

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

○ { 出版 査読付き論文 }

- [1] 著者 **Kazuya Saigo**, and Kohji Tomisaka
題名 ‘ Evolution of First Cores in Rotating Molecular Cores ’
雑誌名 ApJ (The Astrophysical Journal), 645, 381, 2006

○ 研究会・学会・国際会議 等 発表

- [1] 著者 西合 一矢, 富阪幸治、松本倫明
題名 ‘First Core の質量降着進化’
会議名： 特定領域研究「サブミリ波の宇宙」研究会（第二回） 於京都大学 2006年5月18-19日
- 口頭発表
- [2] 著者 **Kazuya Saigo**, Kohji Tomisaka, and Tomoaki Matsumoto
題名 ‘ Evolution Path of the First Core in Rotating Molecular Cores ’、
(国際会議) Triggered Star Formation in a Turbulent ISM, International Astronomical Union. Symposium no. 237, held 14-18 August, 2006 in Prague, Czech Republic, S237, 207
- 収録、ポスター発表
- [3] 著者 西合 一矢, 富阪幸治、松本倫明
題名 ‘ファーストコアの進化トラック：時間スケール、光度変化、輻射温度の予想’
会議名： 日本天文学会秋季年会 於北九州 2006年9月19-21日
- 口頭発表
- [4] 著者 西合 一矢, 富阪幸治、松本倫明
題名 ‘回転を考えたときのファーストコア進化と輻射予測’
会議名： 星形成ワークショップ 於国立天文台 2006年11月20-21日
- 口頭発表
- [5] 著者 西合 一矢, 富阪幸治、和田圭一、大向一行、山田雅子
題名 ‘回転 First core 円盤からの輻射予測’
会議名： 日本天文学会春季年会 於 東海大学 (平塚) 2007年3月28-30日
- 口頭発表

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果（2006年度プロジェクトに関係するもの） 今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。
項目の説明の文章などは消去して報告内容を記述しても構いません。

成果の概要

我々は、本プロジェクトにおいて、多数の3次元数値流体シミュレーションを実行することで、分子ガス雲コアから星コア形成にいたる進化シナリオを回転がある場合に拡張し、それを定量的に示すことができた。これまで、回転無しの球対称モデルにおいては、暴走収縮のあと、準平衡状態の断熱ガス球であるファーストコアが形成され、それがある程度の質量を超えると再び重力崩壊を起こし星コアを形成することが知られていた。一方、回転があると、ファーストコアは回転平衡となりその後の重力崩壊と星コア形成に関する確立した進化シナリオは構築されてこなかった。本プロジェクトでは、昨年まで行ってきた2次元軸対称モデルによるファーストコアの進化パス予想を元に、3次元数値シミュレーションを用いて、この進化パスをさまざまな初期状態について調べた。

初期の分子雲コアの中心密度は、 $(\rho_{c0} = 10^{-19} \text{ cm}^{-3})$ と仮定した。さまざまな分子雲コアに関して調べるために、分子雲コアの回転の速さ、分子雲コアの平衡状態からのズレ C ($M \equiv CM_{\text{BE}}$)などをパラメータとして多くの計算を行った。回転パラメータは無次元量

