

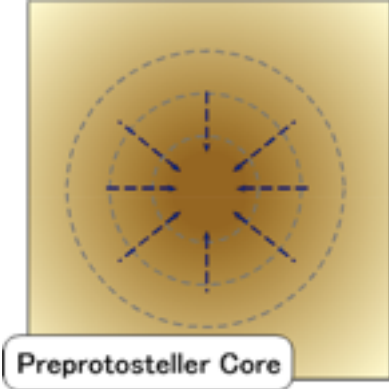
# MIMIZUKUで探る星形成の 最初期段階

古屋 玲

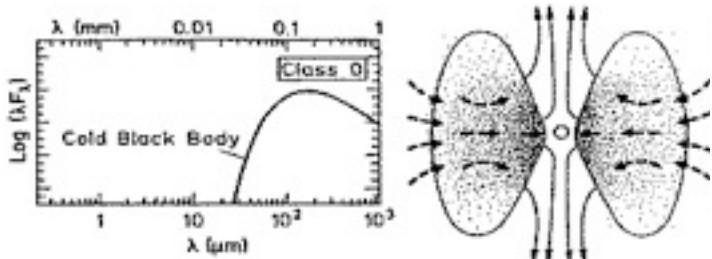
徳島大学 全学共通教育センター

# outline of talk

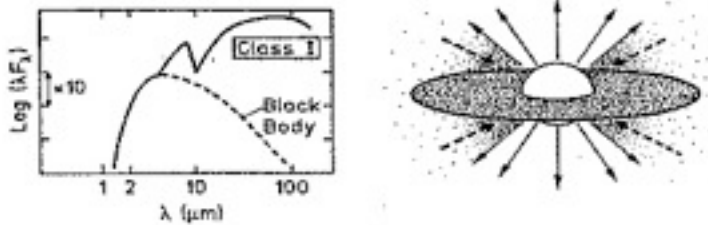
- Background
- 星形成初期段階の中間赤外線観測とみみずく  
連続波  
水蒸気分子回転遷移輝線
- まとめ



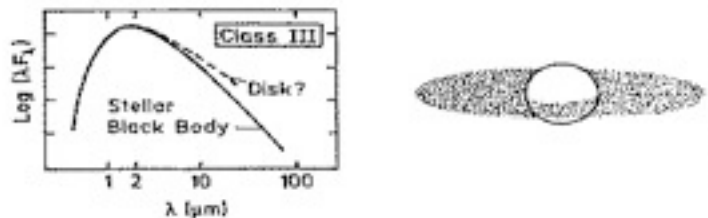
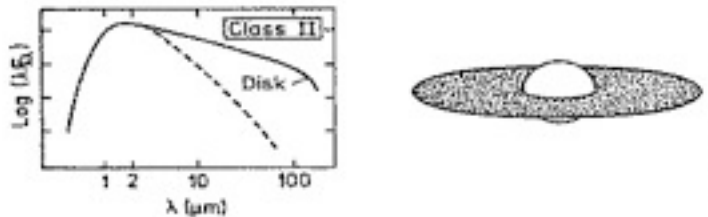
Free-fall time scale:  $10^5$  yrs



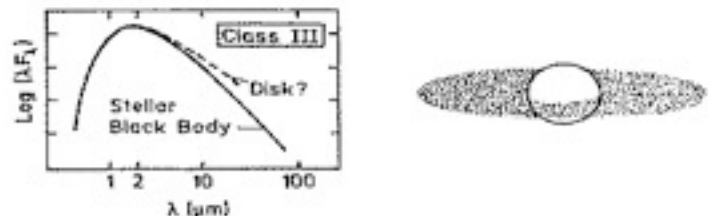
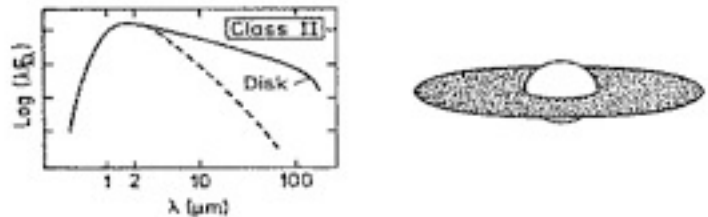
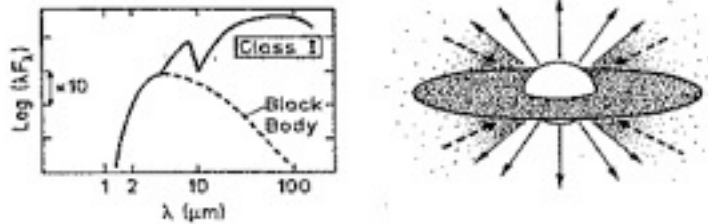
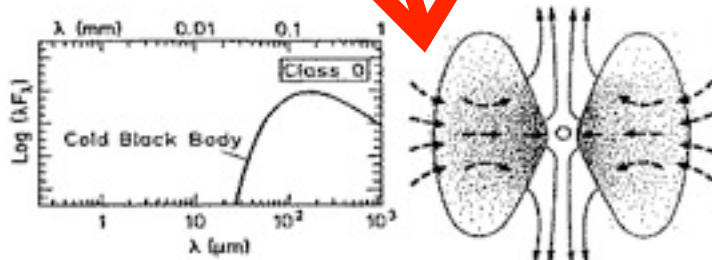
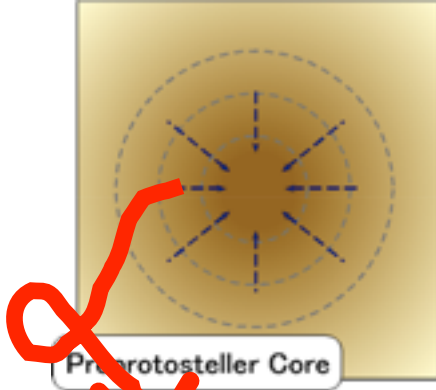
Main accretion phase:  $10^4$  yrs



Late accretion phase:  $10^5$  yrs



# Evolution from **starless core** to **class 0 source**: Largely Unexplored



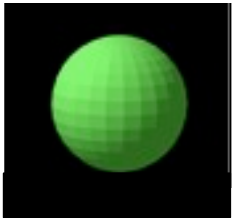
How does gravitational collapse of starless cores proceed? What physics drive the process?

What are the initial and boundary conditions for gravitational collapse?

What are physical properties of the very first protostar (adiabatic core = "first core")?

磁気流体力学の運動方程式： $\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P - \rho \nabla \phi_g + \frac{1}{4\pi} (j \times B)$

に位置ベクトルをかけて体積積分すると、ビリアル関係式



$$\frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = 2(T - T_0) + M + W$$

を得る。

ただし、星間雲の構造は球対称、一様密度、一定温度を仮定。

$$I = \int \rho |\mathbf{r}|^2 dV$$

球の慣性モーメント

$$T = \int_{V_{cl}} \left( \frac{3}{2} P_{thm} + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) dV$$

熱運動と星間雲内部での(無秩序)運動による運動エネルギー

$$T_0 = \int_S P_{thm} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}) dS$$

