系列星から主系列星へ

星形成の現場：星間ガスから星へ Dame 他



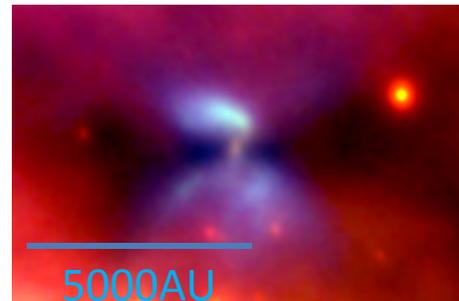
大西ほか(1998)



大西ほか(2002)

- HI雲(10-100/cc, 80K)
- 分子雲(10^{2-3} /cc, 10K)
- 分子雲コア ($>10^4$ /cc, 10K)
- 原始星(質量獲得中)
- 前主系列星(Tタウリ型星、Herbig Ae/Be星)
- 主系列星

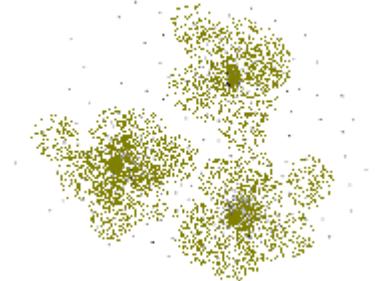
原始星 M17-SO1



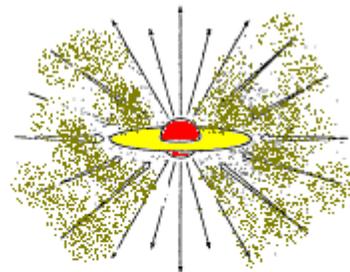
酒向ほか(2005)

中小質量星形成の標準シナリオ

1. 高密度コアの収縮 ($\sim 10^5\text{-}6$ 年)



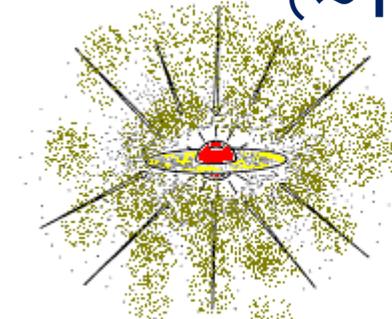
A. 分子雲中で
高密度コアが生まれる



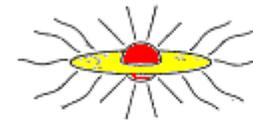
C. 星風が噴き出し、
双極流を作る。

Shu, Adams & Lizano (1987)

2. 原始星の進化 ($\sim 10^5\text{-}6$ 年)



B. 高密度コアの中心に原始星が誕生、
外層の降着により質量が増加



D. 質量流入が終了し、若い星とその
円盤が見えるようになる。

3. 前主系列進化 ($\sim 10^6\text{-}7$ 年)

|
分子雲コアから原始星へ

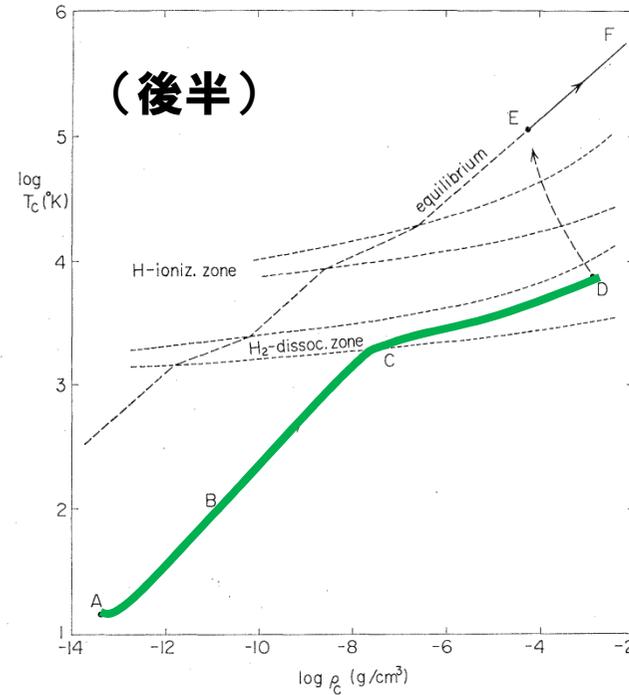
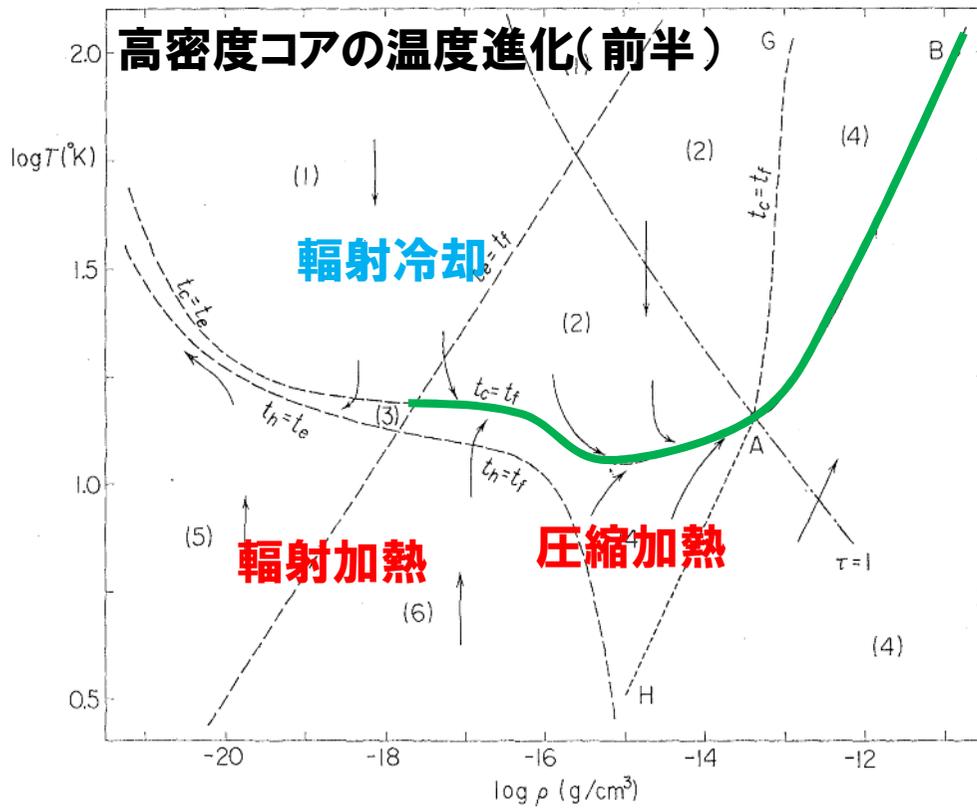


