

中・低質量星の円盤における 構造の時間変動

深川美里(大阪大学)

内容

1. 導入

- 可視、赤外線で、円盤のどこを見るか？
- 変光星の分類: ○○型変光星
- 可視光での変光観測の今後

2. 赤外線波長での変光観測

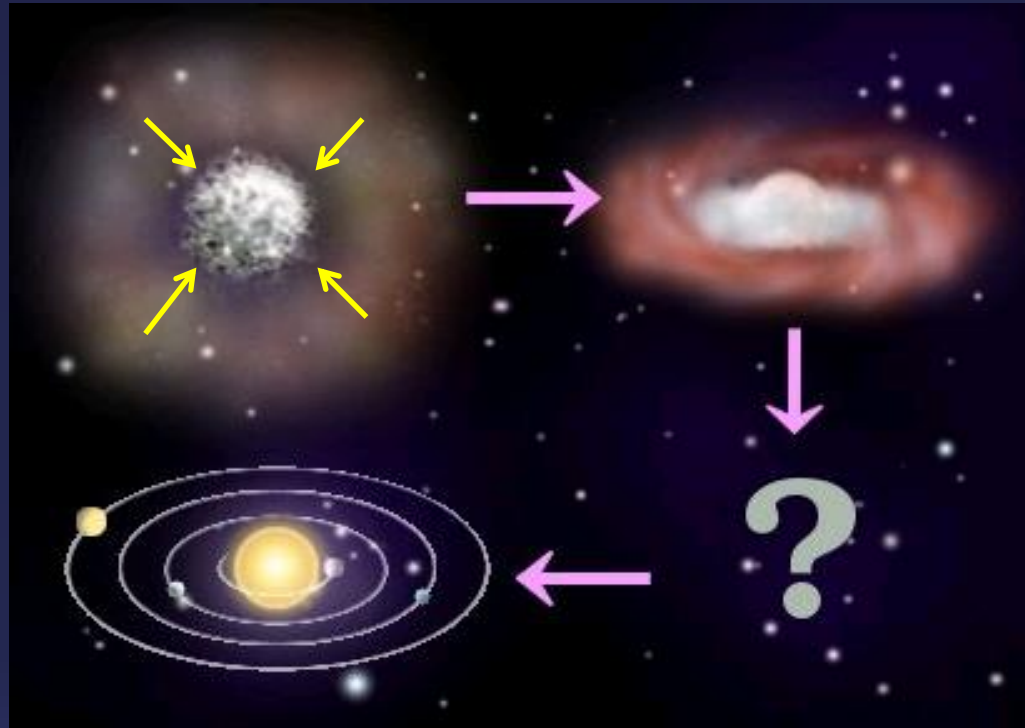
- 測光モニタ
- ダストの変性
- シリケートフィーチャーの変動
- Transitional disk の赤外変光

3. 多角的なアプローチ

- 別の観測手法

4. 電波観測

星形成の副産物：円盤



- 分子雲の重力収縮で星が誕生
- 角運動量保存→星形成の過程で必然的に生じる構造
- ケプラー回転(差動回転)
- 星は円盤からの質量供給で成長(粘性)

へびつかい座
星形成領域



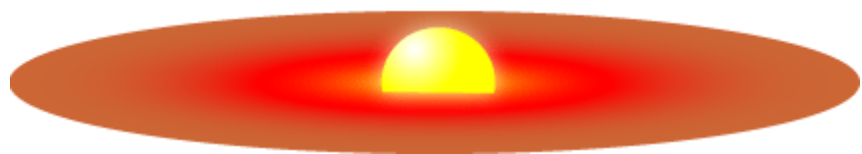
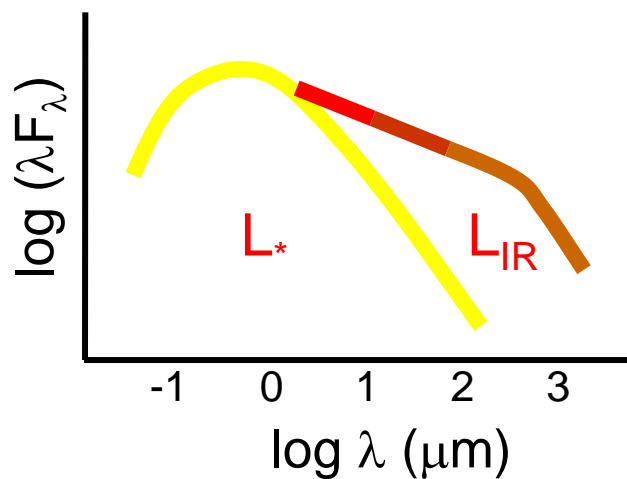
Star Formation in the Rho Ophiuchi Cloud

Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS

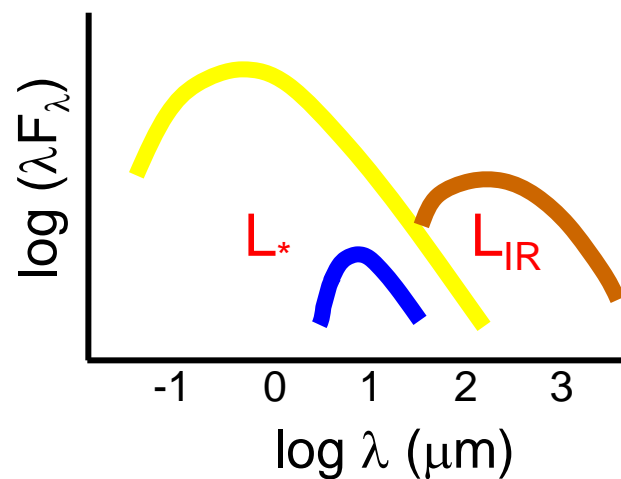
NASA / JPL-Caltech / L. Allen (Harvard-Smithsonian CfA) & D. Padgett (SSC-Caltech)

ssc2008-03a

円盤存在の指標：赤外超過

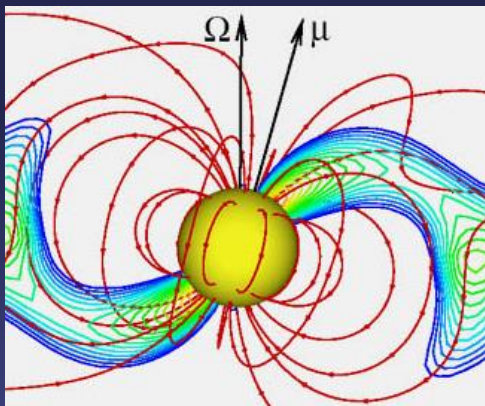


high \rightarrow T low

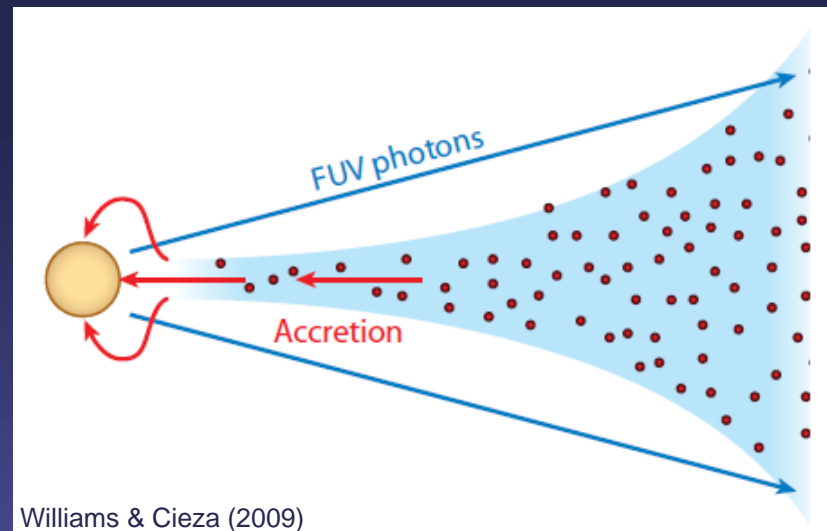


円盤を持つ天体の変光観測

- 可視光
 - 星表層の温度変化: 黒点、降着によるホットスポット
 - 円盤ダストによる減光
 - ガス (accretion, wind/outflow) (分光)
- 赤外線
 - 円盤からの赤外超過、ダストフィーチャー、ガス



Romanova et al.



Williams & Cieza (2009)

円盤を真横から見た図

〇〇型変光

- **FU Ori型** (Herbig 1977, many papers by L. Hartmann)

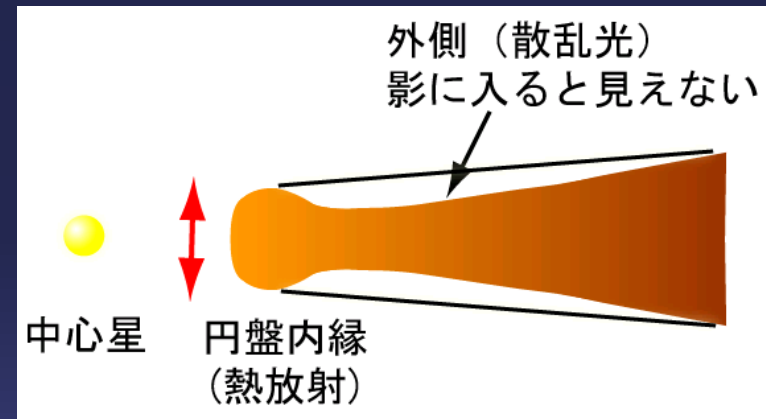
Luminosity 自体の変化

- 降着率の増大によるアウトバースト
- EX Ori型: FU Ori 型より小規模

- **UX Ori型** (Grinin et al. 1991)