表面圧力に起因する項

$$M \simeq \frac{1}{8\pi} \int_{V_{cl}} (B^2 - B_0^2) dV$$

磁場のエネルギー

$$W = - \int_{V_{cl}} \rho \mathbf{r} \cdot \nabla \phi dV$$

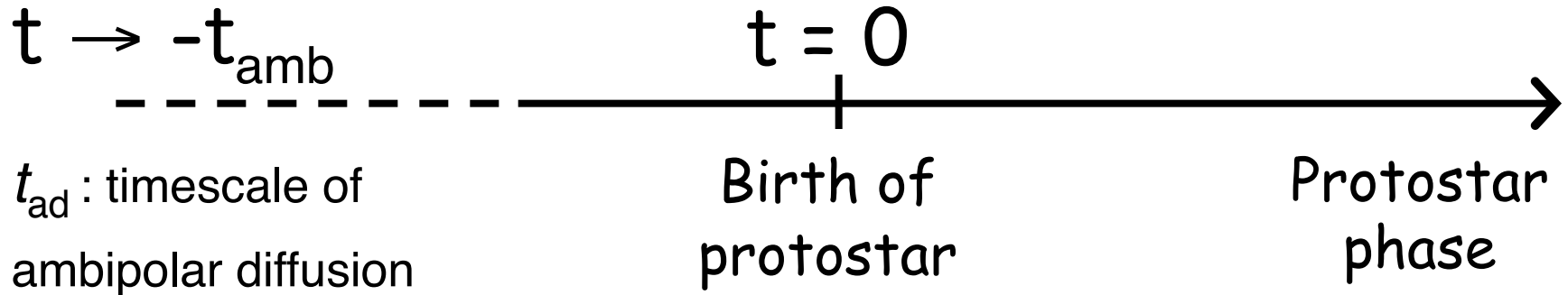
自己重力

# Spontaneous SF: Quasi-Static Collapse

Magnetically supported quasi-static state when a star is born

$$v(r,t) = 0 \text{ for } r \rightarrow \infty, t = 0$$

Shu 1977

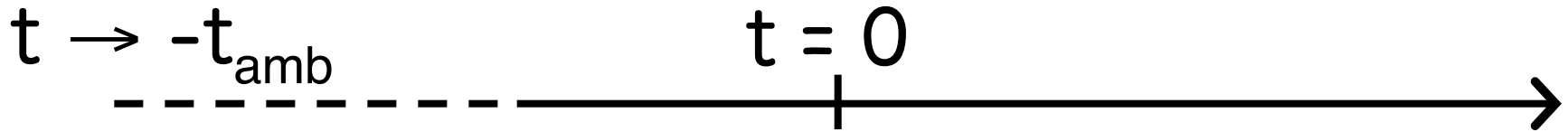


## Spontaneous SF: Quasi-Static Collapse

Magnetically supported quasi-static state when a star is born

$$v(r,t) = 0 \text{ for } r \rightarrow \infty, t = 0$$

Shu 1977



$t_{\text{ad}}$ : timescale of  
ambipolar diffusion

Birth of  
protostar

Protostar  
phase

## Induced SF: Runaway Collapse

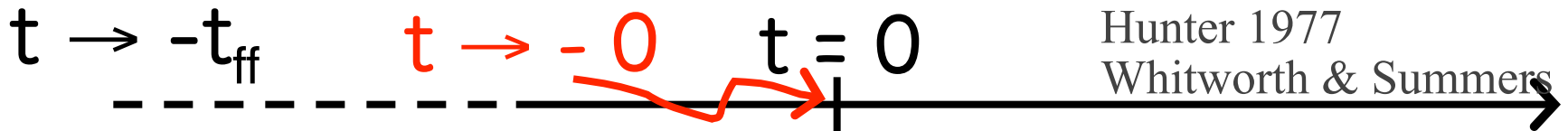
External force triggers S.F., causing dynamical collapse

$$v(r,t) = v(r/(c_s t)) \approx -2.38 c_{\text{iso}} \text{ for } t \rightarrow -0$$

Larson 1969, Penston 1969

Hunter 1977

Whitworth & Summers 1985



$t_{\text{ff}}$ : free-fall time

Birth of  
protostar

Protostar  
phase

物理的に意味のある情報を引き出すためには

何を 何で どのレベルまで 観測できれば新しいか？



物理的に意味のある情報を引き出すためには  
何を何でどのレベルまで観測できれば新しいか？

t=0に近い進化段階の原始星 (進化のシナリオ中のごく短い時期であり、その数はそれに比例して少ない。)における(質量放出ではなく)質量降着に関わる現象を

光学的に薄く、

柱密度を反映する放射 : 100AUを切る空間分解能

速度場を反映する輝線 : 非熱的速度分散の起源を議論できる  
速度分解能

物理的に意味のある情報を引き出すためには  
何を何でどのレベルまで観測できれば新しいか？

t=0に近い進化段階の原始星 (進化のシナリオ中のごく短い時期であり、その数はそれに比例して少ない。)における(質量放出ではなく)質量降着に関わる現象を

光学的に薄く、

柱密度を反映する放射 : 100AUを切る空間分解能

速度場を反映する輝線 : 非熱的速度分散の起源を議論できる  
速度分解能

発達した分子流を駆動していない段階のlow-mass protostarやmassive YSOを

ダスト熱放射と水蒸気輝線で

地上大型望遠鏡搭載カメラで、中間赤外よりも長波長で

# ダスト熱輻射

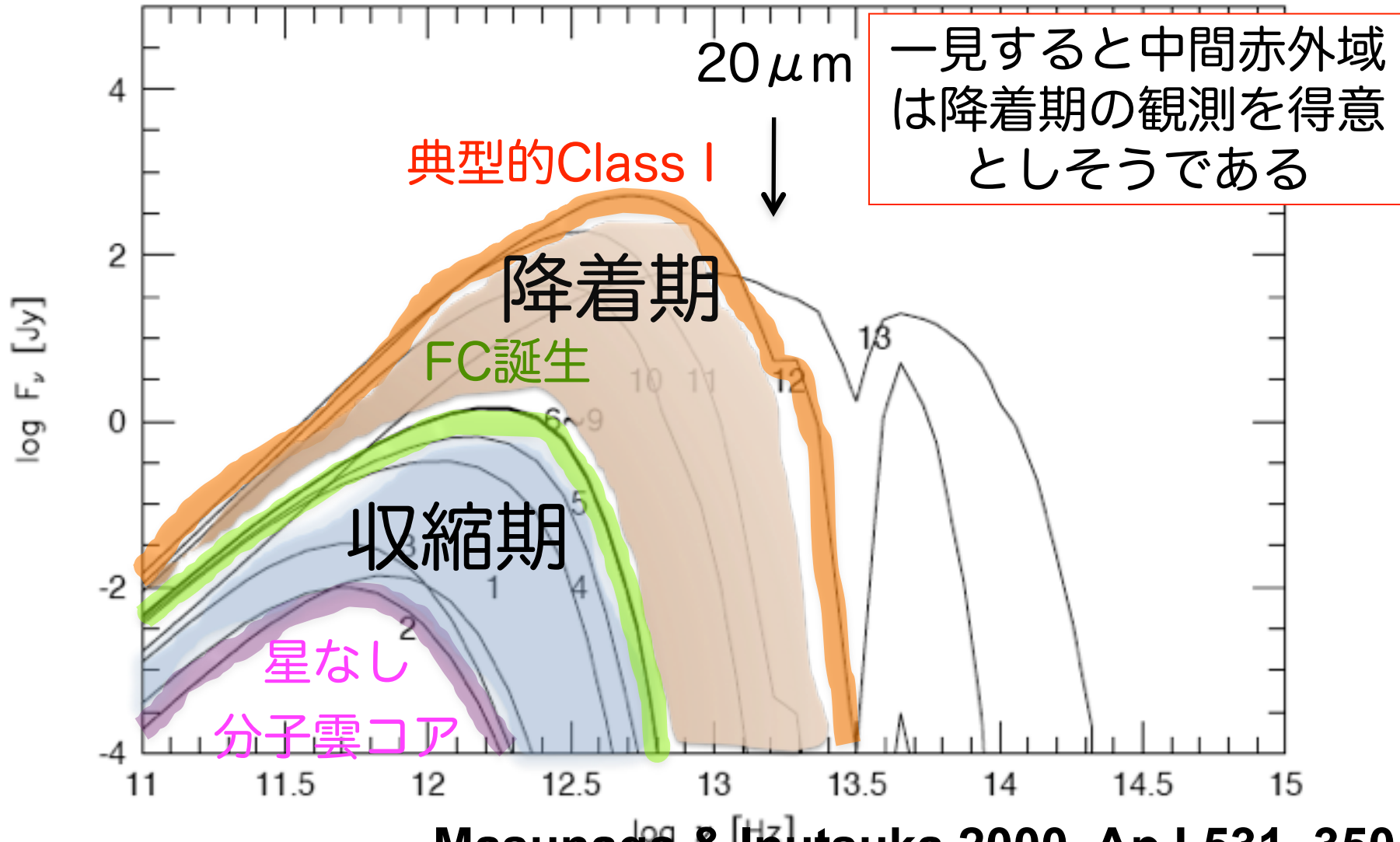
を特徴づける未知数は最低3つなので  
レイリージーンズ側のALMA bandsを含めて  
3つの波長での観測が本質的であるが、  
MIMIZUKUでは、