Thermal and Dynamical Properties of a Protostar and Its Contraction
to the Stage of Quasi-Static Equilibrium

Chushiro HAYASHI and Takenori NAKANO

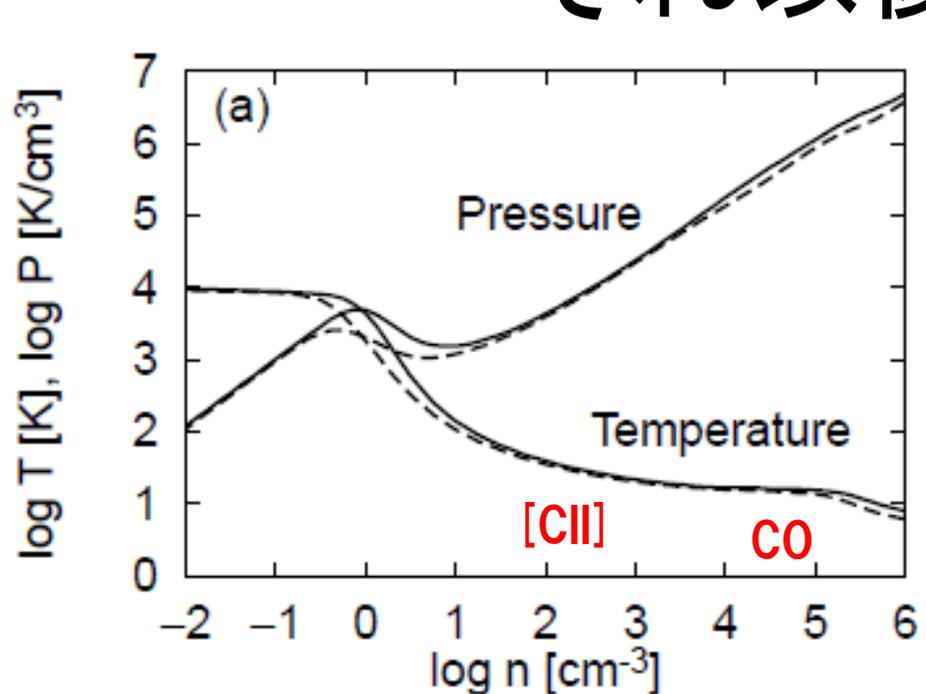
Department of Physics^{*)}, Kyoto University, Kyoto

^{*)} Since April, 1965, the former Department of Nuclear Science has been reorganized into the Second Department of Physics.

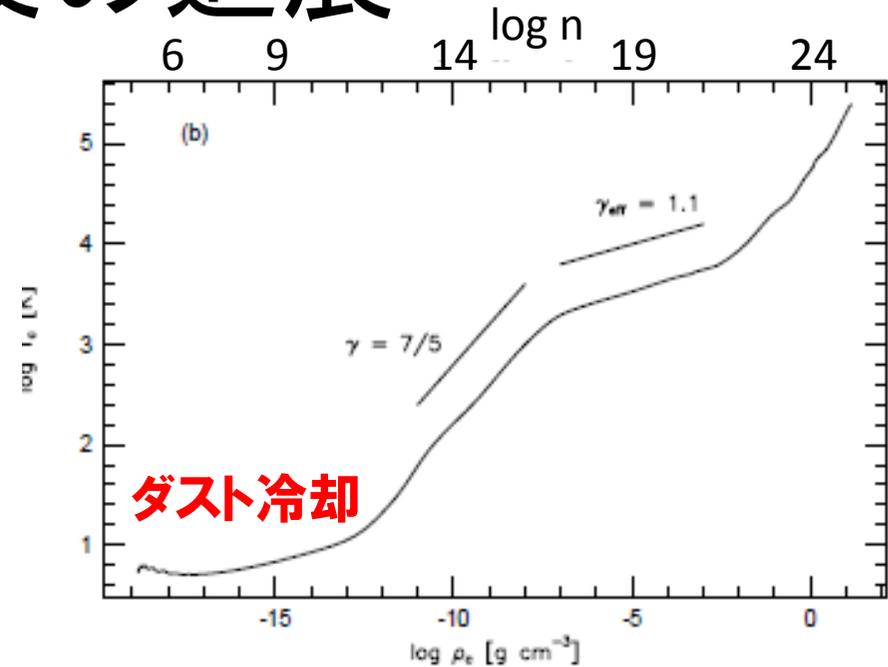


- 1M_{sun}の雲がほぼ一様に収縮するとして、加熱、冷却のバランスから熱進化を計算。
- ダスト熱放射に対して光学的に薄い時は、10K程度のほぼ等温で収縮。
 - 光学的に厚くなった後に断熱的になる。

