

第1回
原始惑星系円盤輪講ゼミ

山口正行 20170411

YSO (Young Stellar Object) の分類

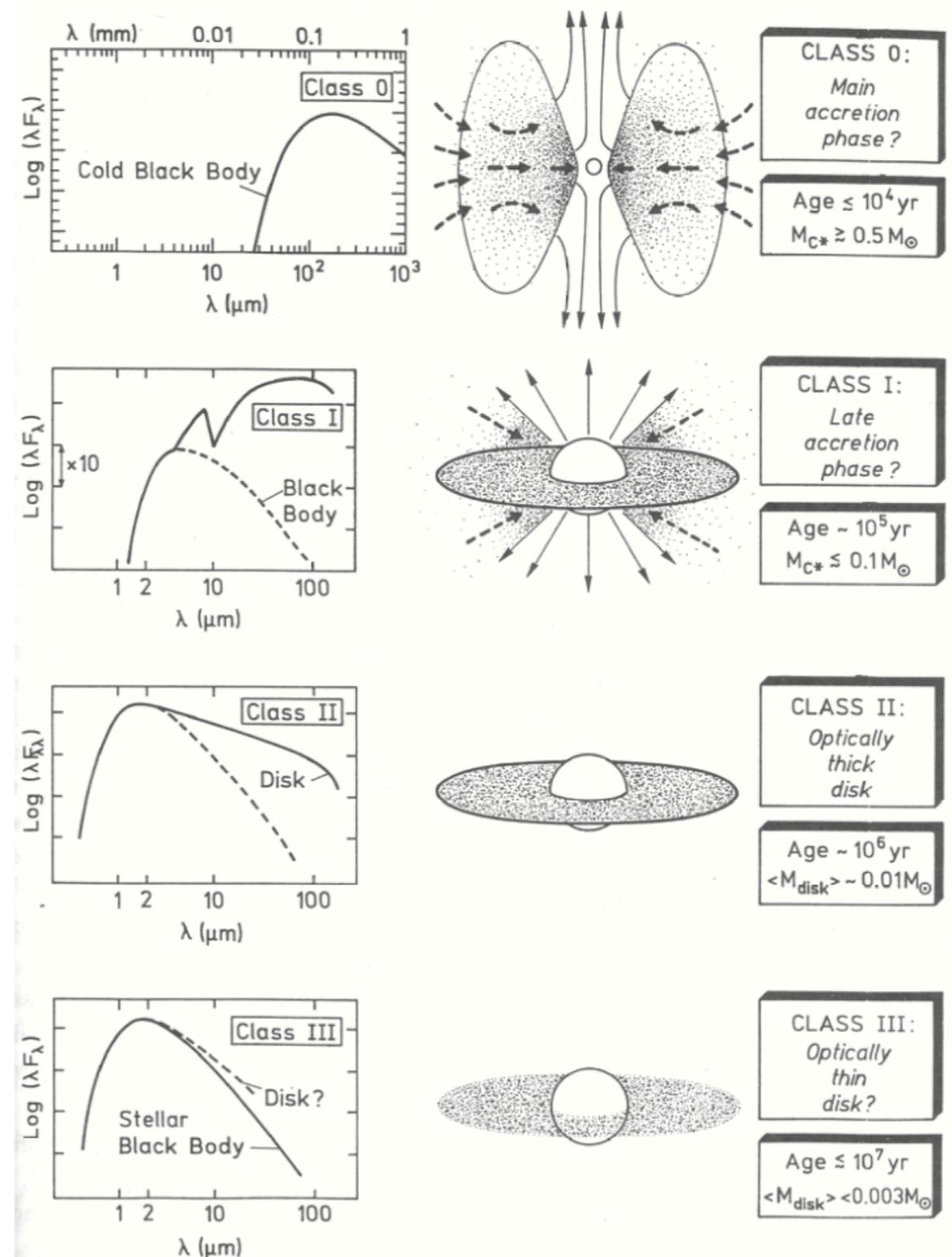
前主系列段階の若い天体(YSO)のスペクトルエネルギー分布 (SED)は主に2つの成分がある。

- 1) 中心星由来の放射: 可視光領域をPeakとする黒体放射のSEDを持つ。
- 2) 円盤由来の放射: 赤外・電波領域に広がったSEDを持つ。

SEDの形状によって、YSOは分類されており、近赤外領域でのSED勾配 α から分類している。

$$\alpha \equiv \frac{d \ln (\lambda F_{\lambda})}{d \ln \lambda}$$

- Class 0 ... $\lambda \leq 10 \mu\text{m}$ の波長でフラックスが観測されない
- Class I ... $\alpha > 0.3$
- Class II ... $0.3 > \alpha > -1.6$
- Class III ... $-1.6 > \alpha$