複数のダスト熱放射源の空間分布: 分裂過程理解へのヒント

個々のダスト熱放射源の全フラックス: 質量導出

個々の天体の $F_{\text{nu}}$ の動径分布: 密度構造導出へ

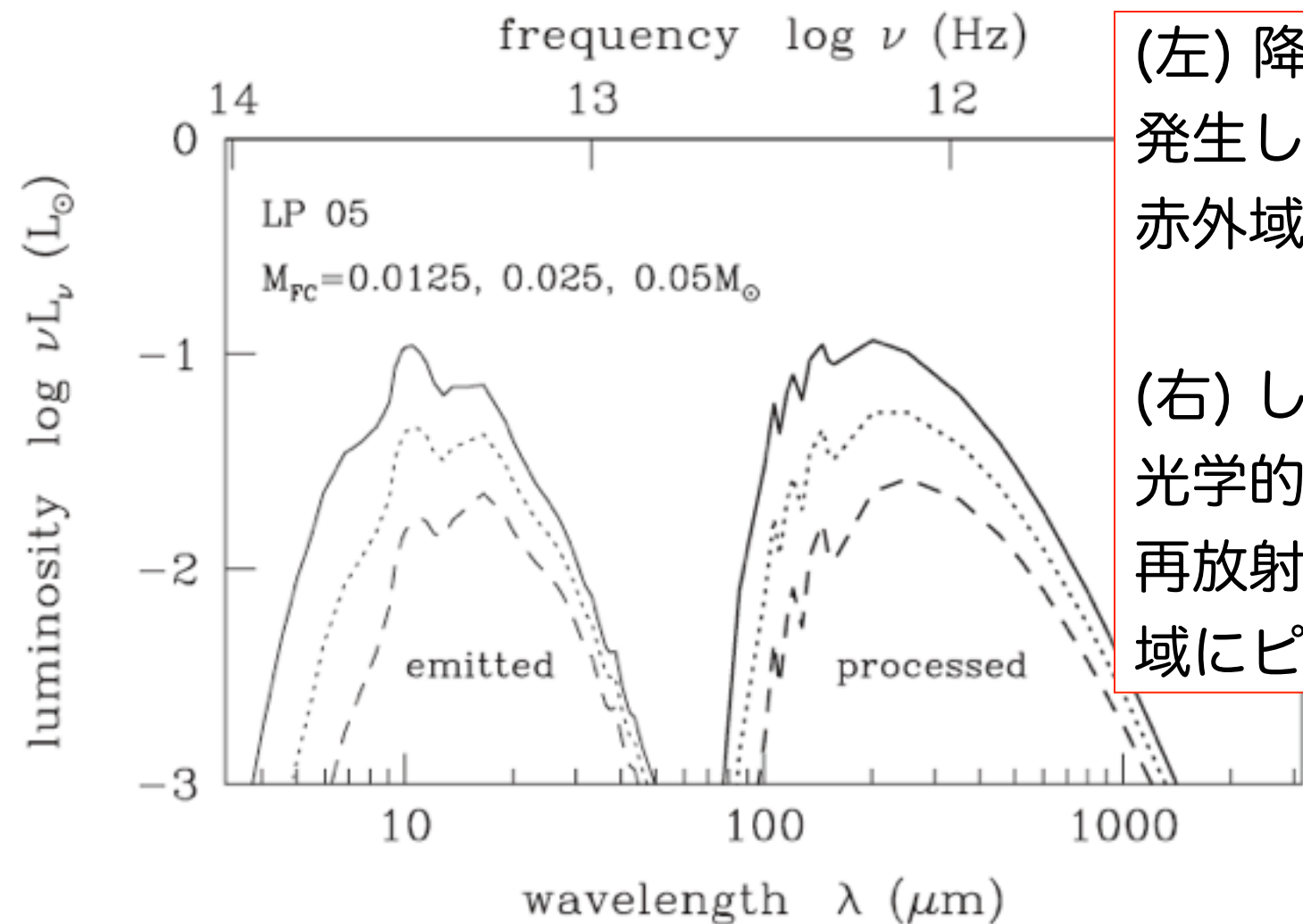
# SEDの進化: 外側から見たとき



Masunaga & Inutsuka 2000, ApJ 531, 350

See also Commercon et al. 2011 AA 530, A13など

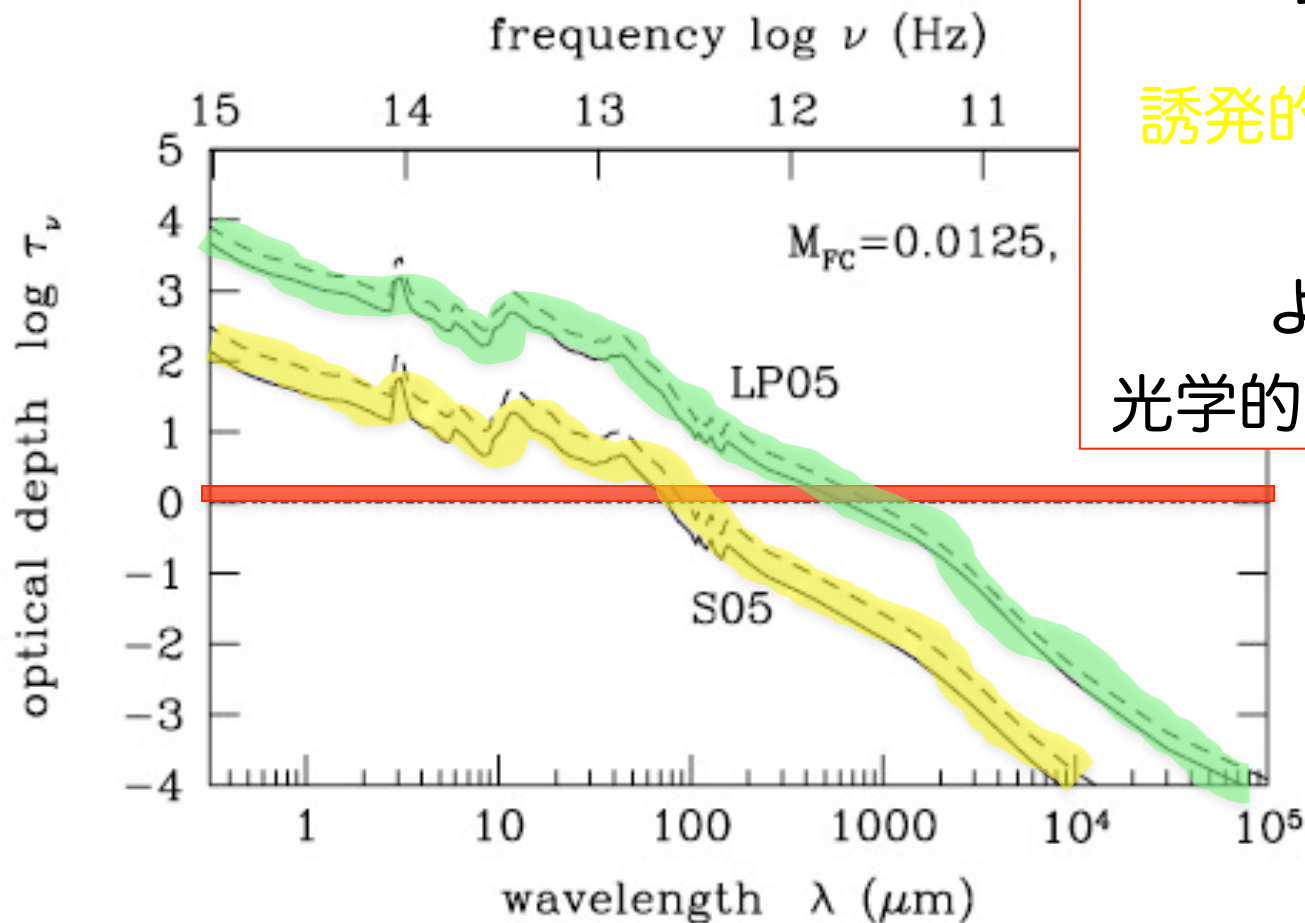
# First CoreそのもののSEDと 外層を通して見たときのSED



(左) 降着ショックで発生した輻射は中間赤外域で最大。

(右) しかし、外層は光学的に厚いため、再放射を経て遠赤外域にピークは移動

# ダスト熱放射: First Coreを囲む 外層による吸収



自発的星形成のシナリオ  
では95  $\mu\text{m}$ 、  
誘発的星形成のシナリオ  
では950  $\mu\text{m}$   
より短波長側で  
光学的に厚くなってしまおう

# 水蒸気分子回転遷移

地上サブミリ波望遠鏡では

1-10<sup>arcsec</sup>の空間分解能と $R \sim 5 \times 10^6$ を超える高波長分解能を誇りつつも  
大気の熱輻射と大気中の水蒸気に阻まれ主にレーザー遷移の議論に留まっていた。

# 水蒸気分子回転遷移

地上サブミリ波望遠鏡では

1-10<sup>arcsec</sup>の空間分解能と $R \sim 5 \times 10^6$ を超える高波長分解能を誇りつつも大気の熱輻射と大気中の水蒸気に阻まれ主にレーザー遷移の議論に留まっていた。