それ以後の進展



小山 & 犬塚 2000



増永 & 犬塚 2000

- ✓ COなど分子輝線による冷却、紫外線による加熱の重要性
- ✓ 暴走的収縮のため、中心コアの質量は一定ではなく、収縮とともに減少することが分かった。

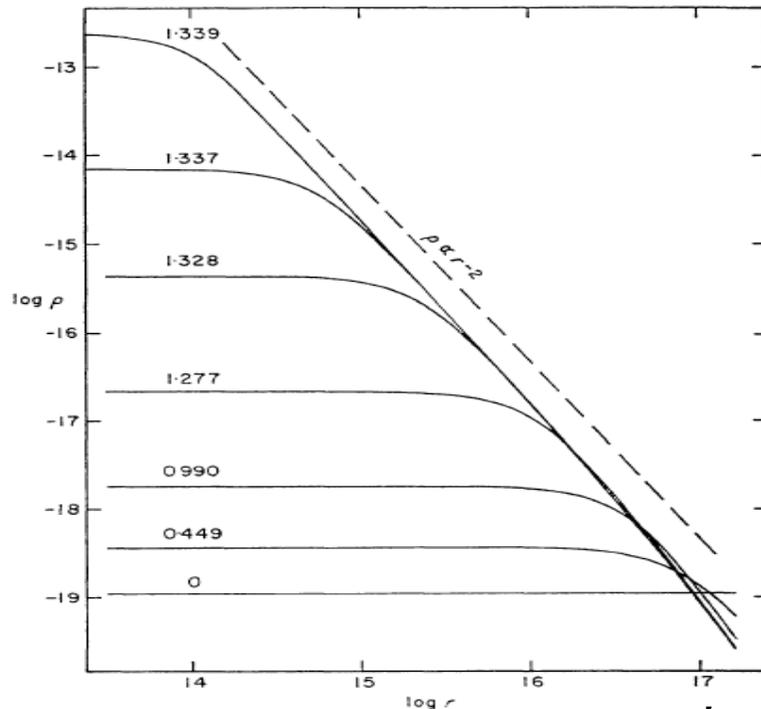
高密度コアの暴走的収縮

自由落下時間 $\propto (\text{密度})^{-1/2}$

高密度部分の進化はどんどん速くなる。
周囲を取り残して、暴走的に収縮

自己相似的収縮

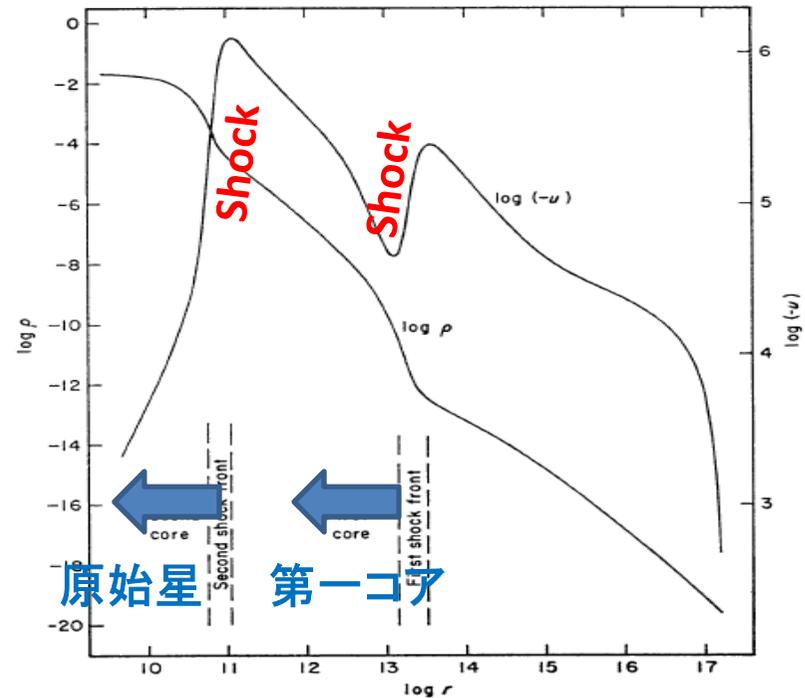
- ✓ 中心部のサイズはジーンズ長さ程度
- ✓ 外層は $1/r^2$ 分布



Larson 1969

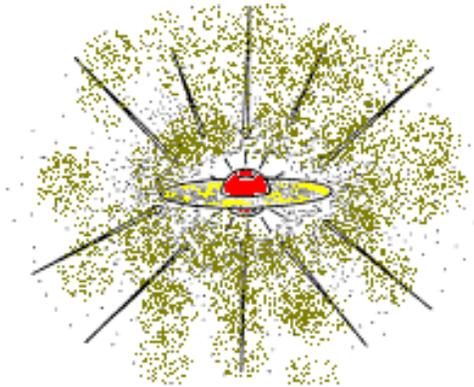