原始惑星系円盤からの放射

電波・遠赤外線領域：円盤外側領域 $r \sim 100\text{AU}$ の赤道面ダストの熱放射

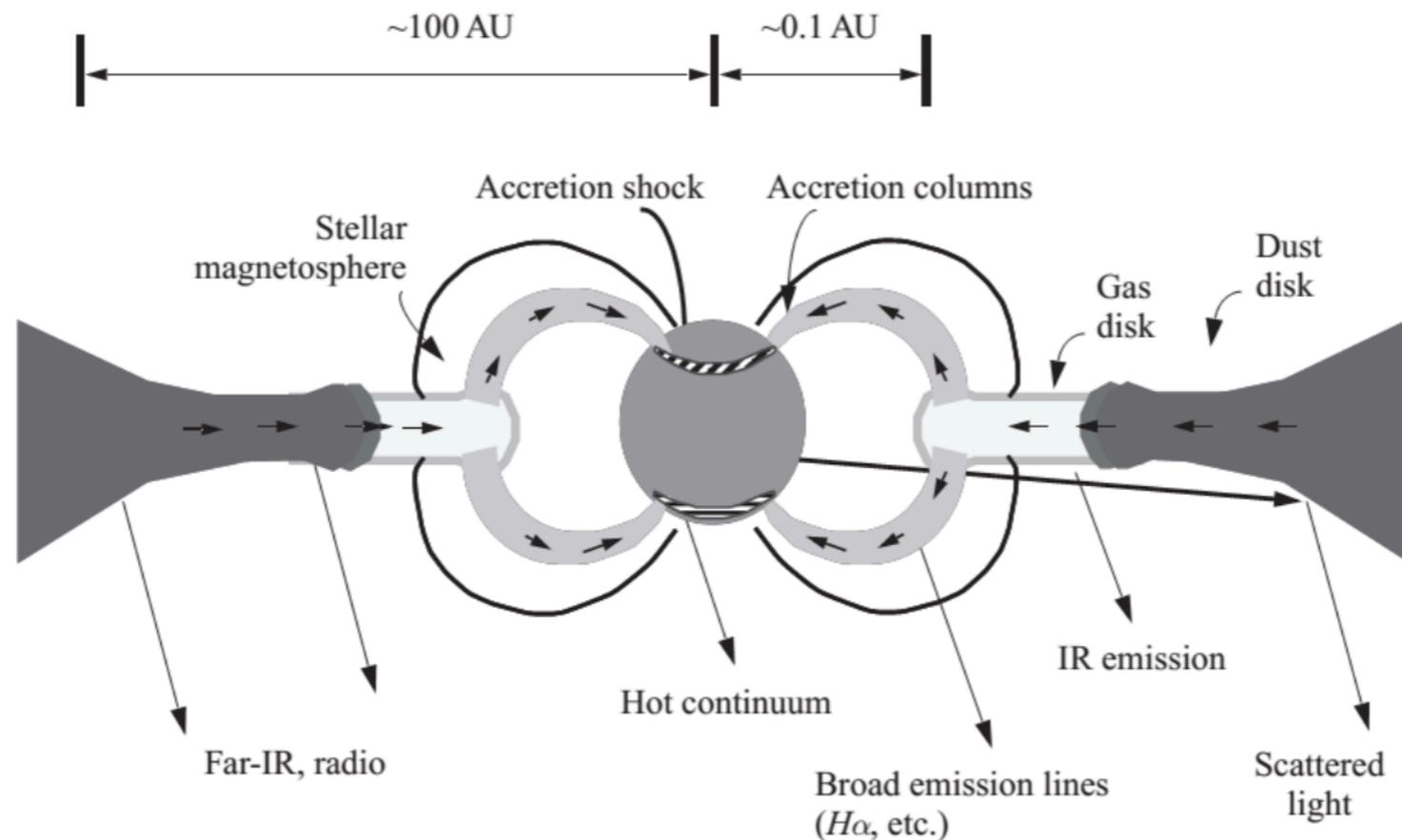
中間赤外線領域：円盤中間領域 $r \sim \text{数}10\text{AU}$ のダストの熱放射