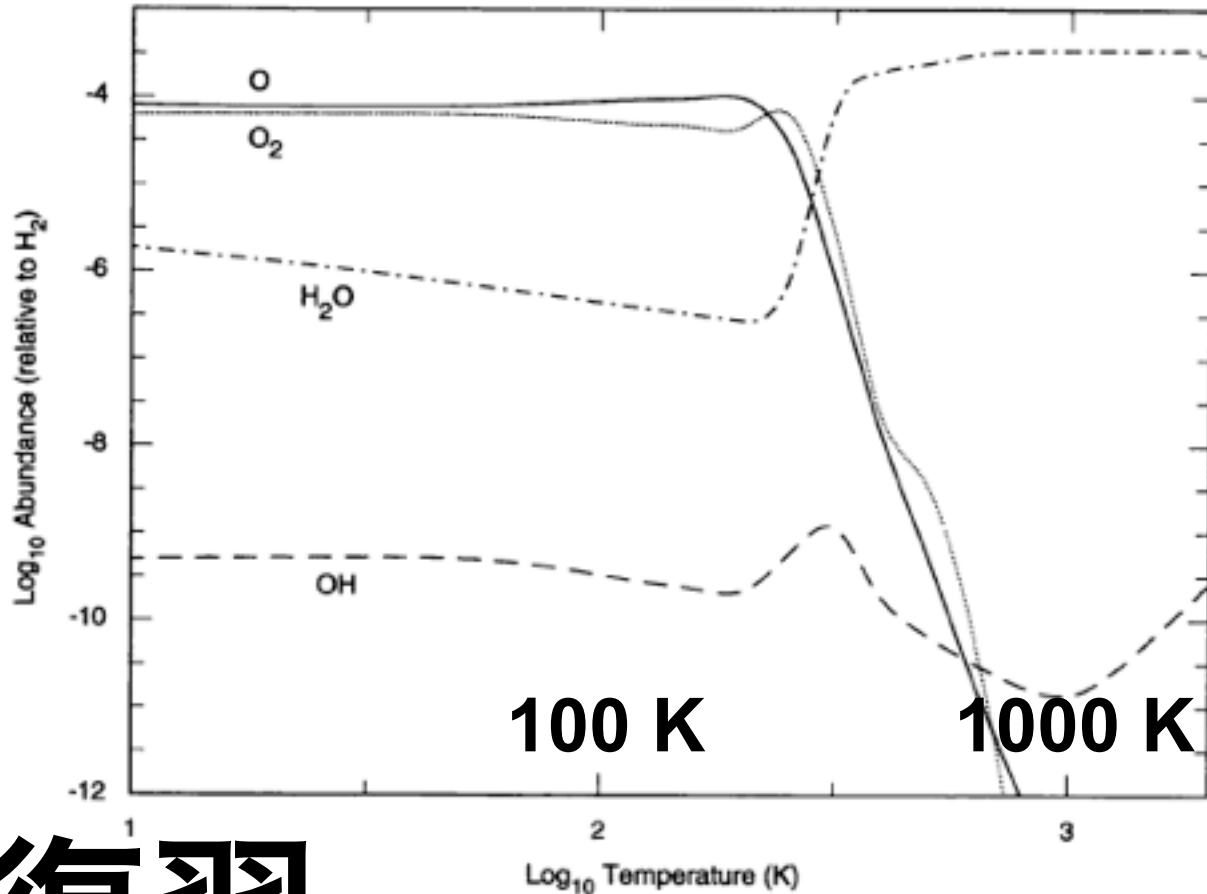
衛星搭載赤外望遠鏡では

音速の数倍程度の低分散分光で複数の遷移を受信し、モデルを併用し、衝撃波起源の分子ガス流の運動などの研究が主流だった。



# 高密度 [ $n(\text{H}_2)=10^6\text{cm}^{-3}$ ] ガス中の酸素存在比 (代表的な)分子の存在比の温度依存性

# 復習

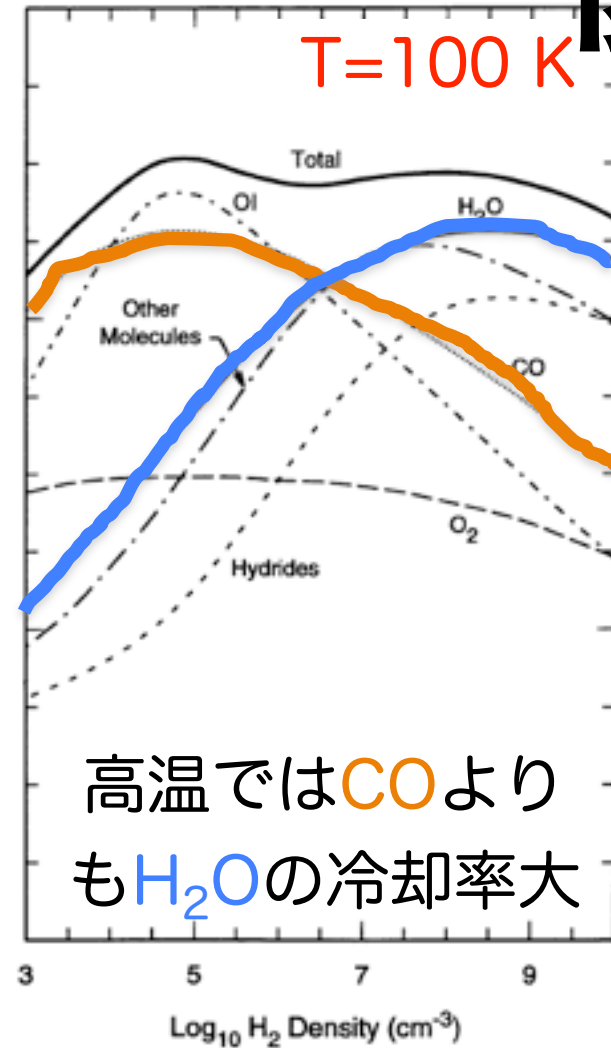
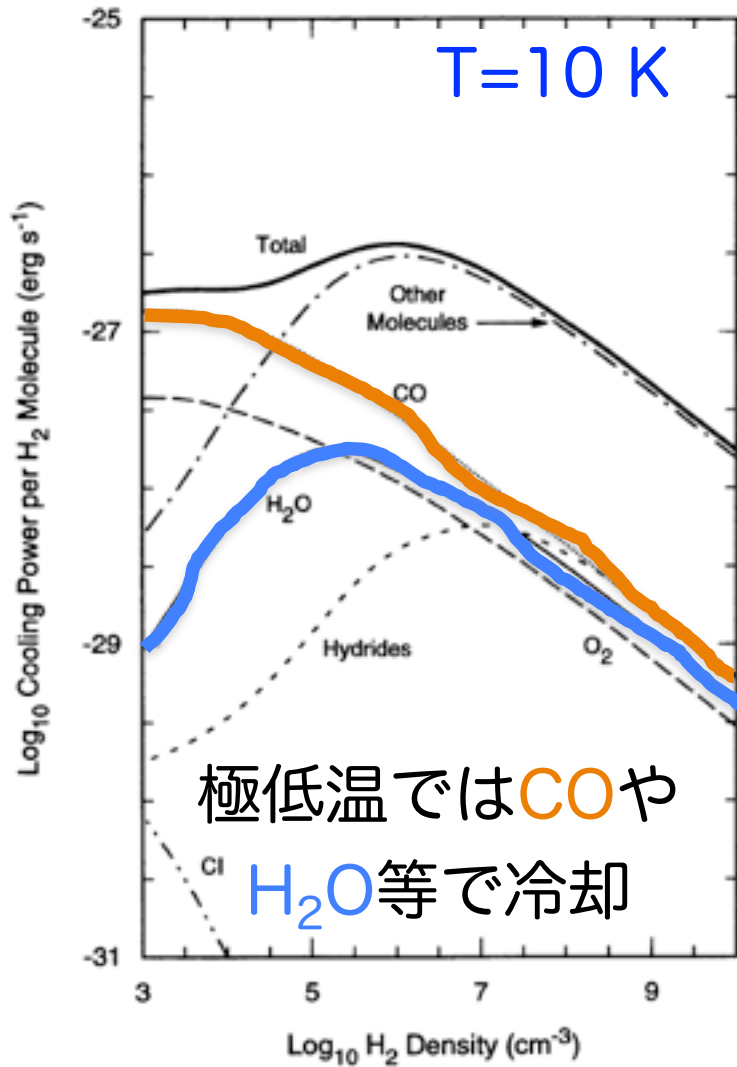