掩蔽 (波長に応じて、減光 or 増光)

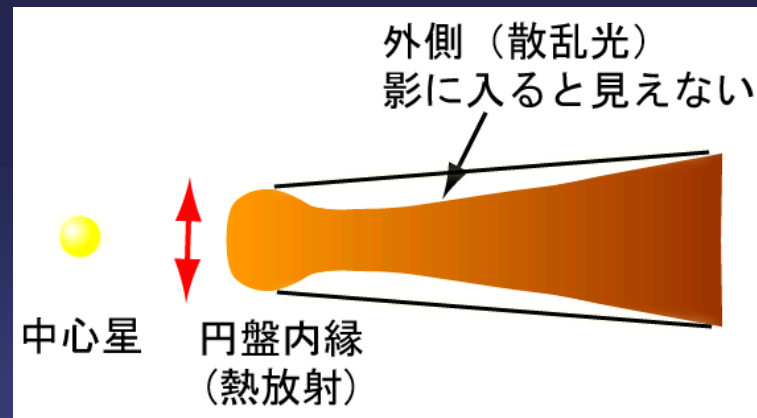
- 構造 and/or ダスト密度が不均一な円盤による掩蔽
- 変光振幅が大きい。最も暗い時に、偏光度が上がる、色が青化に転じる、といった特徴を持つ
- 円盤の inclination 大



仮説: variable shadowing
(e.g., Juhász et al. 2007)

観測量

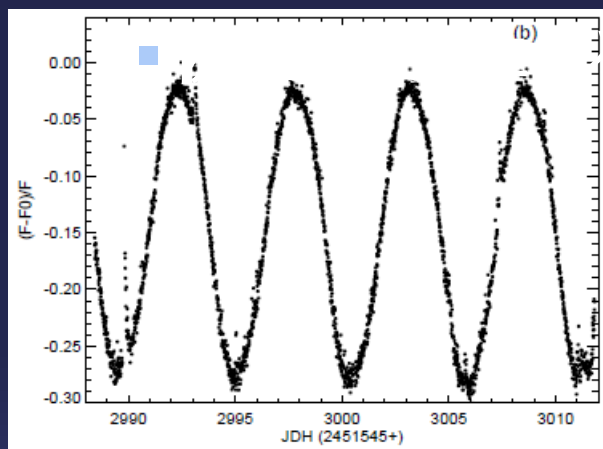
- 変光の振幅
- 変光の周期性(有無)、周期(ケプラー回転、不安定性...)
- 波長依存性
- 多角的な観測(円盤の複数の領域を同時に見る)



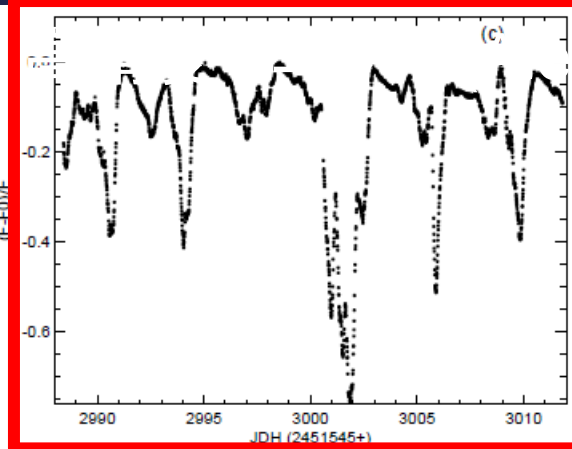
仮説: variable shadowing
(e.g., Juhász et al. 2007)

可視モニタの今後

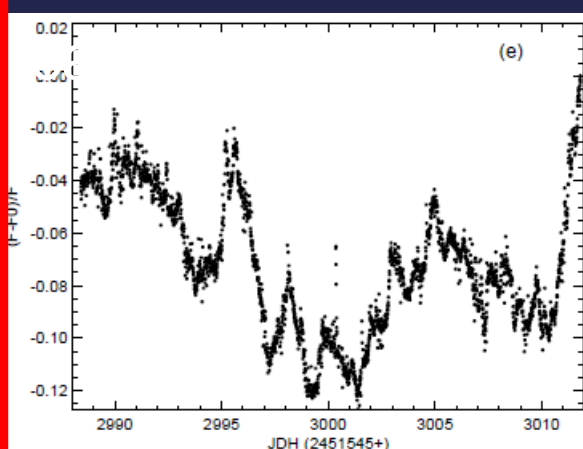
- 可視では大変盛ん。変光は Tタウ型星の定義の一つ。
(Herbst et al. 1994, AJ, 108, 1906)
- 長周期 (>10年) 変動
- 高精度



Periodic
(Spots)



Quasi-periodic
(Obscuration)



Irregular
(+Accretion)

AA Tau型変光

近赤外超過を持つ天体の30~40%に見られる

赤外線波長での変光観測

赤外線での変光観測

- 90年代
 - IRAS 12, 25 μm (Prusti & Mitsukevich 1994)
 - ISO
 - 地上8~13 μm 帯 (Liu et al. 1996)

“simultaneous multiwavelength observations are needed for a proper analysis of SED”
- 2009年前ぐらいから流行り出す？
 - Spitzer, 特に warm mission
 - 赤外超過、つまり円盤自身を調べられる。可視と組み合わせることで、星表層の温度変化との切り分けが可能。
 - Muzerolle et al. (2009), Espaillat et al. (2011), ...