近赤外線領域：中心星近傍の高温領域 $r \sim 1\text{AU}$ からの熱放射と円盤表面の散乱光

可視光領域：中心星の熱放射

紫外線領域：円盤内縁の電離層から中心星への降着によって、高温となった降着物の熱放射。

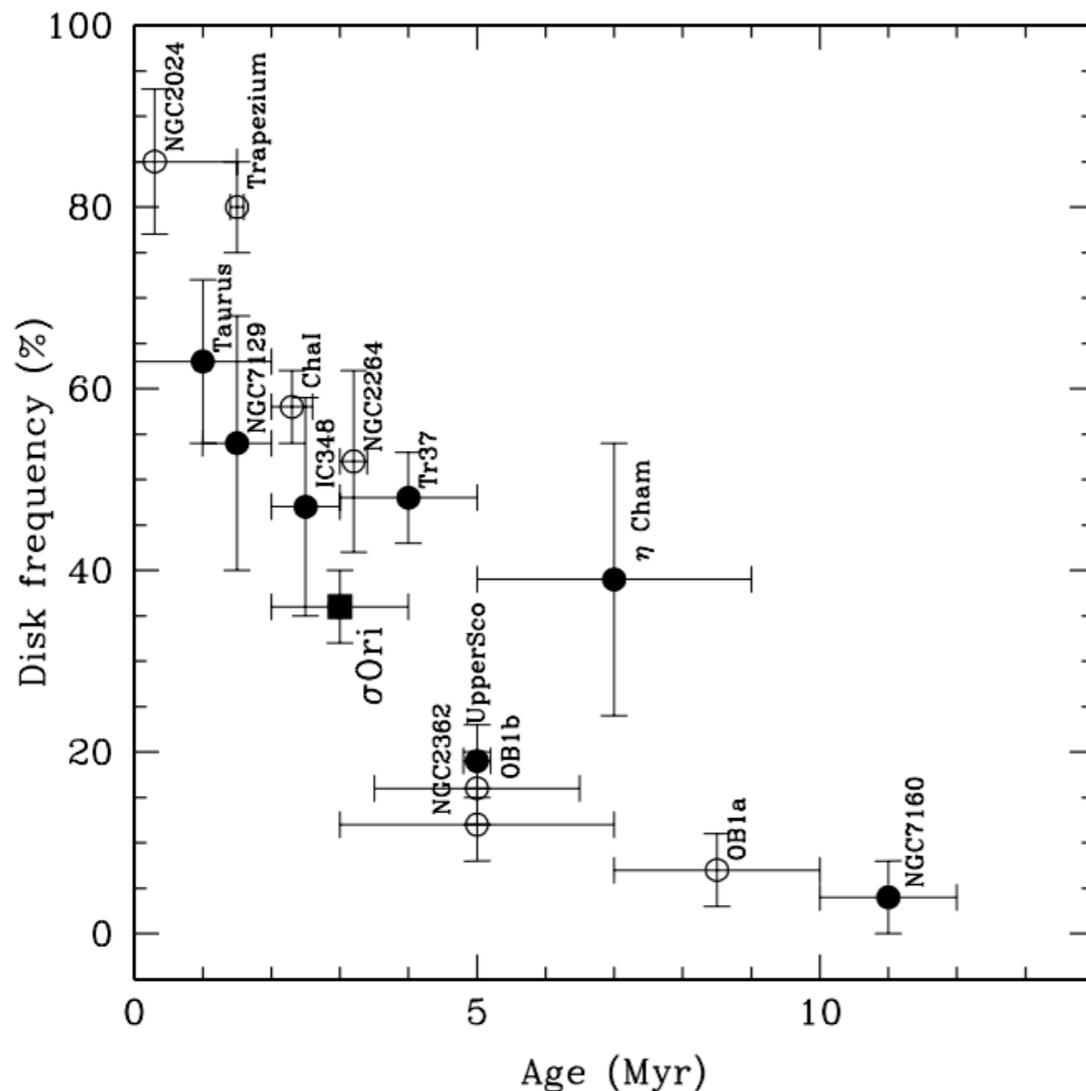
X線領域：中心星内の磁気活動による放射



Hartmann, 1998

赤外線観測による原始惑星系円盤の寿命

- 原始惑星系円盤の寿命は個々の天体だけでなく、観測結果を統計的に扱うことで得られる。
- 円盤を持つTタウリ型星のSEDは赤外超過を示すため、Tタウリ型星のうち赤外超過を観測できる割合を知り、星形成進化のモデルを用いることで原始惑星系円盤の寿命を統計的に知ることが出来る。



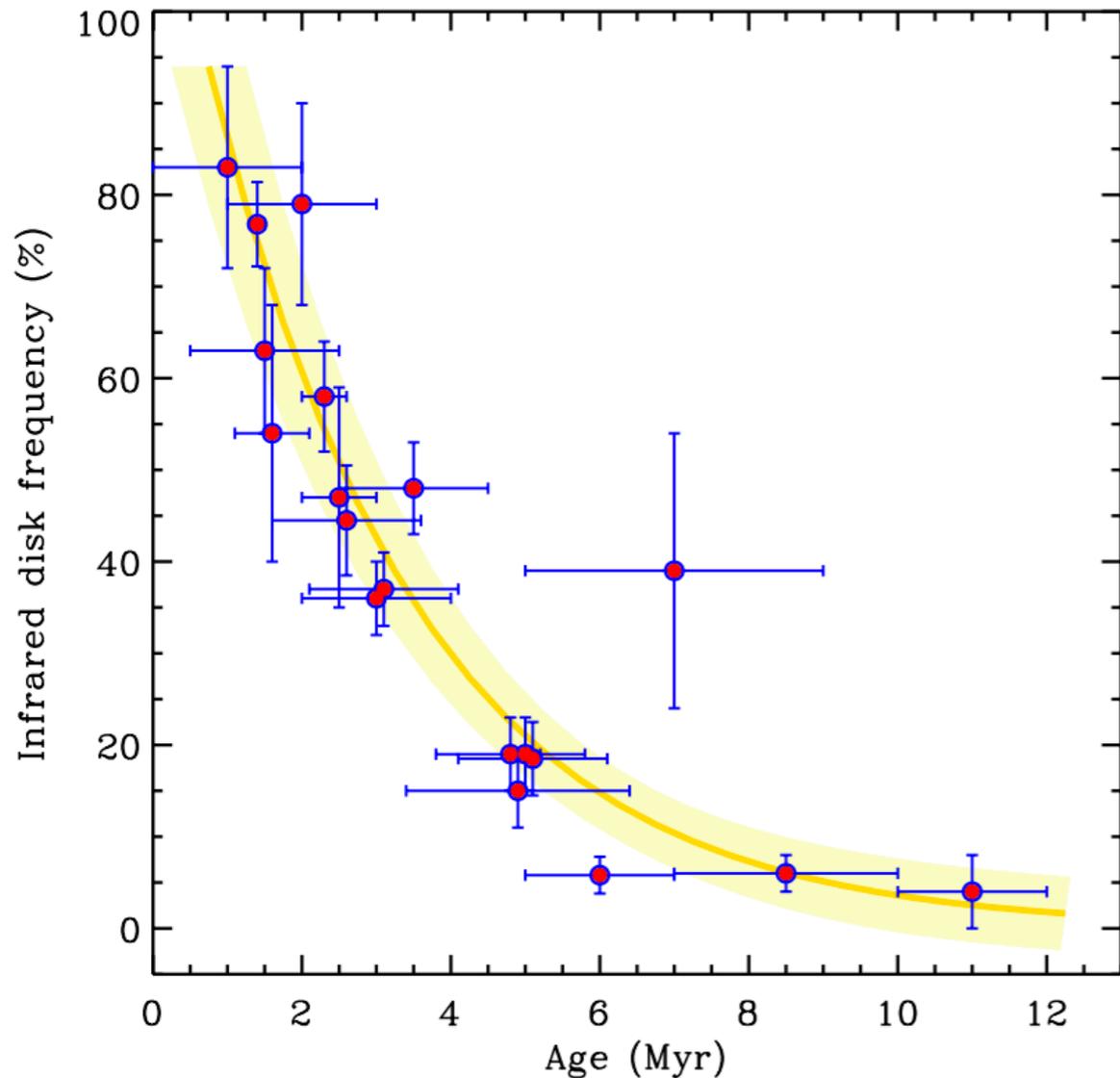
- Spitzer宇宙望遠鏡による赤外線観測 (8-24 μ m)
- 若い星団の低質量星(K,M type)ターゲット
- 観測波長 λ が円盤ダストの大きさ a に相当すると仮定して、Wien則に従えば、ダスト温度 $T \sim 3000\text{K} / \lambda(\mu\text{m})$ となる。
- > 中心星付近(a few AU)における円盤表面ダストからの赤外放射を見ている。
- 円盤の存在割合(%) = $100 * (\text{赤外超過ありの恒星数}) / (\text{星団内の恒星数})$