300 Kよりも高温では気相中の酸素原子(O)と分子( $\text{O}_2$ )は、COよりも $\text{H}_2\text{O}$ を生成  
高温であるほど $\text{H}_2\text{O}$ の生成は進む。

# 復習

# 冷却率の温度及び密度依存性 **復習**

# 復習



# 復習

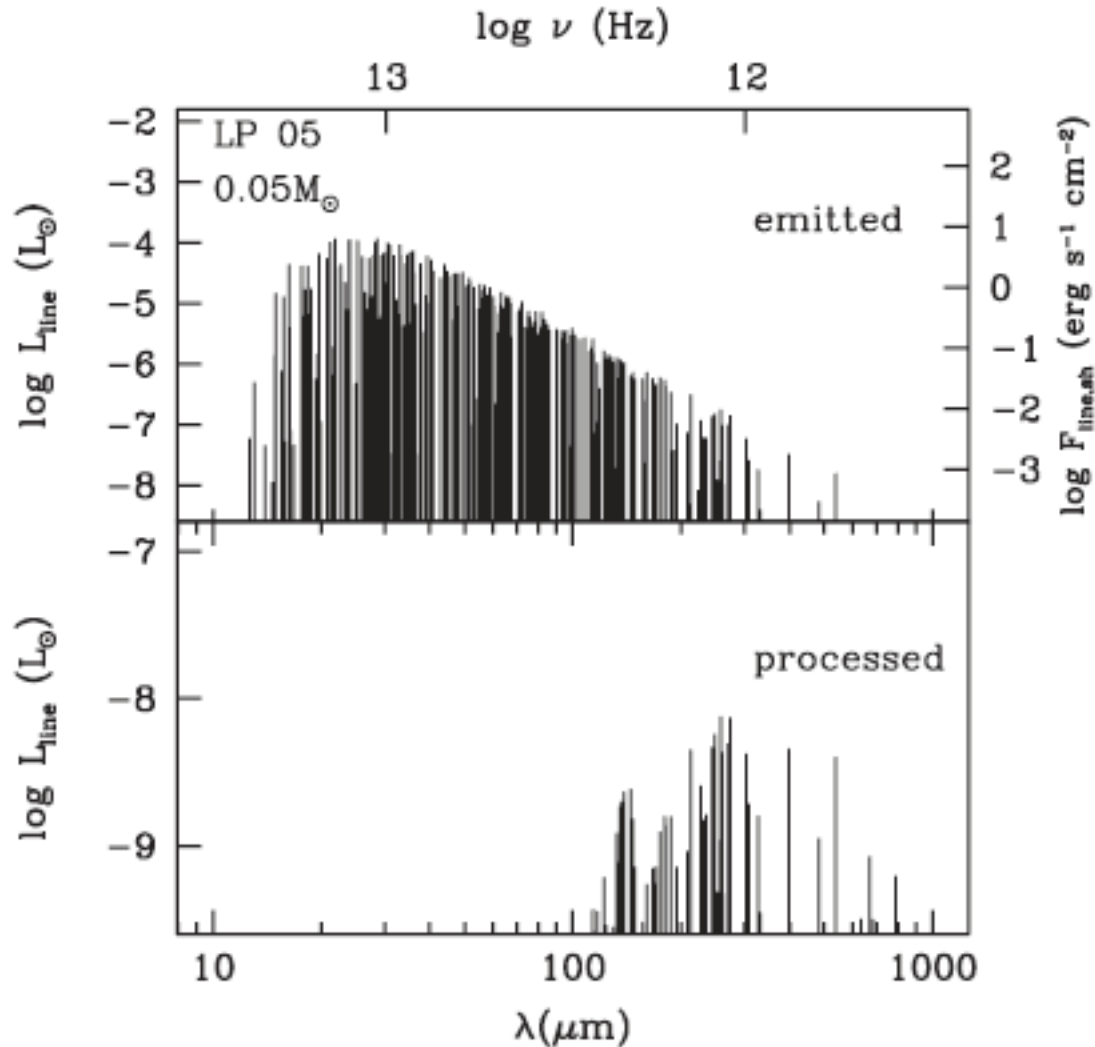
Neufeld et al. 1995, ApJS 100, 132

van Dishoeck et al. astro-ph1012.4570も本質的に同じ

# ファーストコアからのH<sub>2</sub>O回転遷移

## 理論予測(おそらくもっとも完全な計算)

# 復習



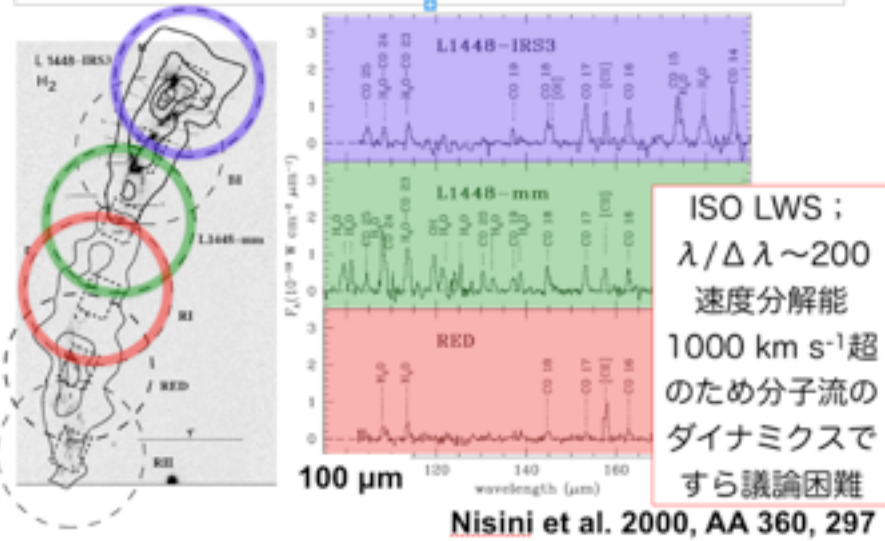
# 復習

Omukai 2007, PASJ 59, 589, see also K. Furuya et al. 2012, ApJ 758, 86

# 復習

遠赤外域のH<sub>2</sub>O回転遷移：

小質量Class 0原始星



Nisini et al. 2000, AA 360, 297

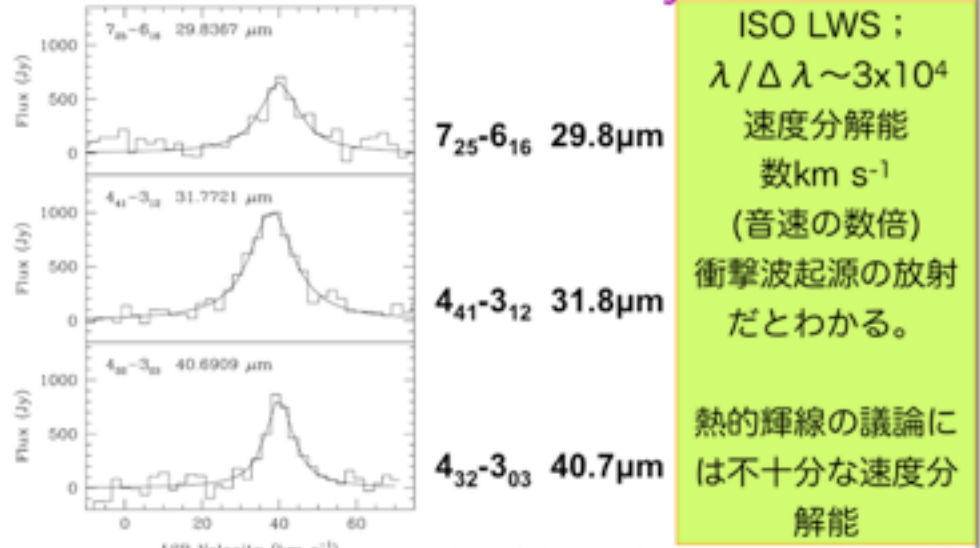
“Highlights from Odin”  
Hjalmarson et al. 2003, A&A 402, L39

上と右パネルの観測の”マッピングへの発展形”が  
たとえば、