原始星の形成

2つの断熱期に対応して、
密度 10^{-12} g/cc で第一コア、
密度 10^{-2} g/cc で原始星(第二コア)形成

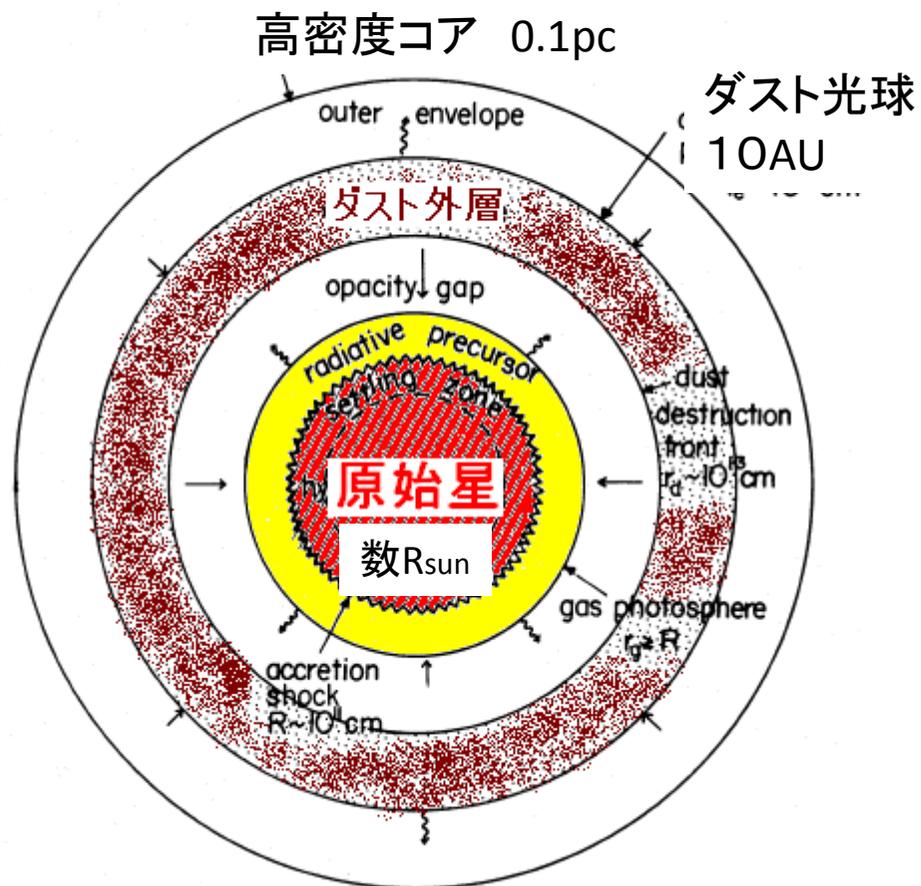


極めて小さな原始星が形成 $\sim 10^{-3} M_{\text{sun}}$

II 原始星から前主系列星へ



降着期の原始星の構造



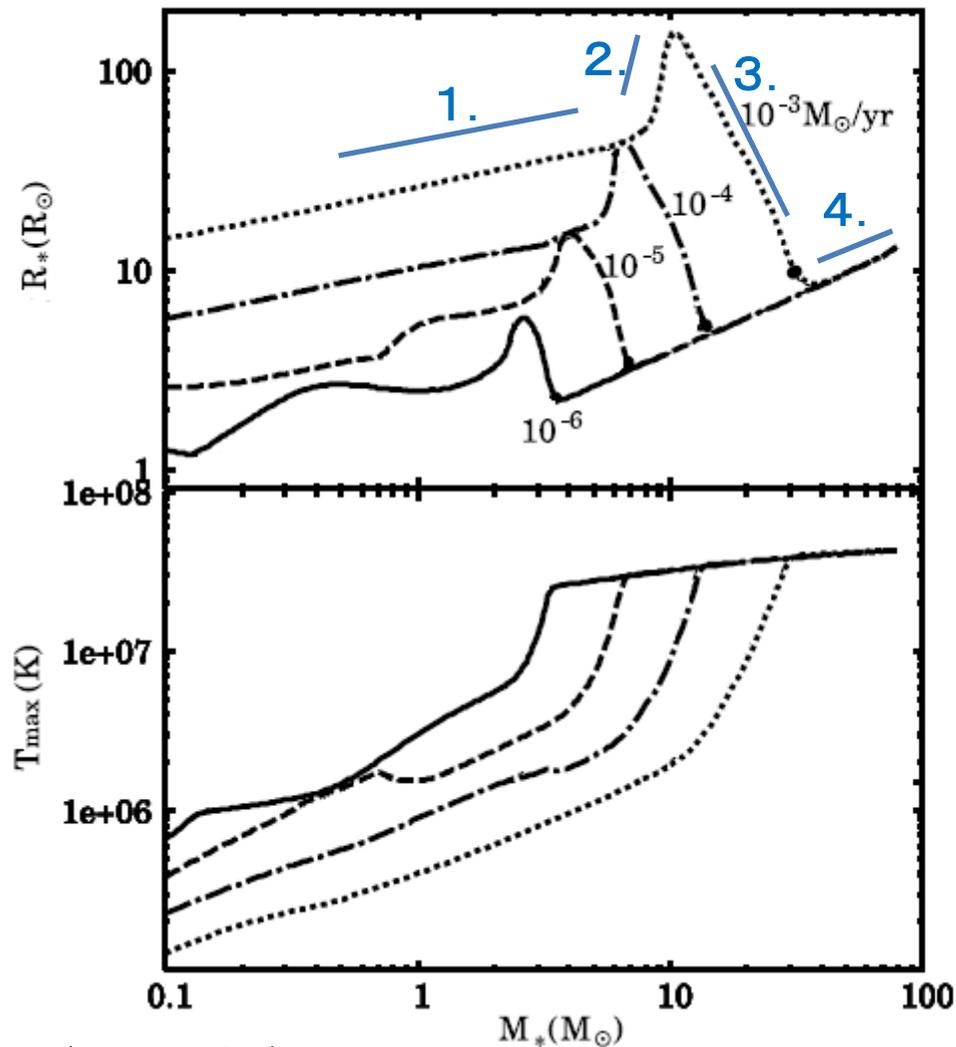
•原始星は外層のガスの降着によって質量が増加する。

•降着流中にダスト光球とガス光球が存在。

•その内側の星表面には強い輻射性衝撃波

•外部からは原始星は直接見えず、ダスト光球が見える。

原始星の降着進化



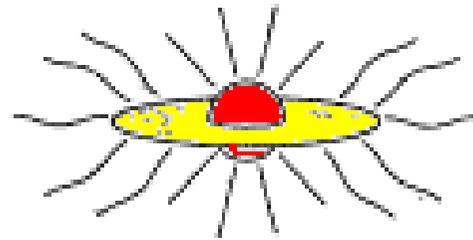