Hernandez et al. 2007, ApJ

<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/513735/pdf>

赤外線観測による原始惑星系円盤の寿命

- 原始惑星系円盤の寿命は個々の天体だけでなく、観測結果を統計的に扱うことで得られる。
- 円盤を持つTタウリ型星のSEDは赤外超過を示すため、Tタウリ型星のうち赤外超過を観測できる割合を知り、星形成進化のモデルを用いることで原始惑星系円盤の寿命を統計的に知ることが出来る。



最小二乗法でfittingした結果

- 星年齢1Myr未満の円盤の存在割合は90%を超える。
- 星年齢2Myrで円盤の存在割合は50%に落ち込む。
- 星年齢5Myr以上の円盤の存在割合は5%未満となる。

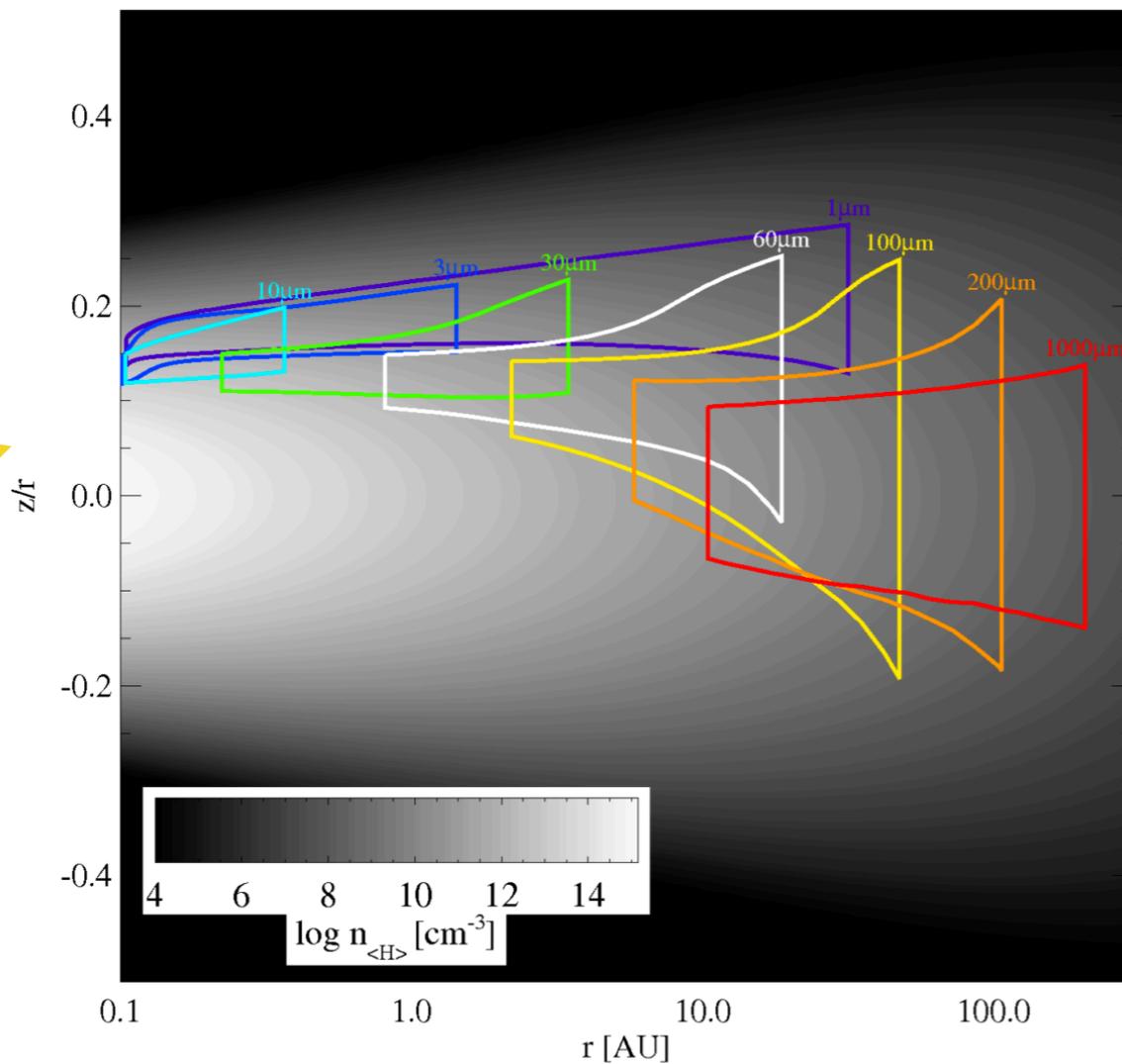
Williams 2012,

<https://arxiv.org/abs/1205.2461>

ダスト放射の波長領域

光学的厚みがある($\tau \gg 1$) MMSN (Minimum Mass Solar Nebula) の原始惑星系円盤を異なる波長領域で観測した時に
見ている円盤構造の範囲をモデル化

$M=0.01 M_{\odot}$, $R=100\text{AU}$, $\text{gas/dust}=100$



- 赤外線観測 (8-24 μm): ~AU領域の円盤表面のダスト放射
- 遠赤外線観測 (50- 300 μm): ~1-30AUの領域
- ミリ波観測(300 μm -3mm): 光学的に薄い領域($\tau < 1$)のダスト放射

Dust Opacity

$$K(\lambda) = 10(\lambda/300\mu\text{m})^{-\beta} [\text{cm}^2\text{g}^{-1}] \text{ where } \beta=1-2$$