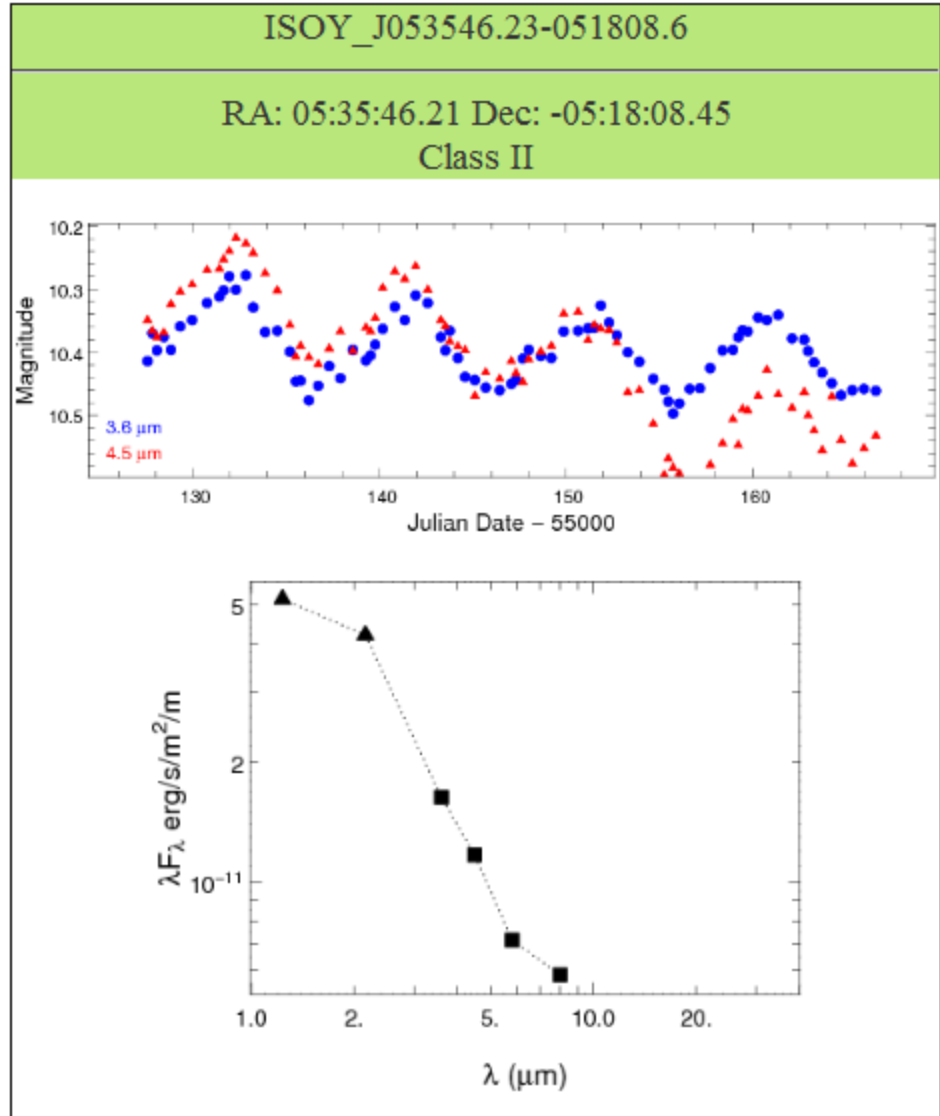
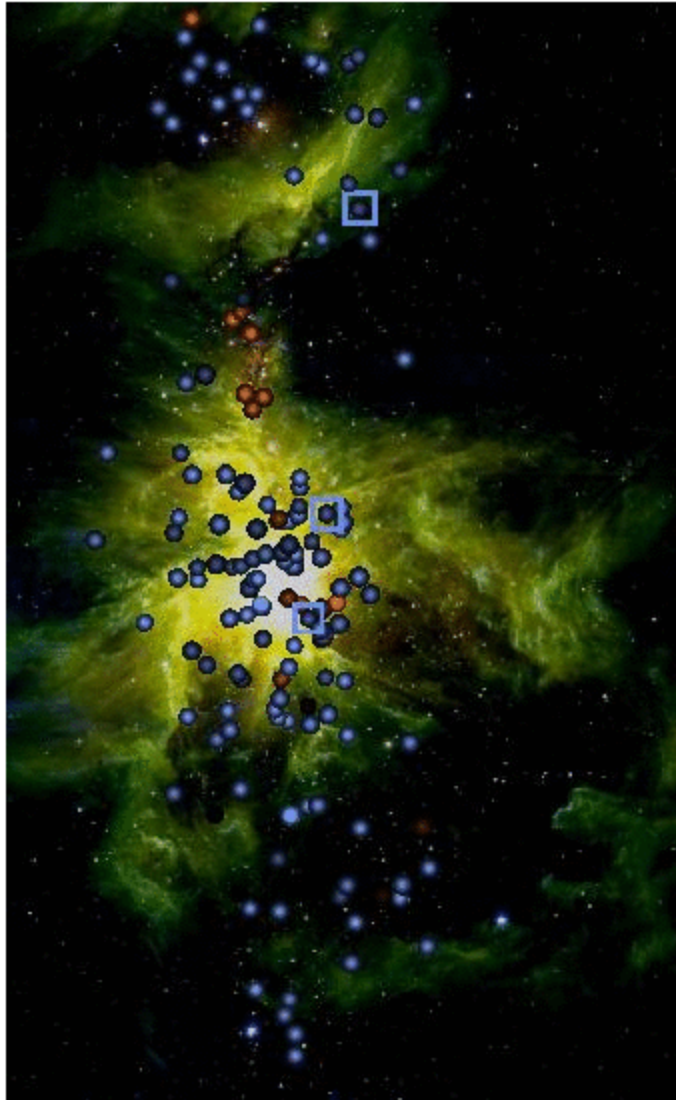
(1) 3~5ミクロン帯での測光モニタ