4つの進化段階

1. 断熱降着
2. 膨張
3. Kelvin-Helmholtz収縮
4. 主系列星

降着が終わった段階で、
星の質量が定まる。
その後は一定質量で進化
して主系列星となる
(前主系列進化)。

細川 & 大向(2009)

III. 前主系列星の進化

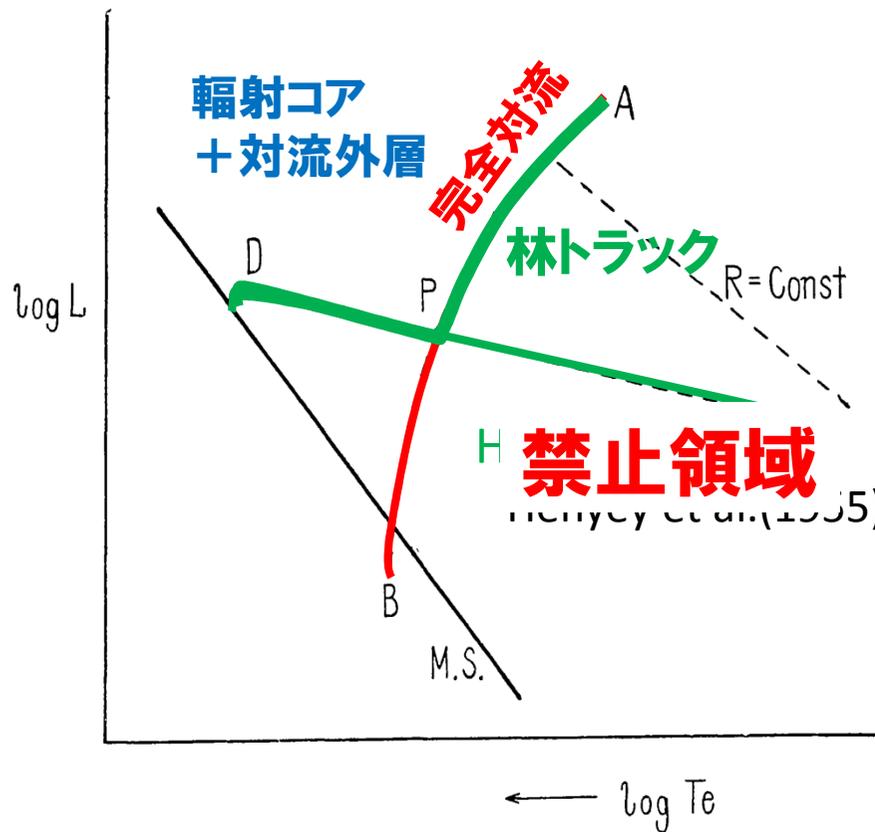


1961 林フェイズ論文

Stellar Evolution in Early Phases of Gravitational Contraction

Chushiro HAYASHI

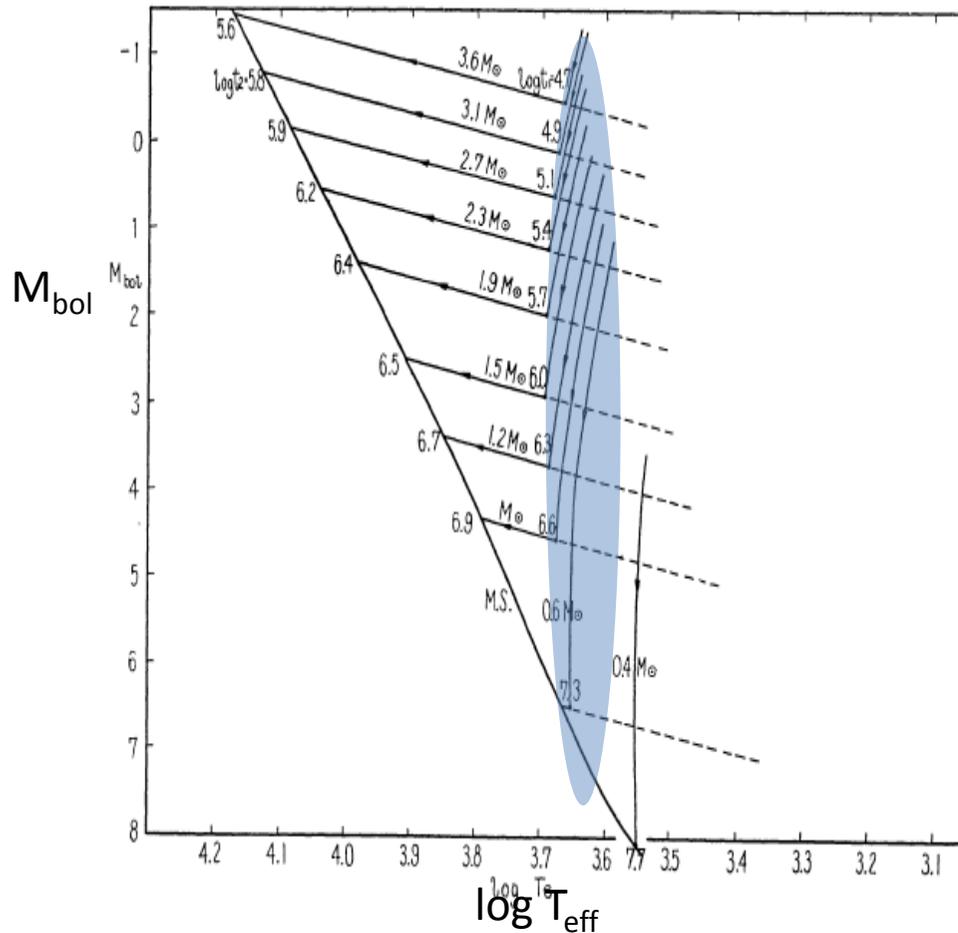
Department of Nuclear Science, Kyoto University, Kyoto