$$\omega \equiv \Omega_{c0} t_{\text{ff}} \quad (1)$$

で定義した。ここで Ω_{c0} は角速度、 t_{ff} は free fall time $((3\pi/32G\rho_c)^{1/2})$ である。

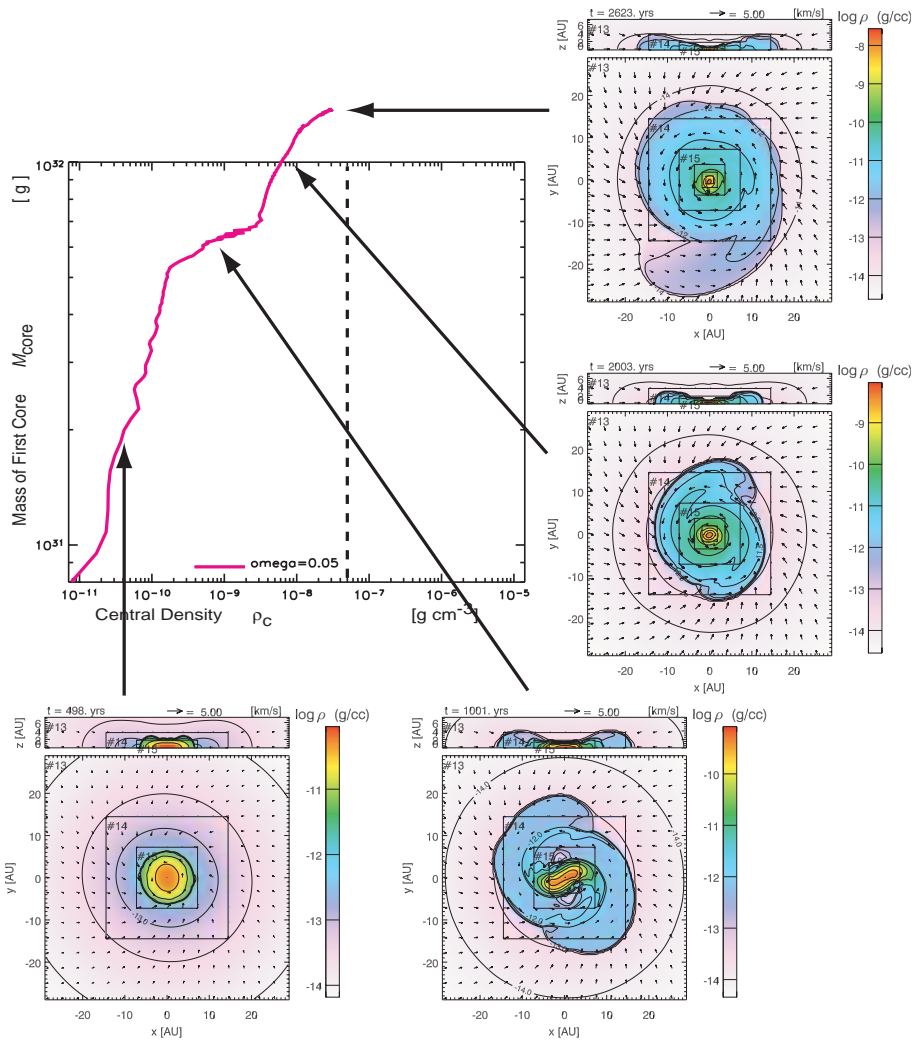


図 1. ファーストコアの進化 ($\omega \equiv \Omega_{c0} t_{ff} = 0.05$ モデル)。カラーマップは、ファーストコア形成 ($t = 0$ 年) から 500 年, 1000 年, 2000 年, 2600 年の密度分布。

図 1 は、平衡状態に近い典型的ガス雲コアから形成されたファーストコアの質量増加進化と典型的段階での密度分布である ($M \equiv 1.1 M_{BE}$, $\Omega_{c0} t_{ff} = 0.05$)。ファーストコアは厚み ~ 1 AU、半径 ~ 10 AU という平べったい回転平衡ガス円盤となる。同じ回転の大きさを持つガス雲コア中のファーストコアは、Jeans 質量の 9 倍以上の極端な場合を除いて質量-中心密度図上で同一の進化経路を持つ。ファーストコアは $M \sim 1 \times 10^{31}$ g ($0.005 M_{\odot}$) で形成され $M \simeq 2 \times 10^{32}$ g ($0.1 M_{\odot}$) で重力崩壊をする。タイムスケールは (infalling envelope が 10K の時) おおよそ 3000 年程度である。

図 2 は、(a) 回転が無い分子雲コア、(b) 典型的回転の分子雲コア、(c) 速い回転の分子雲コアにおけるファーストコアの質量-中心密度図上での進化トラックを示した。初期に極端に不安定な $M = 8 M_{BE}$ の場合 (緑線) を除いて、初期状態が違ってこのダイアグラム上では同一の進化トラック上を進化していることが分かる。つまり、進化トラックはガス雲コアの回転の強さが決めているのである。(a) の回転なし ($\Omega_{c0} = 0$) の場合は球対称的な進化となり、軽い質量で $M \simeq \text{a few} \times 10^{33}$ g ($0.01-0.02 M_{\odot}$) で重力崩壊密度に

