

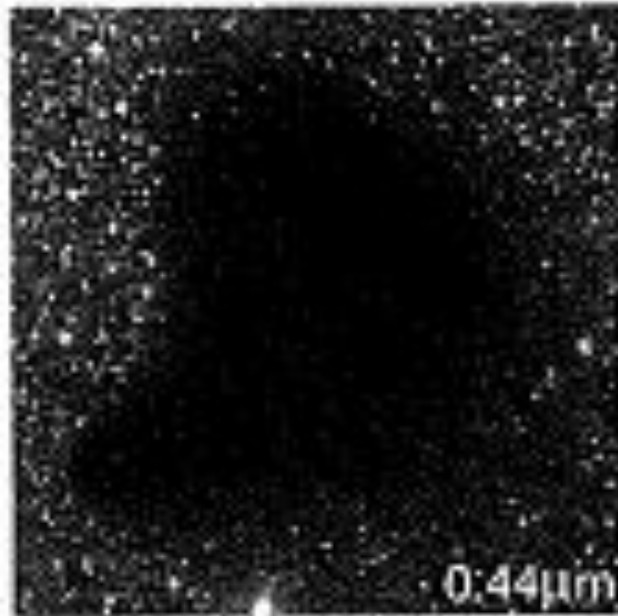
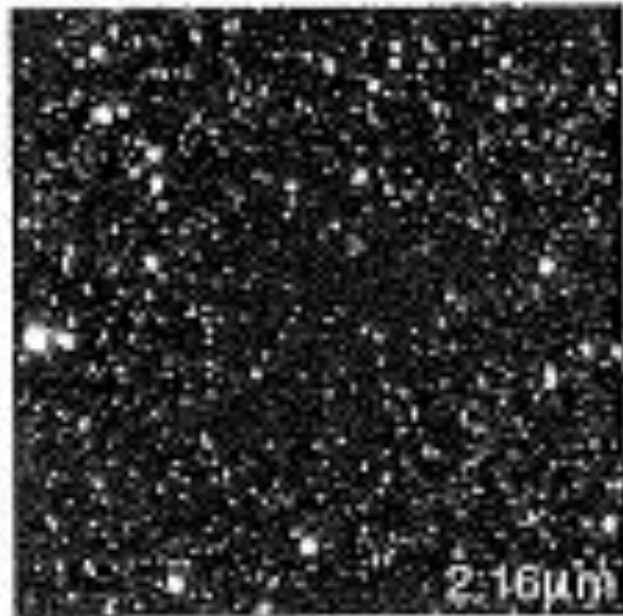
# 13.3 星形成

担当:樋口

# 1. 分子雲コア

# 1. 分子雲コア

- 銀河系には数多の低温・高密度の分子雲がある。
  - サイズは様々。小さいものでは太陽質量の0.1-10倍程度のコア。大きいものでは太陽質量の $10^5$ - $10^6$ 倍に及ぶ巨大な系までである。
  - 温度はおよそ10-30 K
  - CO, HCN, CS, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>COなどの波長を含む



右図でよく見える暗い部分が分子雲

# 1. 分子雲コア

- 星形成によってできる分子雲はより高密度で低温
  - 密度は10-1000倍
  - 温度は10 K以下
  - ほとんどがH<sub>2</sub>と(多分)He ※Heは検出が困難
  - その他多くの分子を含んでいる
    - 前述した分子に加えてOH, H<sub>2</sub>O, CN, SiO, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S
    - 多くのH, C, N, Oを含む化合物
    - 12原子を超えるおおきな化合物
    - 質量比はとても小さい

# 1. 分子雲コア

- 基本的に星間分子雲は崩壊に対して安定(内部圧力 > 自己重力)
  - ※内部圧力: 磁場や攪乱、回転によって増加するガスの圧力
- 結果的に雲は広がっていく

# 1. 分子雲コア

- ビリアル定理: 磁気圧力・外的圧力を無視した平衡の式

$$E_G = -2E_k$$

$E_G$ : 重力ポテンシャル  $E_k$ : 運動エネルギー

- $|E_G| > 2E_k$  のとき、重力崩壊が起こる

- これより大きいと崩壊する質量: ジーンズ質量

$$M_j \approx \left( \frac{kT}{G\mu_a m_{amu}} \right)^{3/2} \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

# 1. 分子雲コア

- 崩壊の要因
  - 銀河の圧縮されている渦状腕を通過
    - 密度が急増することでジーンズ質量が小さくなる
  - 超新星爆発
    - 重力ポテンシャルが急激に運動エネルギーに



M101における渦状腕の図示

Credit: European Space Agency & NASA

# 1. 分子雲コア

- 実際にはこれらも影響してしまう
  - コアは球形からは程遠い
  - 磁場の影響
  - より小さい範囲での回転
- 分子雲コアの寿命は数十万年程度
  - 太陽付近のガスが銀河の渦状腕から次の腕にたどり着くタイムスケールより2ケタ程度少ない



## 2. 分子雲コアの崩壊

- 平衡状態の分子雲

⇔ 圧力勾配と重力がつりあっている

- 重力が十分に大きいと...