- YSOVAR – Spitzer warm mission, 3.6 & 4.5 micron
- オリオン+11個のクラスタ
- 2009年秋にオリオンを集中的に観測 (40日間、81 epochs)
- 約2000個、測光精度~3%
- Initial results reported by Morales-Calderon et al. (2011)

	Class I	Class II	Class III
# sources	126	1123	820
IRAC Variables	106	787	366
Variables w/ [3.6] amp. >0.2 mag	71	465	92
Variables w/ [3.6] amp. >0.5 mag	15	59	8
Variables w/ [3.6] amp. >1 mag	3	1	0
[3.6] – [4.5] Color Variables w/ amp. >0.2 mag	3	5	0
Prev. known Periods	8	266	334
Recovered Periods	5	125	189
New Periods	8	76	98
# AA Tau analogs	1	37	3

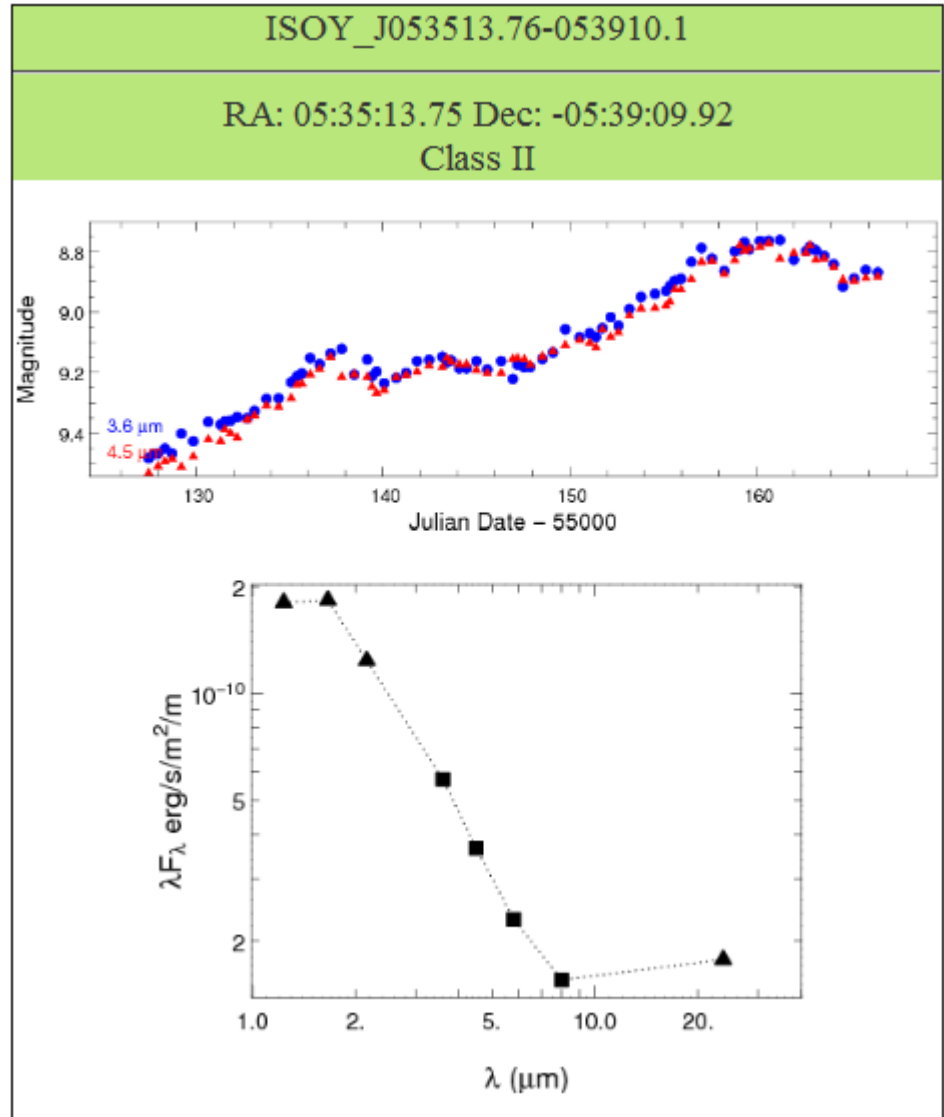
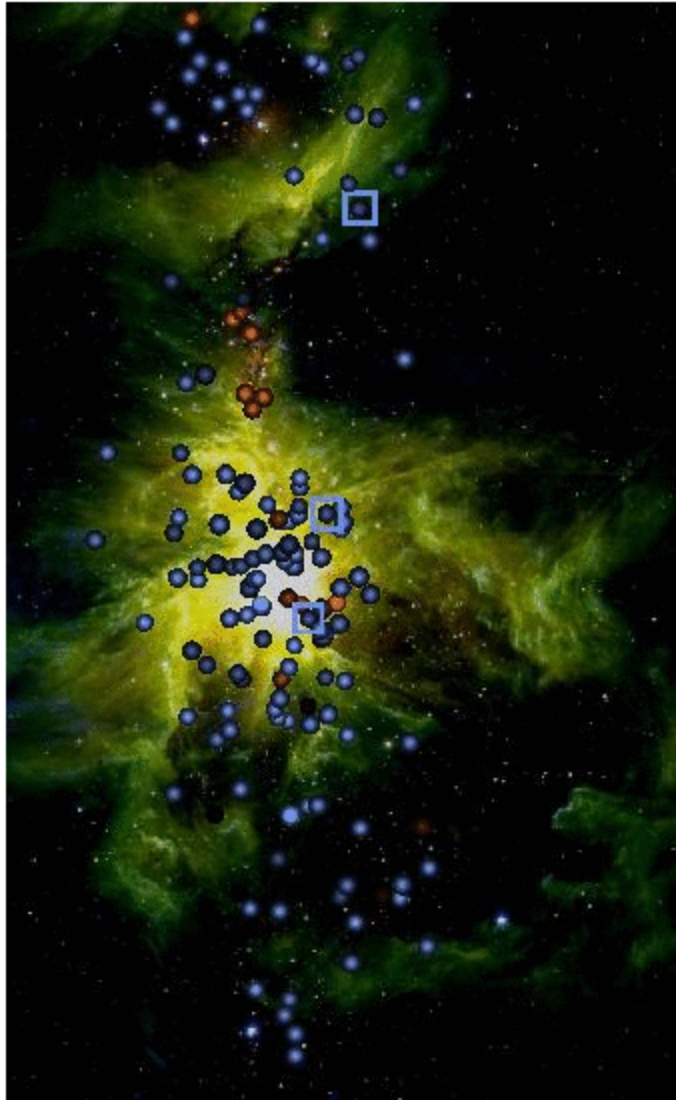
Orion Christmas Tree

This is a rough representation of how the stars in Orion vary with time. Click on any source to see its light curve and its spectral energy distribution. The boxes indicate examples for which we also show J and Ic band light curves.