- エントロピー勾配 $ds/dr < 0$ で対流不安定
(Schwarzschildの対流条件)
- 対流層内部では $ds/dr = 0$

HR図上で、完全対流星の右側の領域は $ds/dr < 0$ となっており、禁止される。

いろいろな質量の星の前主系列進化



林トラック

ほぼ垂直な線となる
 星質量にもあまりよらない
 ← H^- opacity の
 強い温度依存性のため

初期条件 $0 = -\frac{1}{2} \frac{GM_*^2}{R_*} + \Delta E_{int} - L_{rad} t$

重力+熱 電離・解離 ~~輻射損失~~

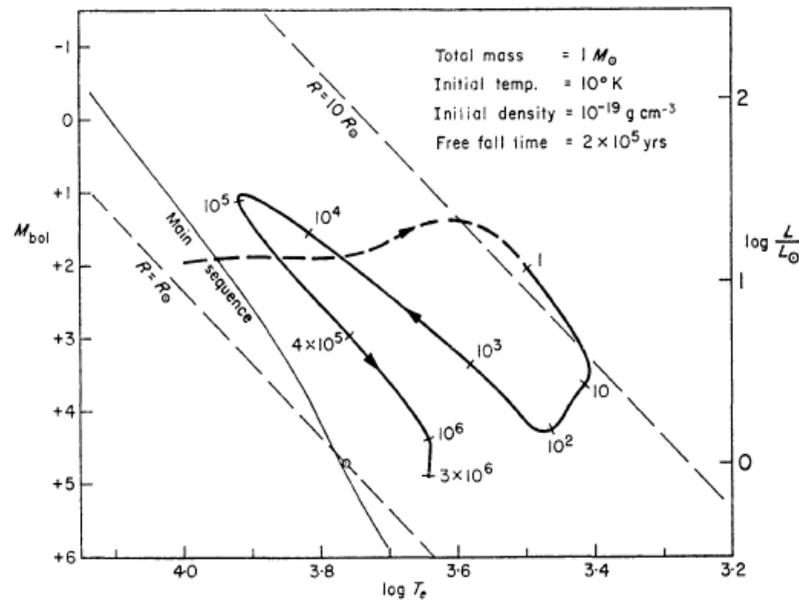
原始星段階での輻射損失を無視

→ 原始星の初期半径、光度を過大評価

林フェイズはどれくらい明るかったか？

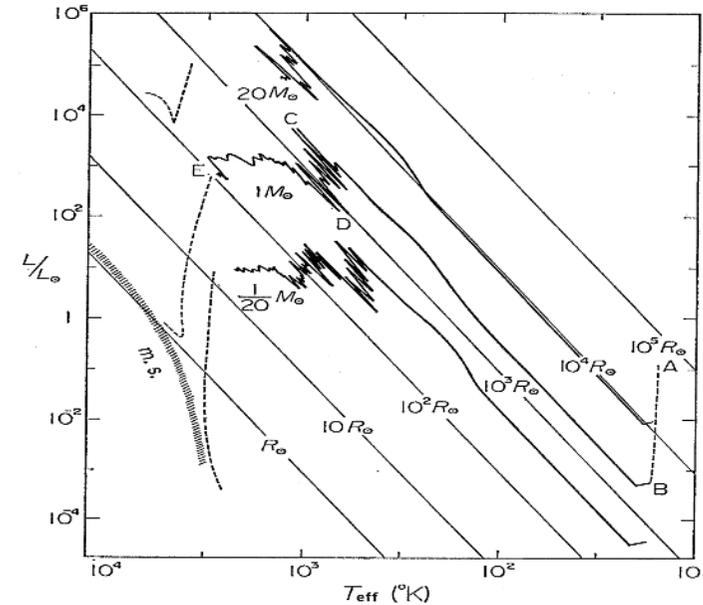
Larson 1969

- 光学的に薄い時期から計算
- 輻射は近似的取り扱い



Narita, Nakano, & Hayashi 1970

- 光学的に厚くなった段階から計算
- 輻射輸送を解く



原始星の半径 10Rsun
初期光度 10Lsun

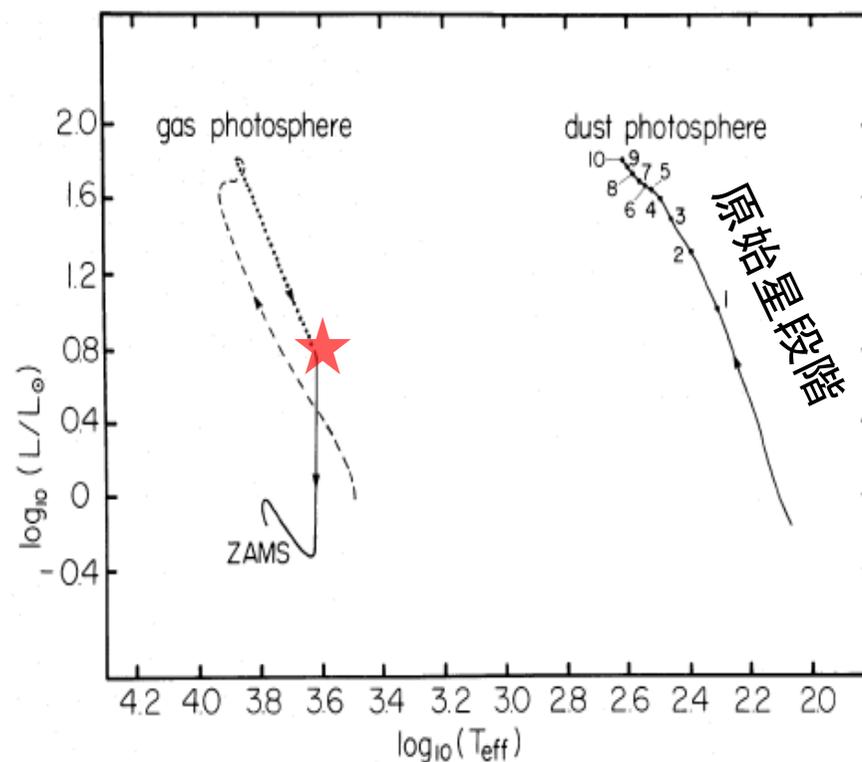
100倍の違い

原始星の半径 1000Rsun
初期光度 1000Lsun

この後、10年間論争が続く。

$1 M_{\text{sun}}$ 星のHR図上の進化

この論争は1980年、
Winkler & Newman (AMR流体計算)、
Stahler, Shu, & Taam (星の進化コードの拡張)によって決着



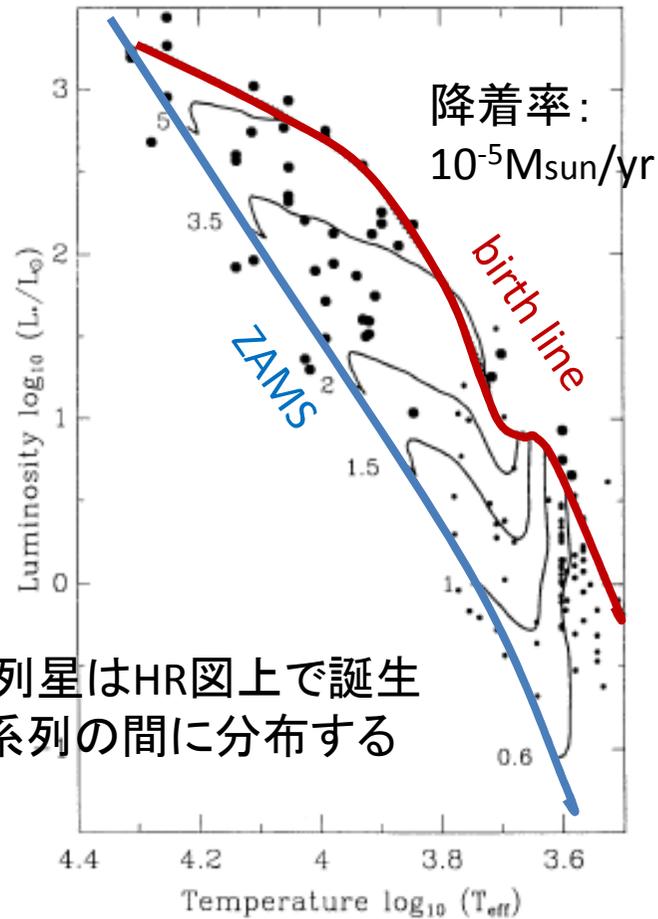
Stahler et al. (1980)

林フェイズは約 $10 L_{\text{sun}}$ から始まる
(Larsonに近い結果)。

星の誕生線

Stahler 1983

主降着が終了した段階の星が現れるHR図上の位置
(いろいろな質量に対してなので線になる)



前主系列星はHR図上で誕生
線と主系列の間に分布する

Palla & Stahler 1998

IV. DISCUSSION

With respect to the controversy reviewed in § I, our investigation of the evolution of protostars obtains stellar radii at the end of the main accretion phase which are closer to the small values advocated by Larson (1969, 1972), Appenzeller and Tscharnuter (1975), and Winkler and Newman (1980*a, b*) than the very large values obtained by Narita, Nakano, and Hayashi (1970) and Westbrook and Tarter (1975). Nevertheless, our study does not represent a break with Hayashi's line of work as much as a continuation of it. In particular, our discussion of the opacity gap (§ II*g* and Appendix) reestablishes the central importance for protostellar evolution of Hayashi's insight concerning the existence of a *minimum* temperature for *gas* photospheres. This explains why our models approach the pre-main-sequence tracks in the H-R diagram from the *left* (see Fig. 7). We note that Hayashi's "forbidden zone" should be supplemented by the recognition that *dust* photospheres have a *maximum* temperature governed by grain destruction. The "forbidden strip" between Hayashi's *rightmost* boundary for gas photospheres and our *leftmost* boundary for dust photospheres represents what we have called the opacity gap (see Fig. 6).