達する。このときのタイムスケールは数百年である。(b)の回転が比較的ゆっくりな典型的な回転速のガス雲コアではファーストコアは、回転平衡で数十 AU の半径を持つガス円盤となり(図1)、より重い質量($\sim 0.1M_{\odot}$)になる。この場合、ファーストコアは長時間存在する。この計算では典型的には3000年程度のタイムスケールとなった。(c)の回転が速い場合($\Omega_{c0} = 0.1$)は進化の途中で分裂を起こす。これは連星系形成の有力なモデルである(例えば Matsumoto & Hanawa 2003)。

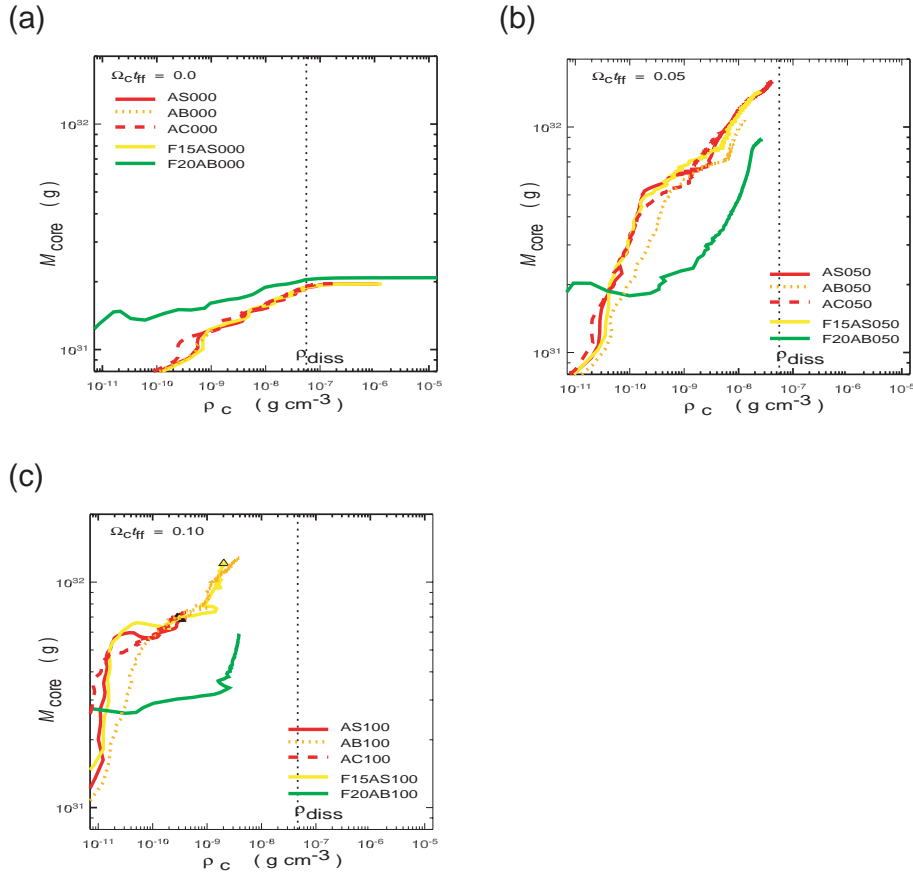


図2. さまざまな初期ガス雲コア中でのファーストコアの進化トラック。(a) 回転無しの場合、(b) 典型的な回転を持つ分子雲コアの場合、(c) 速い回転を持つ分子雲コアの場合。線の色は、virial 比(分子雲コア質量/virial 質量)の違いを表し、赤が1.1、黄色が3.37、緑が8倍である。線種は、コアの変形を表し実線はほぼ球対称、点線は軸比1:2のプロレートコアである。

3. ファーストコアへの質量降着率と光度進化

図3はファーストコアへの質量降着率の時間進化である。初期が平衡状態に近い分子雲コア($M = 1.1M_{BE}$)であった場合、回転の速さに依存せずに

$$\dot{M} \simeq 3 \times 10^{-5} M_{\odot} yr^{-1} \quad (2)$$

となる。この値は動的収縮する球対ガス球で予想される Larson-Penston 後期解 (Hunter

1977) のおおよそ 0.3-0.5 倍である。質量降着率は時間とともにゆっくりと低下していく。初期に Jeans 質量よりも大きな質量を持ち不安定なガス雲は、より大きな質量降着率となる。