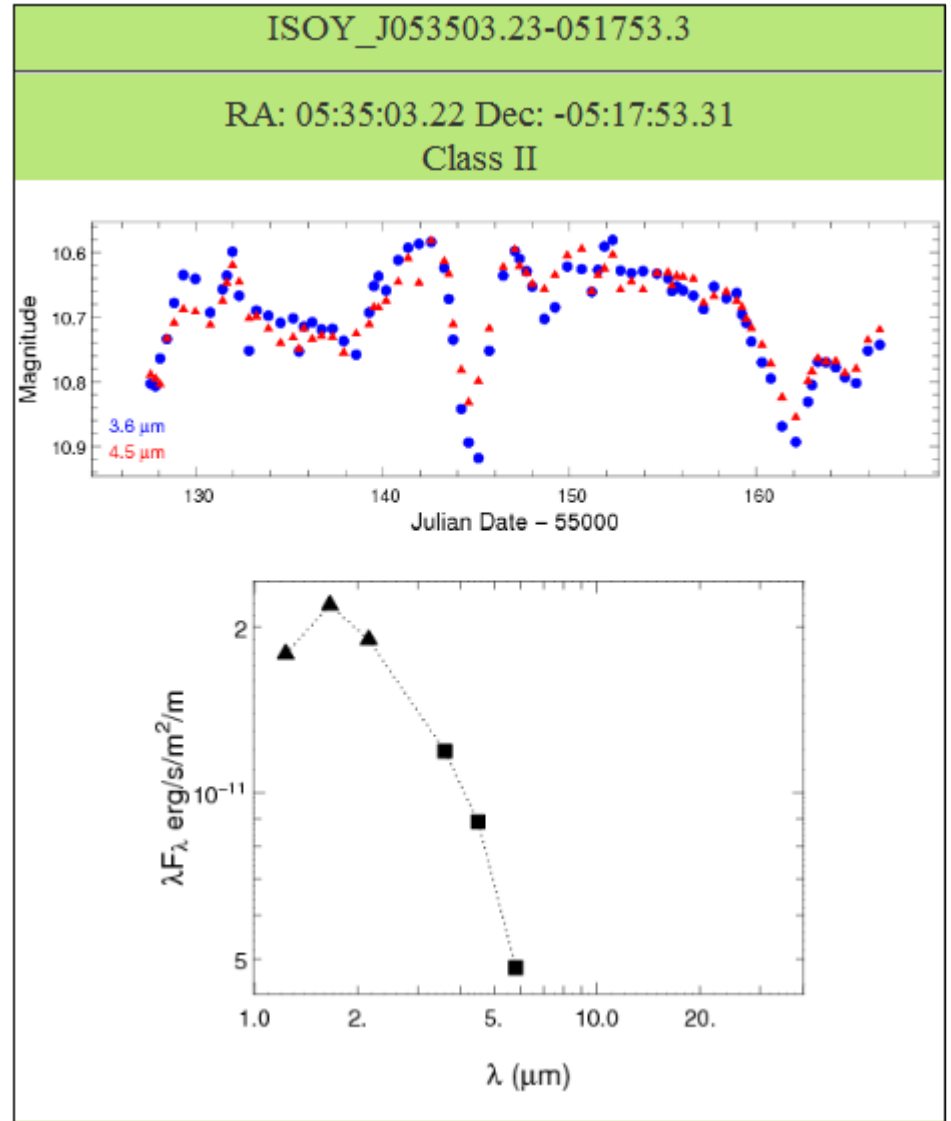
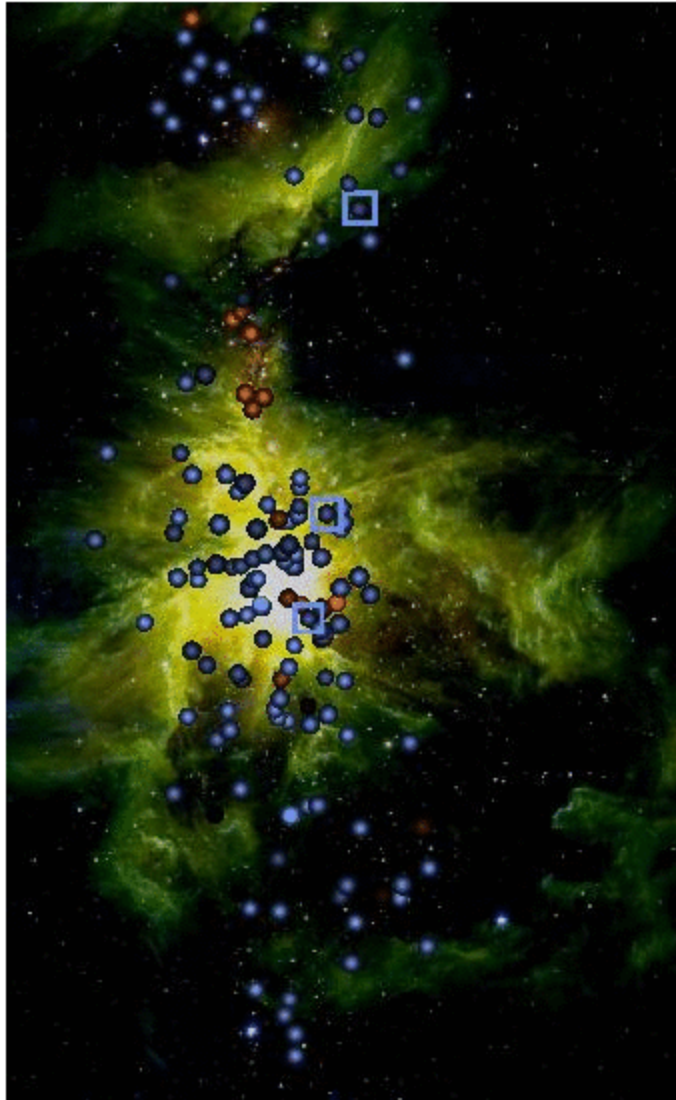
Orion Christmas Tree

This is a rough representation of how the stars in Orion vary with time. Click on any source to see its light curve and its spectral energy distribution. The boxes indicate examples for which we also show J and Ic band light curves.