(Beckwin et al. 1990)

ミリ波観測: $\lambda=1\text{mm}$ では

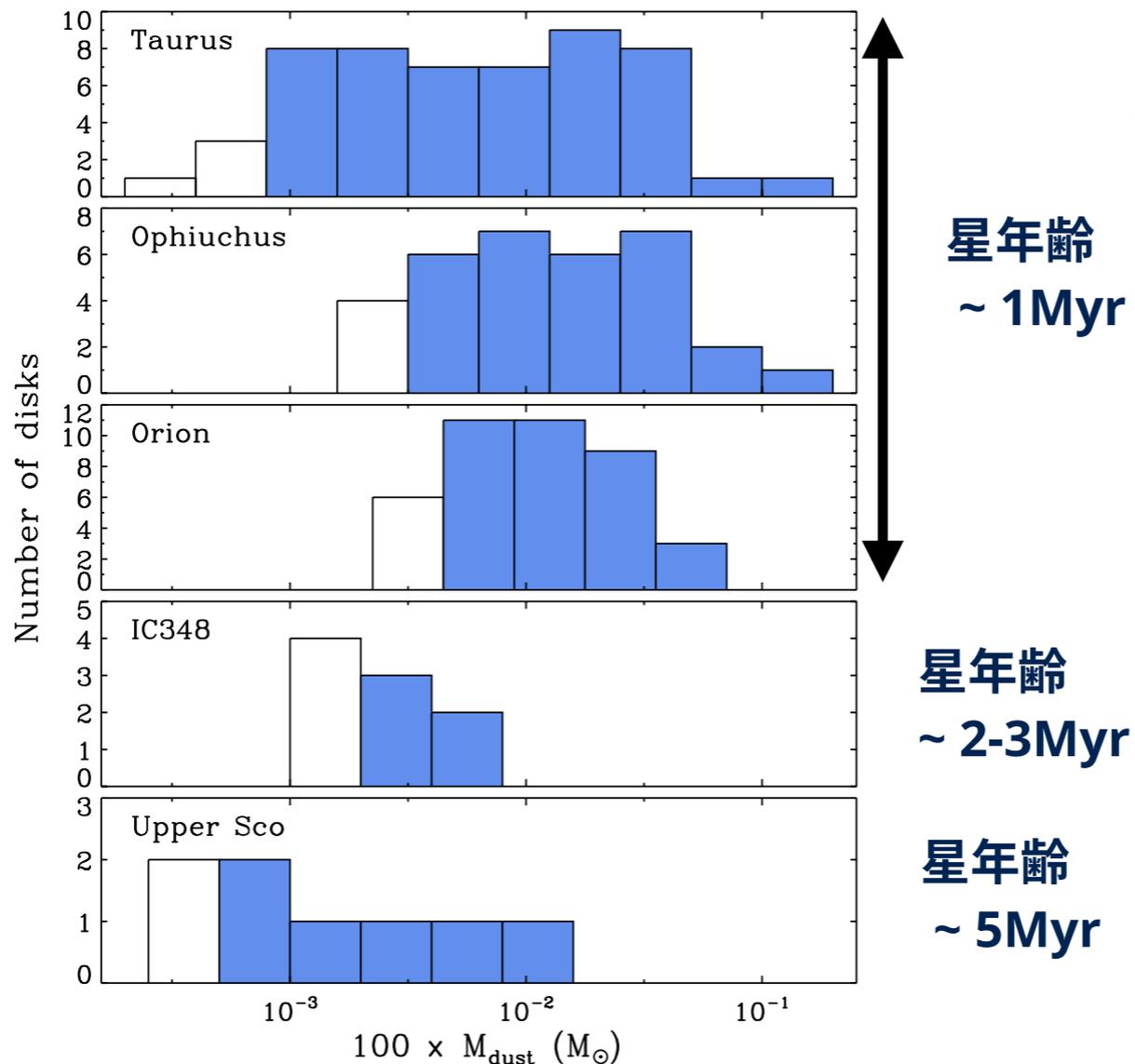
左図より、 $R \gg 10\text{AU}$ かつ $\Sigma_{\text{dust}} \ll 1 \text{ g cm}^{-2}$ なので
光学的厚み: $\tau = K \Sigma < 1$ となる。