Nisi et al. 2010, AA 518, L120, 2013, AA 549, A16

中間赤外域のH<sub>2</sub>O回転遷移：  
酸素過多晩期型星W Hydrae

22



Neufeld et al. 1996, AA 315, L237

# 復習

# 水蒸気分子回転遷移

地上サブミリ波望遠鏡では

1-10<sup>arcsec</sup>の空間分解能と $R \sim 5 \times 10^6$ を超える高波長分解能を誇りつつも大気の熱輻射と大気中の水蒸気に阻まれ主にレーザー遷移の議論に留まっていた。

衛星搭載赤外望遠鏡では

音速の数倍程度の低分散分光で複数の遷移を受信し、モデルを併用し、衝撃波起源の分子ガス流の運動などの研究が主流だった。

Herschel HIFIはこれに風穴をあけ、

星形成の本質である、質量降着に関わる現象を水の熱的輝線で観測できるようになった。

# 水蒸気分子回転遷移

地上サブミリ波望遠鏡では

1-10<sup>arcsec</sup>の空間分解能と $R \sim 5 \times 10^6$ を超える高波長分解能を誇りつつも大気の熱輻射と大気中の水蒸気に阻まれ主にレーザー遷移の議論に留まっていた。

衛星搭載赤外望遠鏡では

音速の数倍程度の低分散分光で複数の遷移を受信し、モデルを併用し、衝撃波起源の分子ガス流の運動などの研究が主流だった。

Herschel HIFIはこれに風穴をあけ、

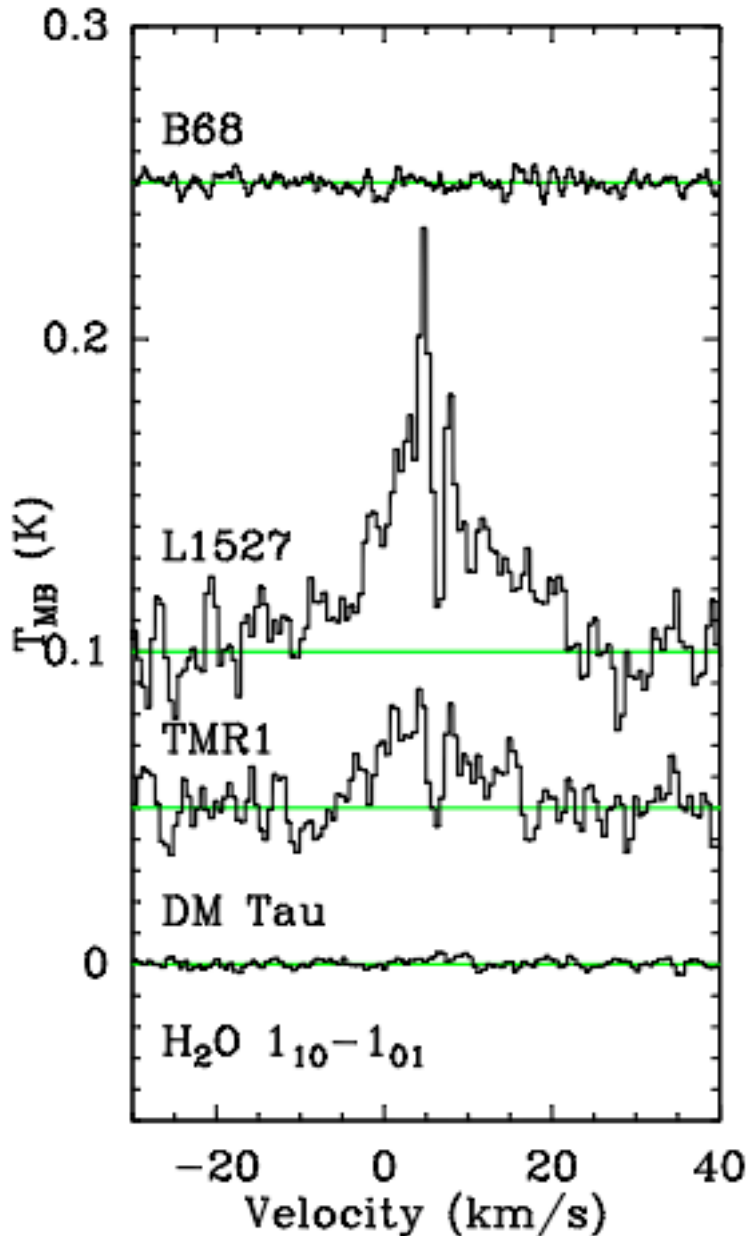
星形成の本質である、質量降着に関わる現象を水の熱的輝線で観測できるようになった。