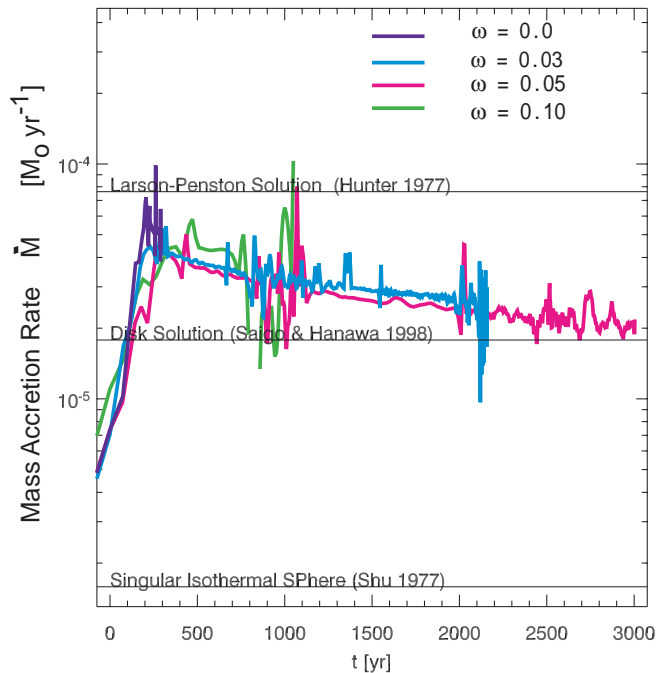


図 3. ファーストコアへの質量降着率の時間進化 (注: 図中の表記で $\omega = \Omega_{c0} t_{ff}$ である)。分子雲コアが初期のほぼ virial 比が 1 に近いもの (観測的にありふれたもの)。

図 4 はファーストコア光度の時間進化である。おおよそ、

$$L \simeq \text{afew} \times 0.01 L_{\odot} \quad (3)$$

である。光度進化は母体ガス雲の回転の速さに依存している。ファーストコア光度は、質量降着ガスとファーストコア自身の重力収縮による重力エネルギー解放がエネルギー源である。回転が速いガス雲中のファーストコアの方が低光度となるのは、遠心力によりファーストコアが扁平となる重力ポテンシャルが浅くなることの原因である。second collapse が起こると、急激な崩壊の影響で光度が数ヶ月の時間スケールで $1L_{\odot}$ 以上にまで上昇する。