Williams 2012,

<https://arxiv.org/abs/1205.2461>

ミリ波観測による円盤の存在割合

ミリ波観測では、円盤内のダストの量を見積もることができる。



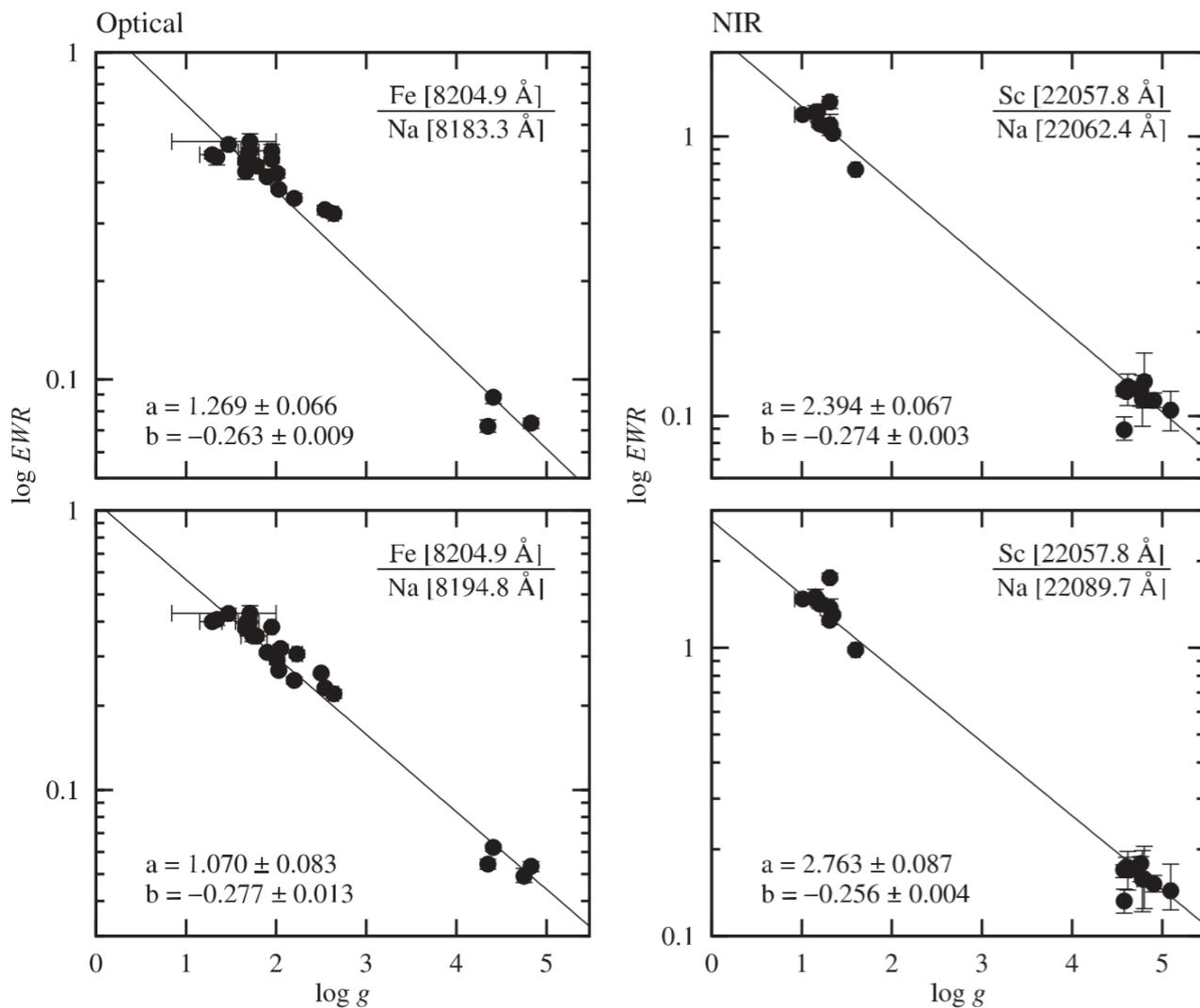
円盤の進化に伴い、ミリ波観測で推定されるダストの量は減少する。赤外線観測も同様の傾向を示す。

ミリ波観測による円盤質量が数Myrで減少する原因

- 1) 円盤内のダスト集積により、ダストが成長する。
→ mmサイズからcmサイズへ
- 2) (観測波長: λ) = (円盤ダストの大きさ: a) ならば円盤質量が減少する原因は、ミリ波では観測できないcmサイズ以上のダストに成長していると考えられる。

表面重力を用いた前主系列星の年齢推定方法

同じ星団内の星にも年齢のばらつきがある。そこで Takagi et al.2014 は、表面重力を用いた円盤年齢の推定方法を導入することで、近傍の星形成領域であるおうし座分子雲に属する前主系列星10天体の年齢を決め、この領域での円盤進化のタイムスケールを導いた。



主系列星に属する星から導出された“等価幅比(EWR)と表面重力(g)の関係図”

Step 1. 主系列星に属する星の表面重力を導出する。

表面重力 g [cm / s^2] の関係式 (Takagi et al. 2010)

$$\log g = \log \frac{M}{M_{\odot}} + 4 \log \frac{T}{T_{\odot}} - \log \frac{L}{L_{\odot}} + \log g_{\odot},$$