**私は心穏やかでいられなくなった。**

**そんなとき、みみずくみやたさんに出逢った。**

# “Blueskewed” infall profiles with Herschel HIFI

⇔ Furuya+ 09 (CO, HCO<sup>+</sup>などで)、  
RSF in prep. 0.8 arcsec beamで



星なし分子雲コア

class 0原始星のなかでも若く、  
主たる質量降着期にあるもの

質量降着の最終段階

質量降着が終了した天体

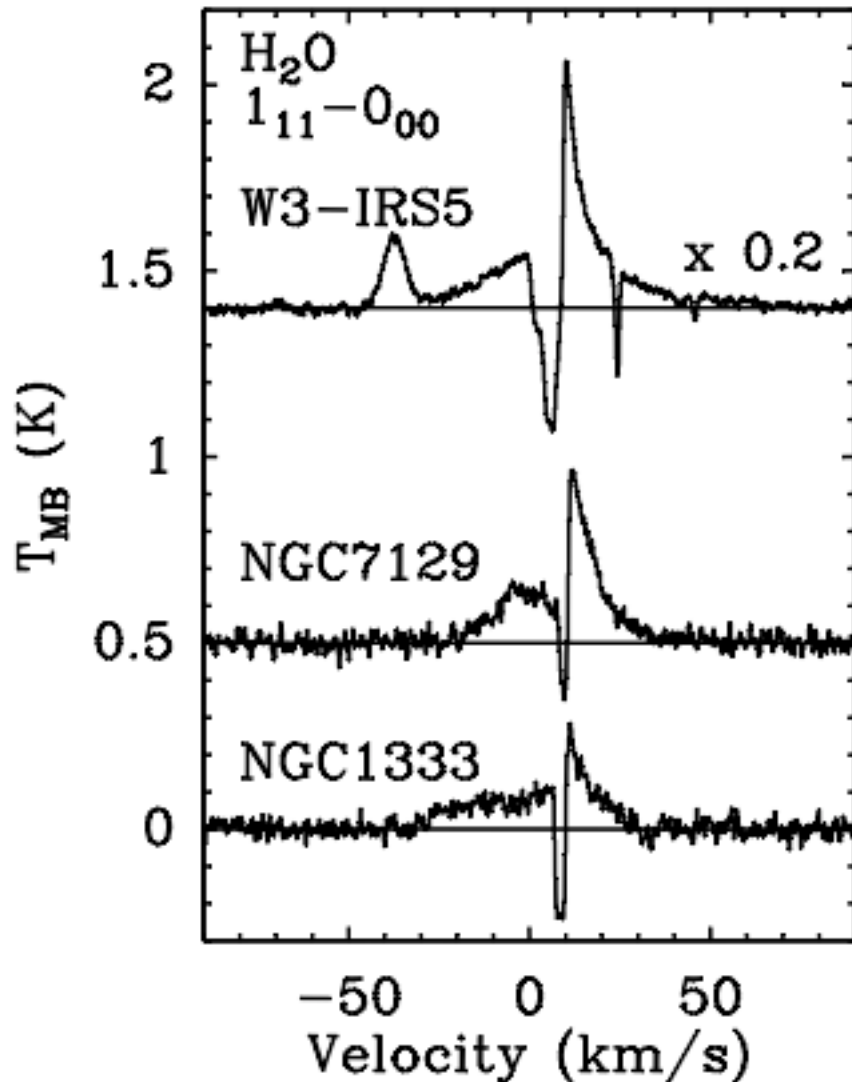
# “Inverse P-Cygni” profiles with Herschel HIFI

⇒ Furuya+11 (COなど、SMAで),  
Beltran 04 (NH<sub>3</sub>, VLAで)

大質量の若い星

注意：大質量(原始)星ではない

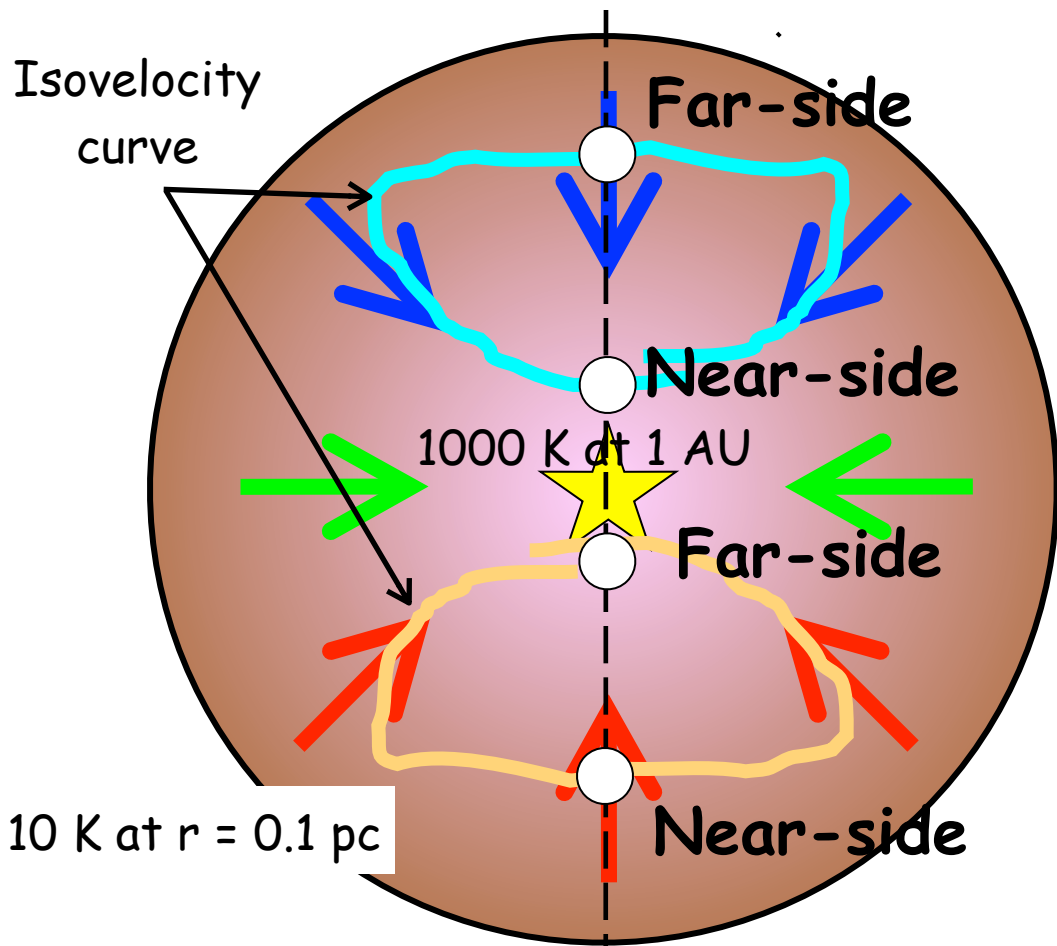
質量降着期のもっとも盛んな時期にあるもの中小質量の原始星





なぜ

blueskewed profile in low-mass  
inverse P-Cygni profile in MYSO  
?