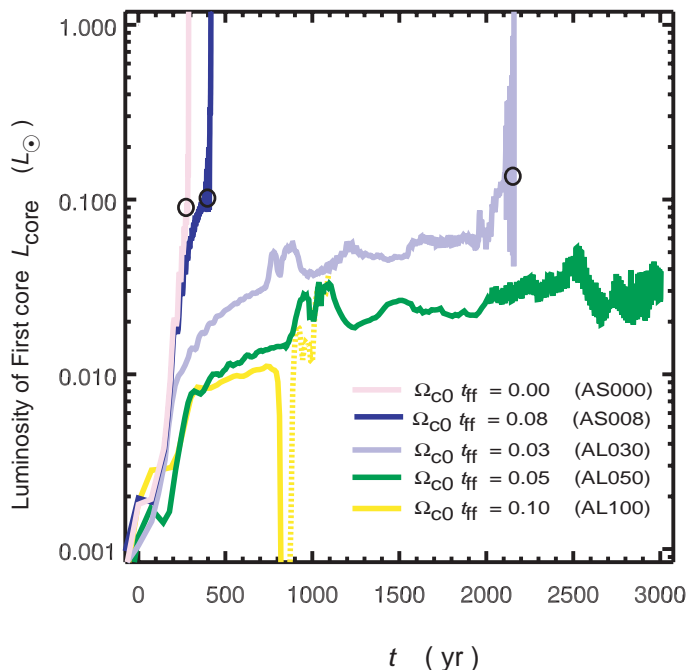


図4. ファーストコア光度の時間進化 (注: 図中の表記で $\omega = \Omega_{c0} t_{ff}$ である)。

4. ファーストコアの進化トラックと重力崩壊

図5は、中心密度-ファーストコア質量ダイアグラムで見た、ファーストコアの進化トラックである。カラーが3次元計算による典型的進化トラックの例である。AS008は初期にガス雲が極端に遅く回転している場合、AL030は典型的な回転速の場合(若干遅め)、AS100はやや速く回転している場合である。図5の実線は、Saigo & Tomisaka (2006)で2次元の平衡モデルをつなげて作ったファーストコア進化トラック予想である ($\omega = \Omega_{c0} t_{ff}$ という対応である)。赤色は、Saigo & Tomisaka (2006)による重力崩壊 (Second Collapse) する不安定領域の予測である。

今回、本プロジェクトにおいて2次元モデルと3次元数値シミュレーションと比較することができた。さらに進んで、非軸対称進化による角運動量輸送により、回転平衡となったファーストコアがどのように星コアを形成するののかも明らかにできた。

$\Omega_{c0} t_{ff} < 0.008$ という極めて小さな回転を持つ分子雲コアでは、ファーストコアは、直接、重力不安定領域に入り重力崩壊 (Second Collapse) を起こすことができる。これは球対称的な進化と同じである。一方、それより大きな回転を持つ通常分子雲コア (Goodman et al. 1993) では形成されるファーストコアは回転平衡ガス円盤となる。その回転平衡ファーストコアは、角運動量を伴う質量降着によって少しずつ質量と角運動量を増やし半径を増大させていく。しかし、 $t=800\text{yr}$ より後では、つねに非軸対称不安定にあり、弱い腕状構造の形成により中心部から徐々に書く運動量が抜かれていく進化となる。ゆっくりとした角運動量が輸送によりゆっくりと中心密度を上昇させていく進化段階となるのである。このように、通常分子雲コア中では、ファーストコアはこれまで考えられていたように球対称的な重力崩壊 (Second Collapse) をしないで質量降着により質量が増加しても中心密度がほとんど上昇しない進化へと入り長時間生存し重くなる。そして、3000年タイムス

ケールで中心部だけが重力崩壊を起こし星コアを形成する。ファーストコアは、標準シナリオに対して、寿命と質量は数倍から1桁以上も大きくなる。周囲のファーストコアは取り残され、星コアを取り巻く回転平行な断熱ガストラスとなる。