※ M, T, L は, それぞれ Landolt. 2000, Lang.1992, SIMBAD から算出。

Step 2. 左図より、Power-law fitting から係数 a, b を導出する。

$$EWR = ag^b,$$

Step 3. Step2の a, b を用いて前主系列星の表面重力 g を算出する。

$$\log g = \frac{\log EWR - \log a}{b}.$$

表面重力を用いた前主系列星の年齢推定方法

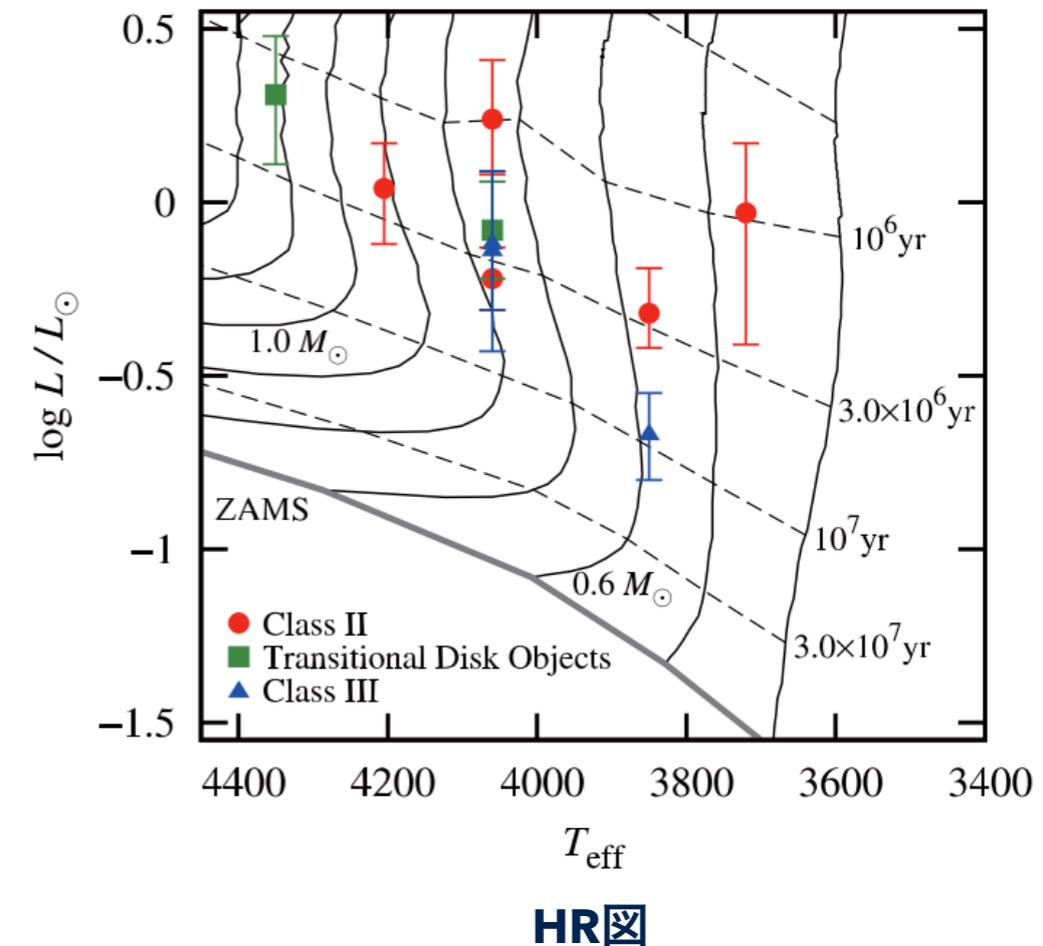
Step 4. 前主系列星の年齢推定

前主系列星の年齢は、前主系列星の表面重力 g (Step3)と有効温度 T を用いて算出する (Siess et al. 2000)

下図は、その結果を示す。

Star	Type*	Sp. type [†]	$T_{\text{eff}}^{\ddagger}$ (K)	Method [§]	$\log g$	$M_{\text{star}}^{\parallel}$ (M_{\odot})	Age (Myr)	$\log L_{\text{star}}/L_{\odot}$
CY Tau	II	K7 ^a	4060	NIR	4.00 ^{+0.11} _{-0.10}	0.78 ^{+0.02} _{-0.02}	3.64 ^{+1.49} _{-0.98}	-0.22 ^{+0.09} _{-0.09}
DL Tau	II	K7 ^a	4060	Optical	3.51 ^{+0.17} _{-0.17}	0.74 ^{+0.01} _{-0.00}	0.97 ^{+0.48} _{-0.27}	0.24 ^{+0.17} _{-0.16}
DN Tau	II	M0 ^a	3850	NIR	3.87 ^{+0.11} _{-0.13}	0.57 ^{+0.01} _{-0.00}	2.59 ^{+1.07} _{-0.83}	-0.32 ^{+0.13} _{-0.10}
GI Tau	II	K6 ^a	4205	Optical	3.87 ^{+0.17} _{-0.15}	0.92 ^{+0.02} _{-0.02}	2.25 ^{+1.64} _{-0.82}	0.04 ^{+0.13} _{-0.16}
IQ Tau	II	M1 ^a	3720	NIR	3.43 ^{+0.40} _{-0.20}	0.47 ^{+0.01} _{-0.00}	0.96 ^{+1.52} _{-0.26}	-0.03 ^{+0.20} _{-0.38}
LkCa 15	TD	K5 ^a	4350	Optical	3.74 ^{+0.20} _{-0.17}	1.11 ^{+0.01} _{-0.00}	1.43 ^{+1.24} _{-0.54}	0.31 ^{+0.17} _{-0.20}
V819 Tau	TD	K7 ^a	4060	Optical	3.85 ^{+0.15} _{-0.15}	0.76 ^{+0.02} _{-0.01}	2.30 ^{+1.34} _{-0.78}	-0.08 ^{+0.14} _{-0.14}
HBC 374	III	K7 ^a	4060	Optical	3.89 ^{+0.22} _{-0.23}	0.76 ^{+0.04} _{-0.02}	2.58 ^{+2.55} _{-1.18}	-0.12 ^{+0.21} _{-0.19}
LkCa 14	III	M0 ^b	3850	NIR	4.26 ^{+0.13} _{-0.14}	0.59 ^{+0.00} _{-0.01}	8.90 ^{+5.01} _{-3.24}	-0.67 ^{+0.12} _{-0.13}
V827 Tau	III	K7 ^a	4060	Optical	3.91 ^{+0.33} _{-0.25}	0.77 ^{+0.04} _{-0.03}	2.73 ^{+5.31} _{-1.33}	-0.14 ^{+0.23} _{-0.29}

*Object classification. II, TD, and III indicate Class II, transitional disk object, and Class III, respectively. Values are from Kenyon and Hartmann (1995) and Furlan et al. (2006).
[†]Spectral types quoted from (a) Furlan et al. (2006) and (b) Kenyon and Hartmann (1995).
[‡]Effective temperatures were determined from the Sp. type- T_{eff} relation listed in Kenyon and Hartmann (1995).
[§]The Fe/Na ratio in the optical I -band and the Sc/Na ratio in the near-infrared K -band were used to estimate surface gravity.
^{||}Approximate masses were estimated by comparing the T_{eff} and the evolutionary tracks of Siess, Dufour, and Forestini (2000).