→ 分子雲が崩壊する

このときのタイムスケール... 自由落下時間  $t_{ff}$

$$t_{ff} = \left( \frac{3\pi}{32G\rho} \right)^{1/2}$$

## 2. 分子雲コアの崩壊

- 高密であるほど速く崩壊し、場合によっては破砕する
- 収縮するにつれて密度がさらに上昇し、重力崩壊が進行する
- 崩壊が止まるタイミング
  - 熱圧力が重力とつりあうまで温度が上がる
    - このとき分子雲よりかなり小さくなっている
  - 回転によって崩壊が阻害される
    - 中心で成長する原始星の周りに円盤形成

## 2. 分子雲コアの崩壊

- コアの回転が速い場合、いくつかの分子雲に分裂する可能性  
→それぞれが星形成して連星系に
- コアの角運動量が小さいと分裂せず単一の星になる

## 2. 分子雲コアの崩壊

- 角運動量を比較すると...

**回転する分子塊のもつ角運動量 >> 星が壊れずに持てる角運動量**

- 超低速回転する分子雲でも成り立つほど大きな差
- 質量は中心にある星がほとんどを占める

**全ての単一星、多くの連星は形成中どこかの段階で  
平たい分子雲を持っていたと考えられる**

- 太陽系でも質量の99.8%は太陽、角運動量の98%は惑星系

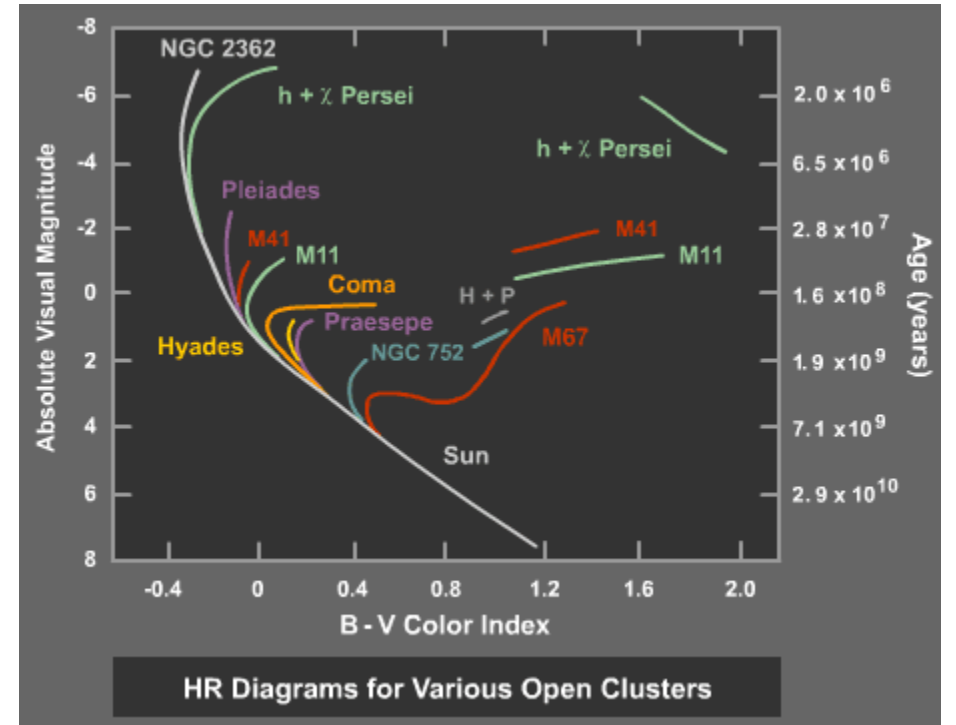
## 2. 分子雲コアの崩壊

- 崩壊中の話: 重力エネルギーが運動エネルギーになって温度上昇
  - 分子雲が赤外を十分に伝導できる場合
    - 熱は放射してそのうちコアは冷えたままになる
  - 分子雲が高密度になるにつれてそのうちコアが不伝導性に
    - コア中心の原始星が熱されて静水圧平衡になるまで内部圧力が上昇
    - ※静水圧平衡: 重力と圧力勾配のつりあい
- $T \approx 10^6$  Kに到達:  ${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$
- 重水素が尽きると $T \approx 10^7$  Kに到達するまで収縮
- $T \approx 10^7$  Kに到達:  ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$

# 3. 星形成の観測

- 星の年齢の推定方法

- 運動学的年齢: 星の相対速度によって区分された層の大きさ
- H-R diagram での年齢
- 星のLiの吸収線の強度
  - Liは対流によって星内部に輸送されて原子核融合によって崩壊する。(≤  $M_{\odot}$ )