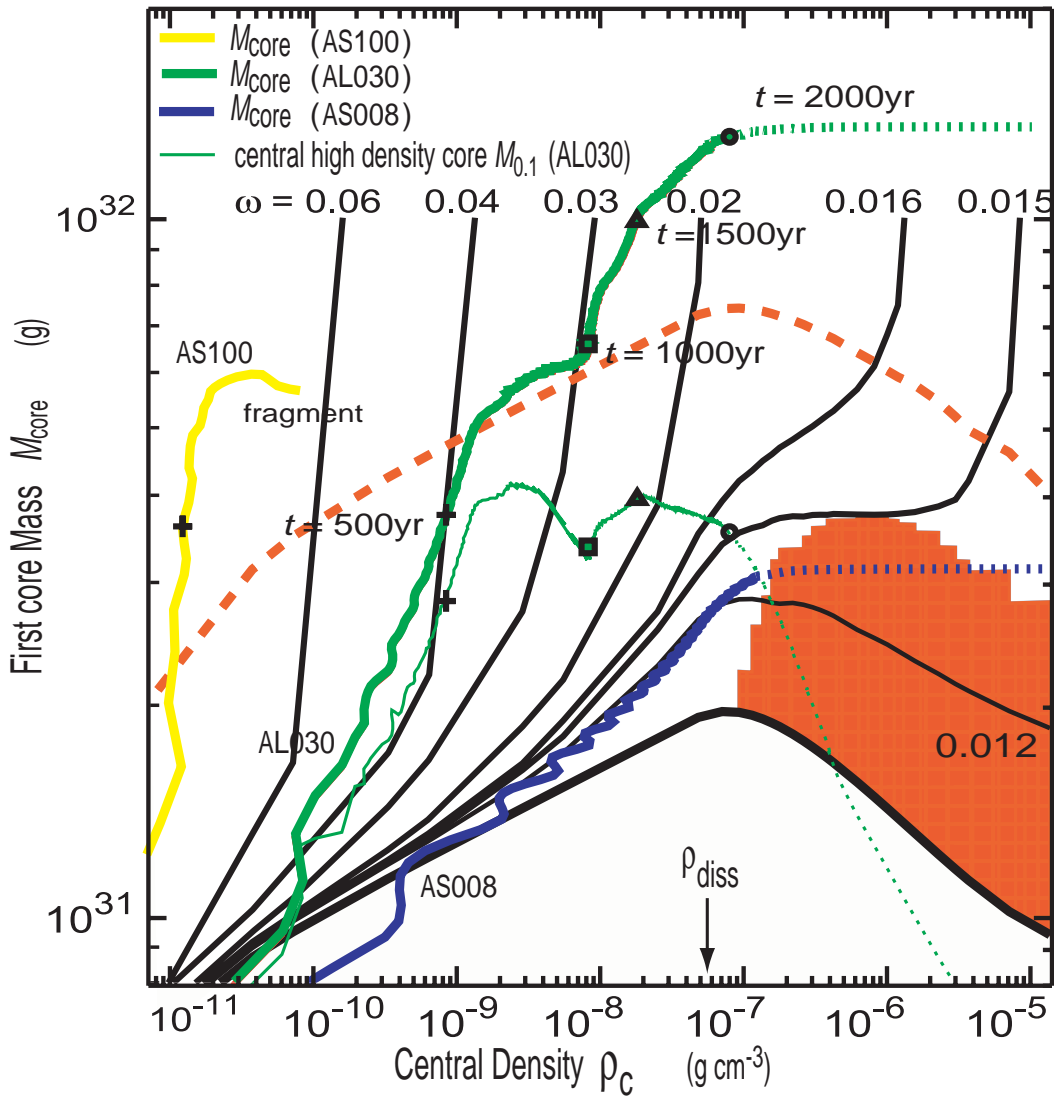


図5. ファーストコアの進化トラック。中心密度-質量ダイアグラム。

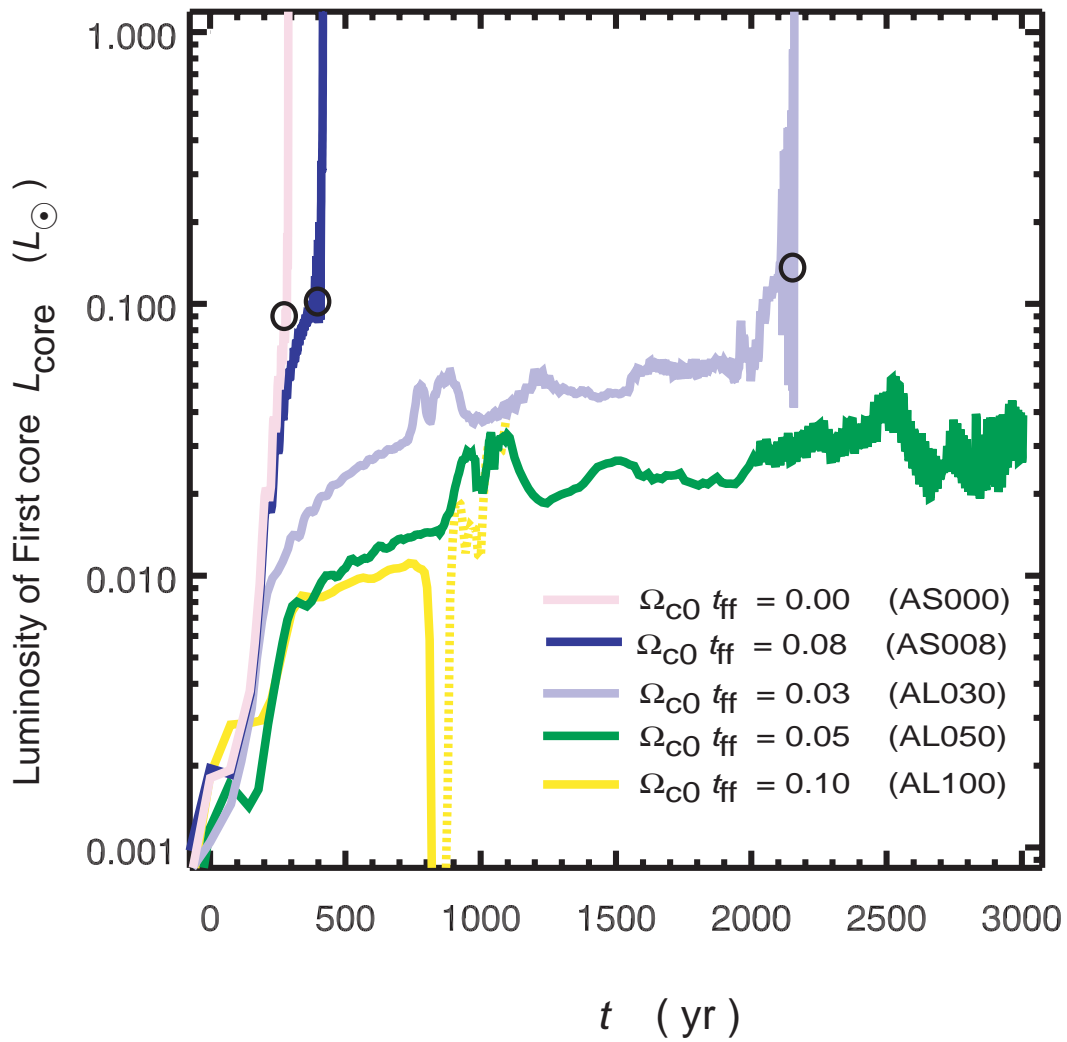


図6. ファーストコアの光度進化トラック。

図6は、質量降着による重力、力学、熱的エネルギーの変化から計算した光度進化である。光度進化は、質量降着率に比例し、タイムスケールは逆比例する。 $\omega = 0, 0.012$ の球対称的進化の場合、光度は100年のタイムスケールで一気に上昇し、その後重力崩壊する。