降着終了時の原始星半径は林モデルよりもLarsonに近い。

しかし、林先生は偉いという話が続く。

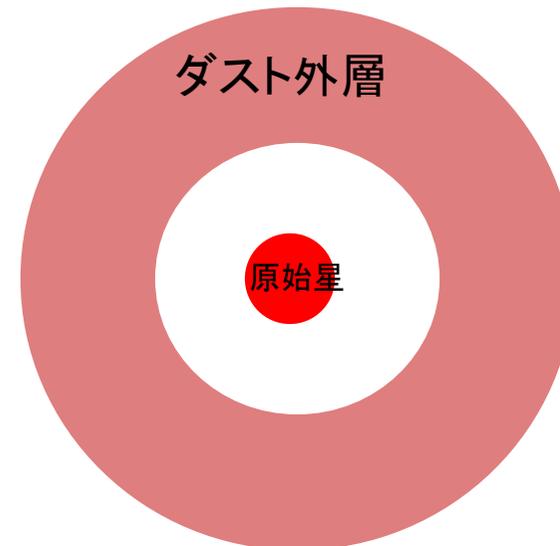
林シナリオと現代のものとの相違点

林シナリオ (当初のもの)



- ✓ほぼ一様に収縮
 - ✓高エントロピーの1Msunの星が一気に誕生。
 - ✓短いKH時間で冷却・収縮。
- その後、さらに収縮して主系列星になる
(原始星フェイズがない)

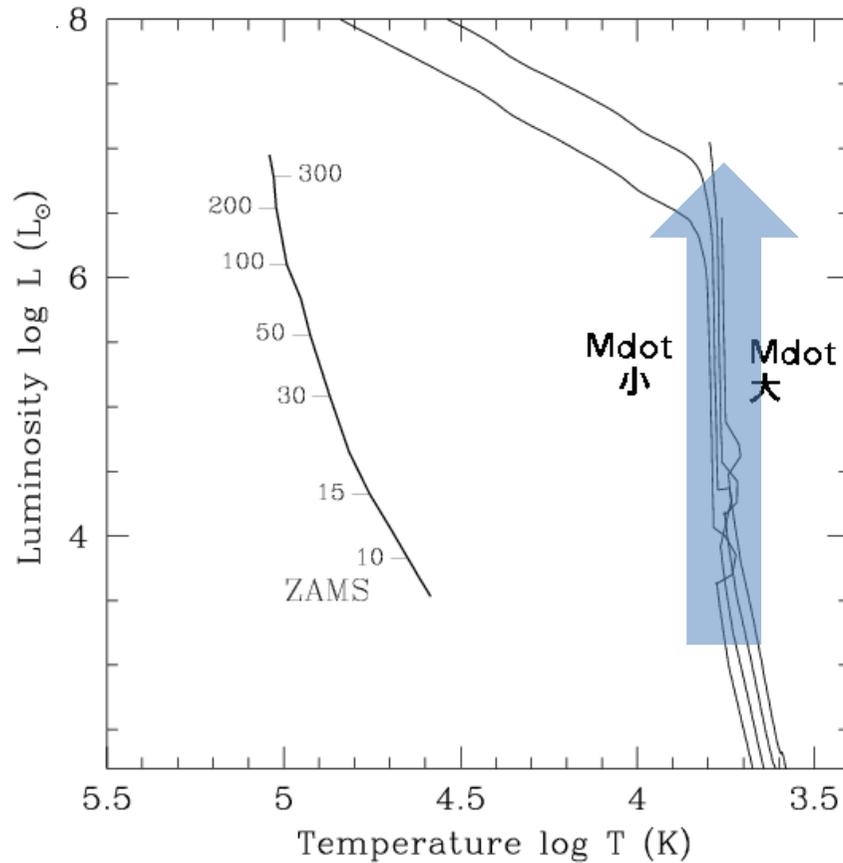
現在の標準シナリオ



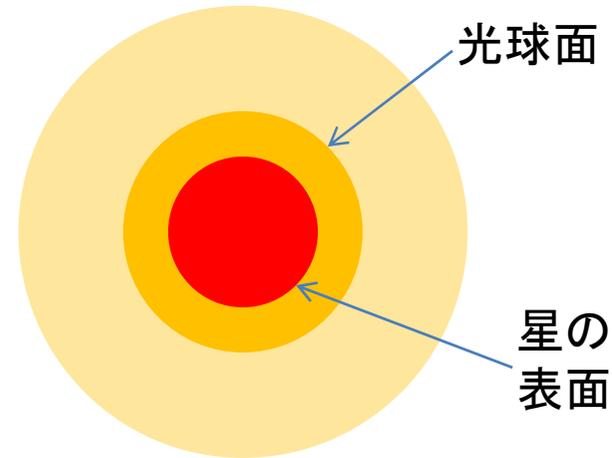
- ✓中心部が暴走的に収縮
- ✓微小な原始星が最初誕生
- ✓その後、降着により質量が増加。
- ✓エントロピーの大半は降着衝撃波からの輻射で失われる
(長い降着時間スケール)。
- ✓その間、原始星表面はダスト層に阻まれて見えない。

おまけ： 宇宙最初の原始星の降着進化

超大質量(1000 M_{sun})コア中で生まれる



Omukai&Palla (2003)



- ダスト外層はないが、降着率が大きく(0.001-0.01 $M_{\text{sun}}/\text{年}$)、降着流中にガス光球が形成される。
- $T_{\text{eff}} \sim 6000\text{K}$ のまま光度が上昇する(林フェイズとだいたい同じ位置だが、進化の向きが逆)。
- H^- opacityの強い温度依存性が原因(林フェイズと同じ理由)。