$T_{\text{far-side}} < T_{\text{near-side}}$   
 causes no self-absorption  
 in blueshifted gas

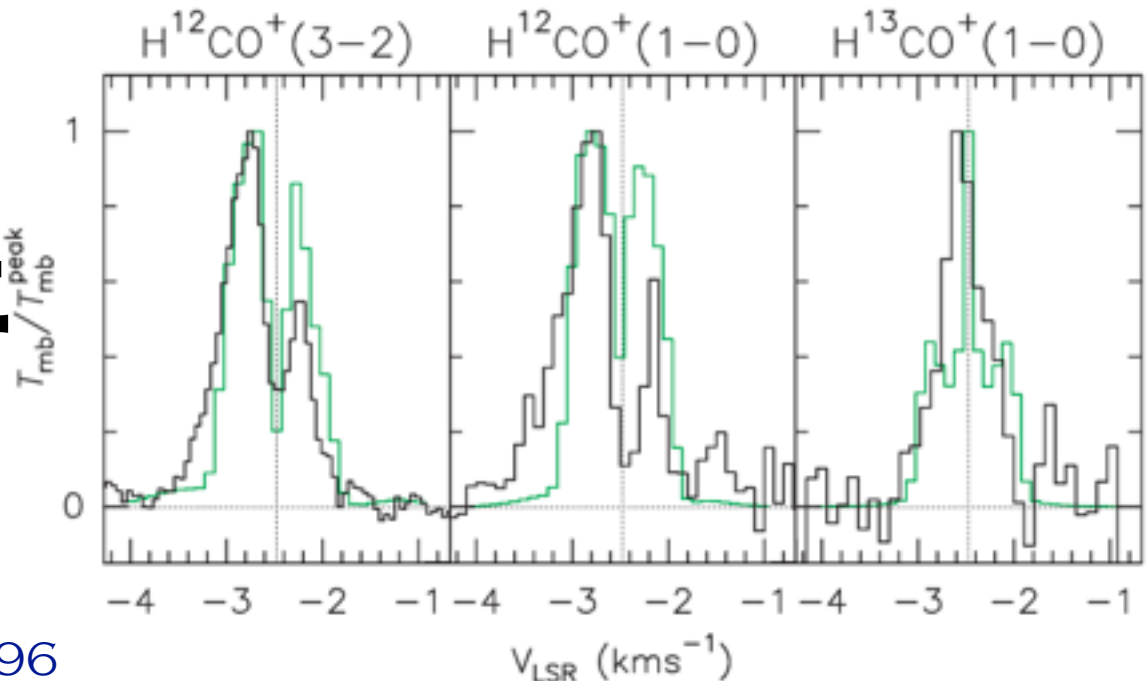
$T_{\text{far-side}} > T_{\text{near-side}}$   
 causes self-absorption  
 in redshifted gas

Asymmetric profile of  
 $T_{\text{blue}} > T_{\text{red}}$  in optically thick  
 line traces infall in a core

# Infall Profiles: Observed vs. Modeled

- Model calculations: adopted density profiles and velocity fields expected for runaway and quasi-static collapses
- The best-fit:  $V_{\text{inf}} = 0.5$  km/s w. Runaway collapse model
- Mass accretion rate  $\sim 2.5e-5 M_{\text{sun}}/\text{yr}$  is derived w. the  $V_{\text{inf}}$  and  $\rho(r)$

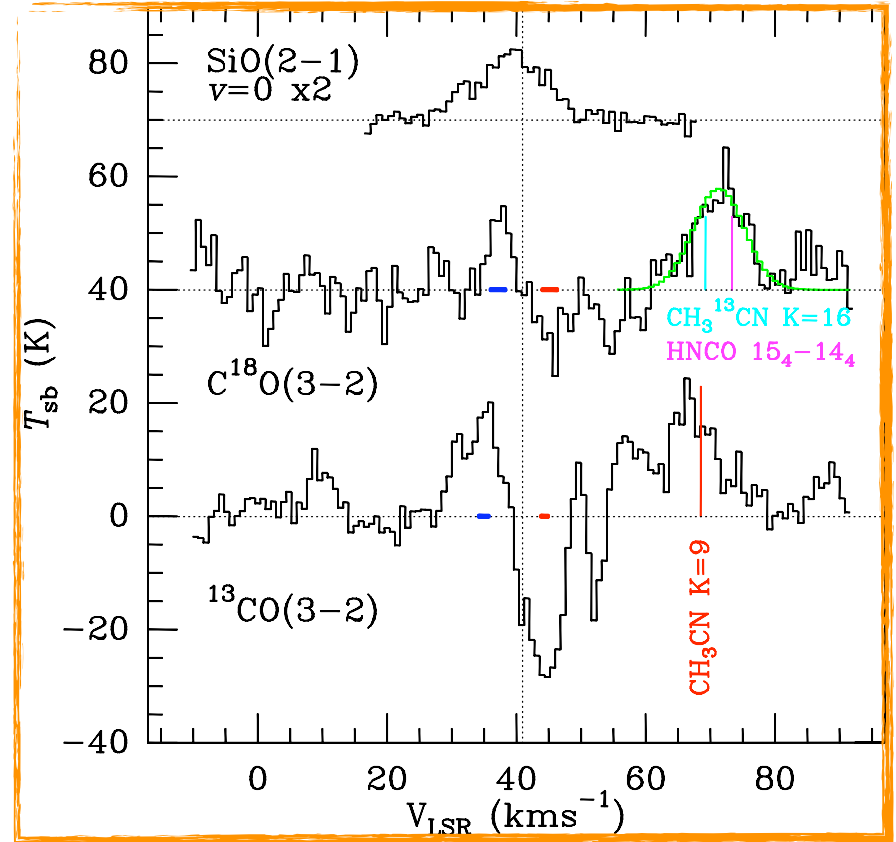
小質量星  
の場合



# Interferometric Spectra towards the Hot Molecular Core

## 大質量星 の場合

$$V_{\text{inf}} \simeq 4 \text{ km s}^{-1}$$



$$\dot{M} = 4\pi m_{\text{H}_2} R N_{\text{H}_2} V_{\text{inf}},$$

We obtained  $\dot{M} > 3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

# まとめ

すばる+みみずく、TAO+みみずくでは  
星形成の本質である、質量降着に関わる現象を  
 $1^{\text{arcsec}}$ を切る空間分解能と $R \sim ? \times 10^?$  (確認する)超える高分散で  
原始星進化のもっとも初期段階を  
ダスト輻射で質量を測り、  
水の熱的輝線から質量降着率を求め、  
両者を総合して"年齢"を見積もることができる可能性がある。

技術的な問題は

「*coadd*できるほど、個々のフレームで充分検出できるか？」

まずは、

*narrow band filters*で**全積分強度図**を取ることから始めるべきであろう。

おまけ

古屋+稲垣(ハワイ観測所)で*python*を用いたパイプラインを作成している。