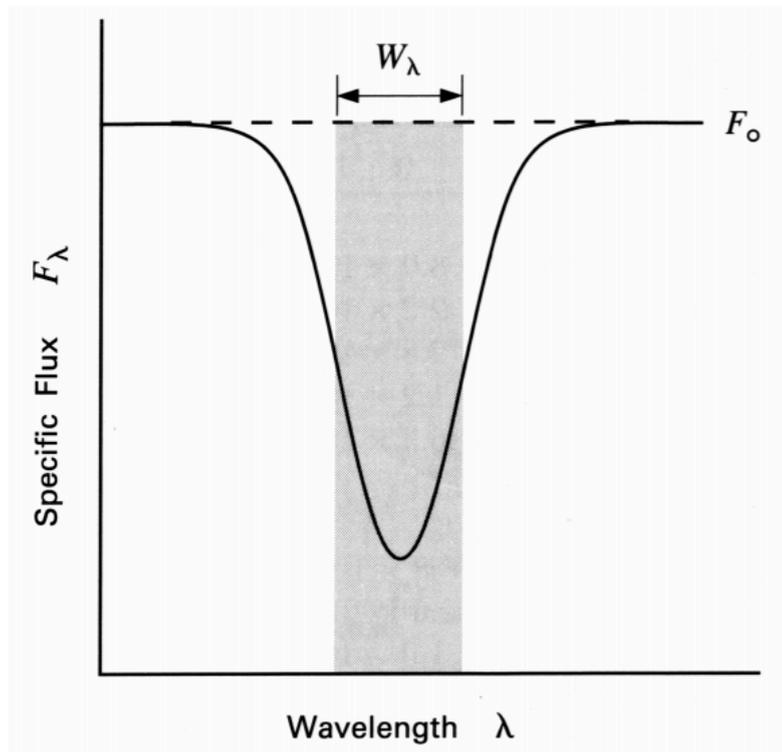


結果：近傍の星形成領域であるおうし座分子雲に属する前主系列星10天体の年齢

- Class IIと遷移円盤(TD)の年齢は 1.4 ± 0.5 Myr
- Class IIIの年齢は 3.5 ± 1.6 Myr

表面重力を用いた前主系列星の年齢の推定方法

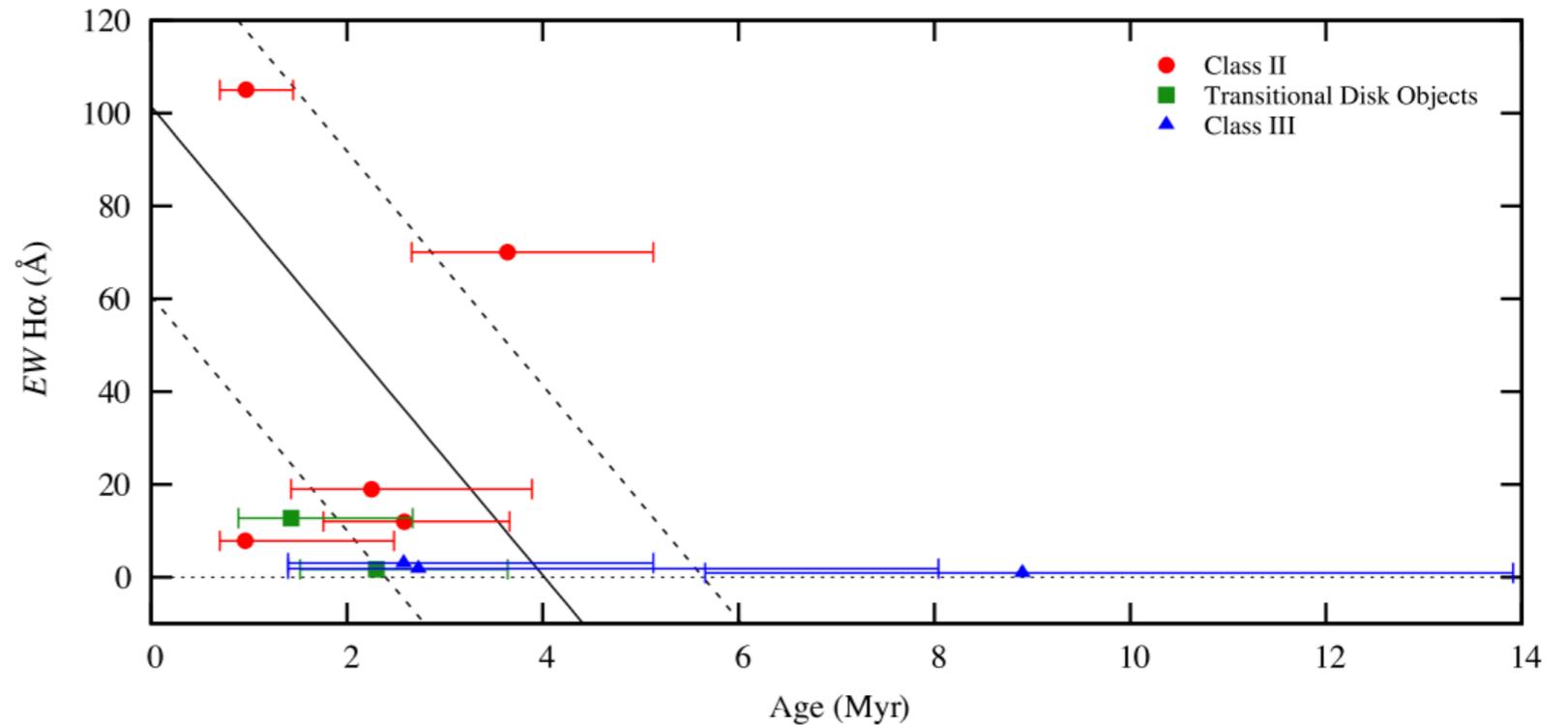
H α 輝線による円盤散逸のタイムスケールは 4.0 ± 1.6 Myr となる。



等価幅の概念図 (Stahler & Palla 2004)

等価幅

$$W_\lambda \equiv \int \frac{F_0 - F_\lambda}{F_0} d\lambda$$



H α 輝線と前主系列星年齢の関係図

Solid line: 直線回帰, dash line: 直線回帰の誤差 1σ