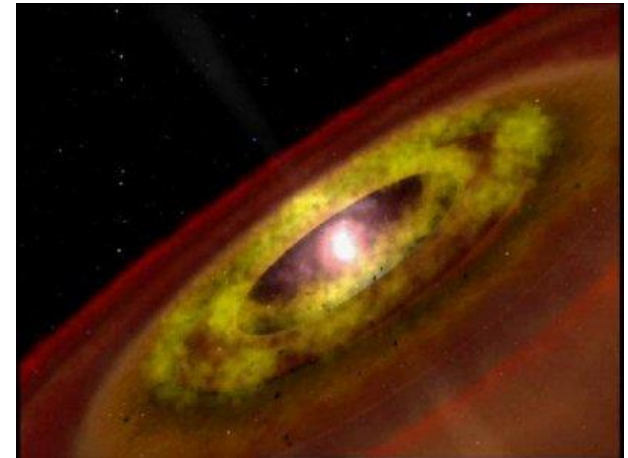


H-R diagram

credit: Mike Guidry, [University of Tennessee](http://www.astro.utk.edu/~guidry/)

# 3. 星形成の観測

- 若い星(前主系列星): T Tauri stars (Tタウリ型星)の例
  - 基本的に高密のガスやダストの中に見つかる
  - 数時間程度のスパンで不規則に明るさが変化する
    - 大きな黒点を持つものが多く、自転周期が短い(数日程度)
  - スペクトル幅が黒体放射よりかなり広い
  - 強い恒星風が存在し、強いX線を放出



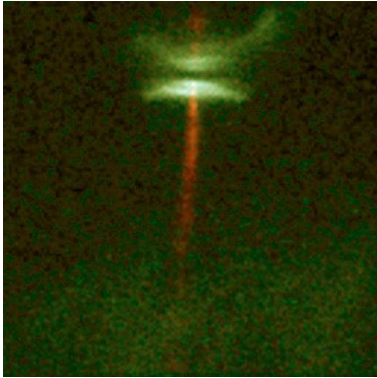
**とても活発で平衡状態にないプロセスを示唆**

# 3. 星形成の観測

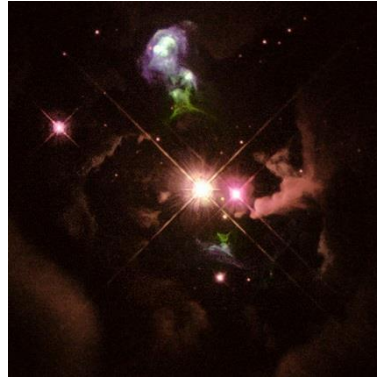
- その他の例

- Herbig Haro

- ガスの双極対流と恒星周辺の星間物質の相互作用で光る



Credit:NASA



Credit:

NASA and The Hubble Heritage Team

- FU Orionis Stars

- 降着率が数10年で100倍以上に

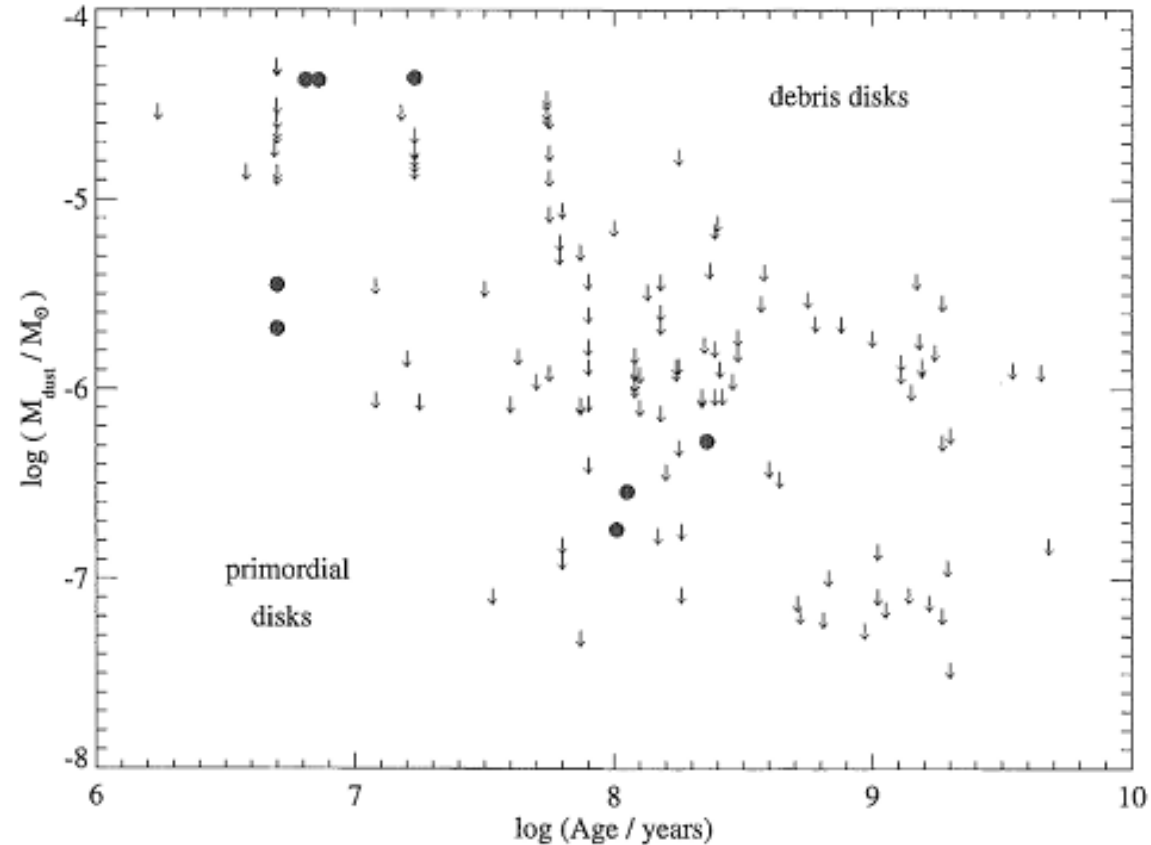


## 4. 星周円盤の観測

- 赤外線<sup>の</sup>過剰放出が前主系列星で観測される
  - 数10～数100AUにわたって広がる星周外層の物質
- 赤外付近の放射がないいくつかの円盤
  - 古い天体の大きい破片で観測
  - 円盤内部にすきまがある
- ハッブル宇宙望遠鏡とミリ波観測による直接的な証拠も

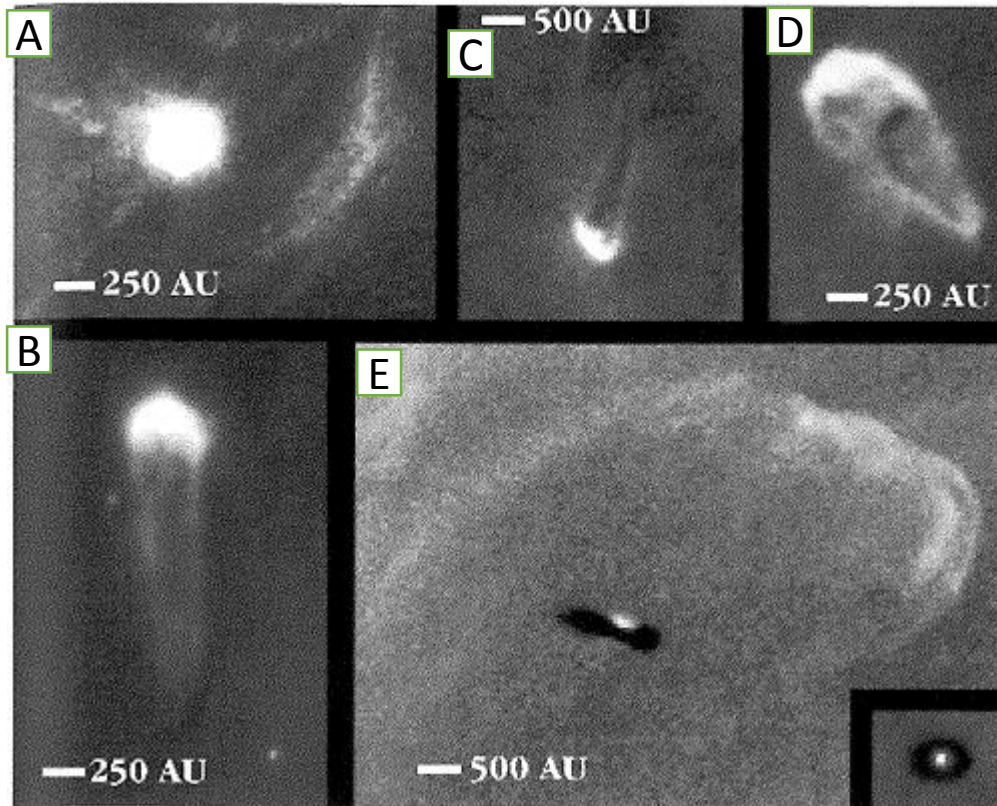
# 4. 星周円盤の観測

- 若い天体付近でも観測されるが、円盤のサイズに差異がある



# 4. 星周円盤の観測

- オリオン大星雲にある若い星と円盤
  - いずれも太陽系よりも大きいスケールである



A,B : 近くの巨大な星からの紫外線によって光蒸発している

C-E : 若い星のぼやけた光による影