しかし、通常はファーストコアは、数千年にわたって超低光度 ($L \sim 0.001 - 0.01 L_{\odot}$) を保つ。これは3次元計算の結果とよく一致しており、この進化トラックのモデルは本質を良く捕らえていることが分かる。

Cloud cores with slow rotation
($\Omega_{c0} t_{ff} < 0.01$)

Cloud cores with moderate rotation
($\Omega_{c0} t_{ff} > 0.01$)

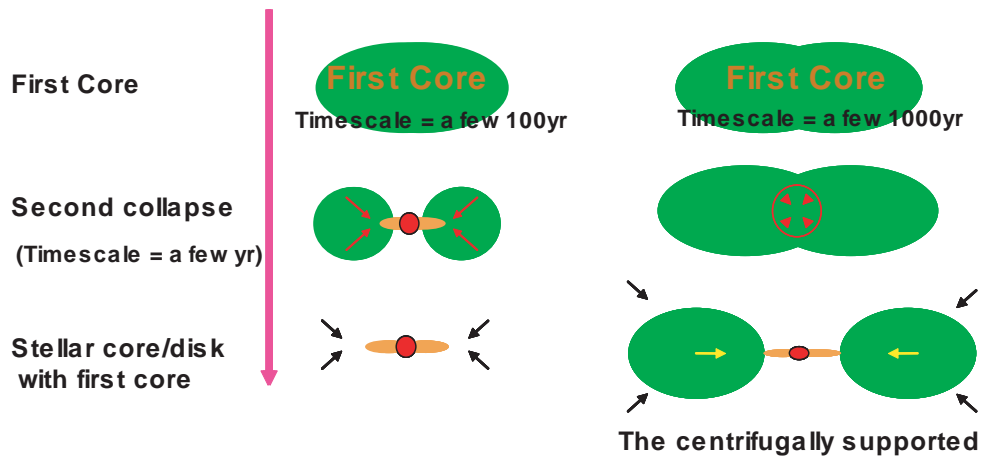


図7. 今回、分かったことのまとめ。