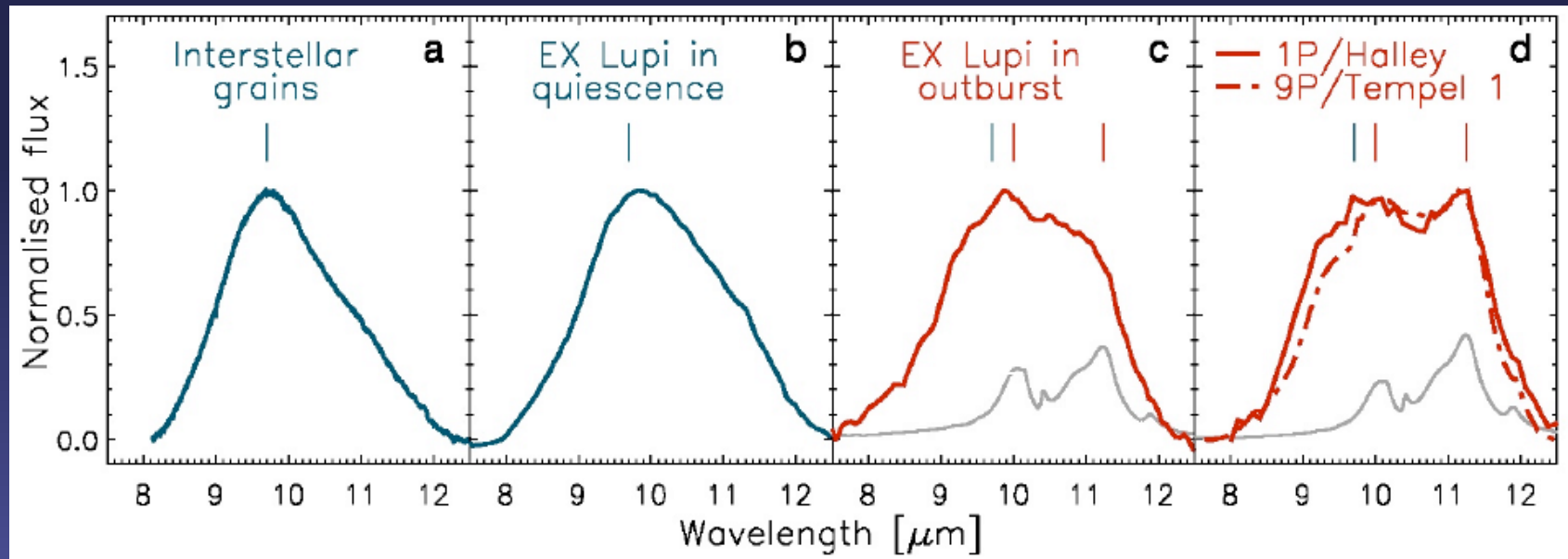
Orion Christmas Tree

This is a rough representation of how the stars in Orion vary with time. Click on any source to see its light curve and its spectral energy distribution. The boxes indicate examples for which we also show J and Ic band light curves.



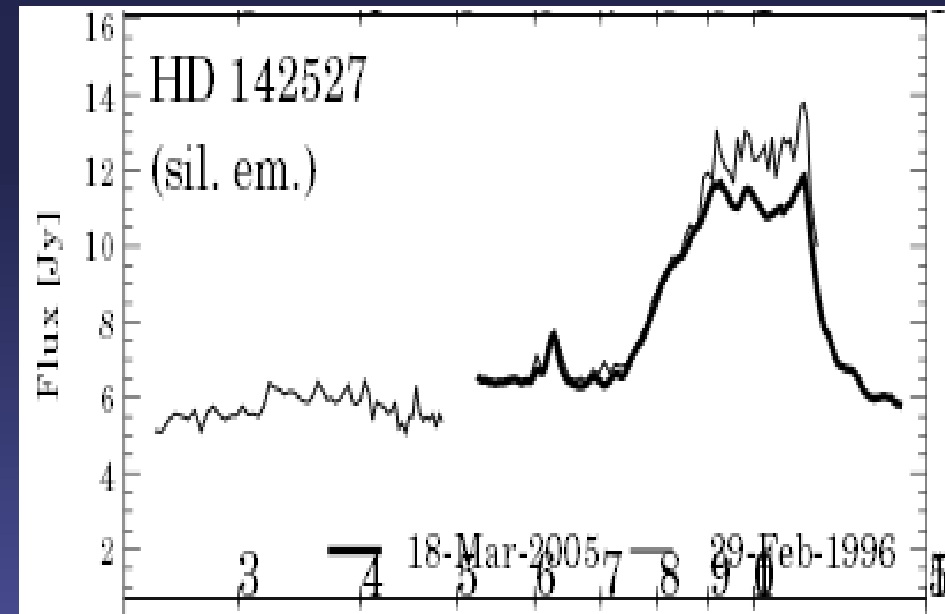
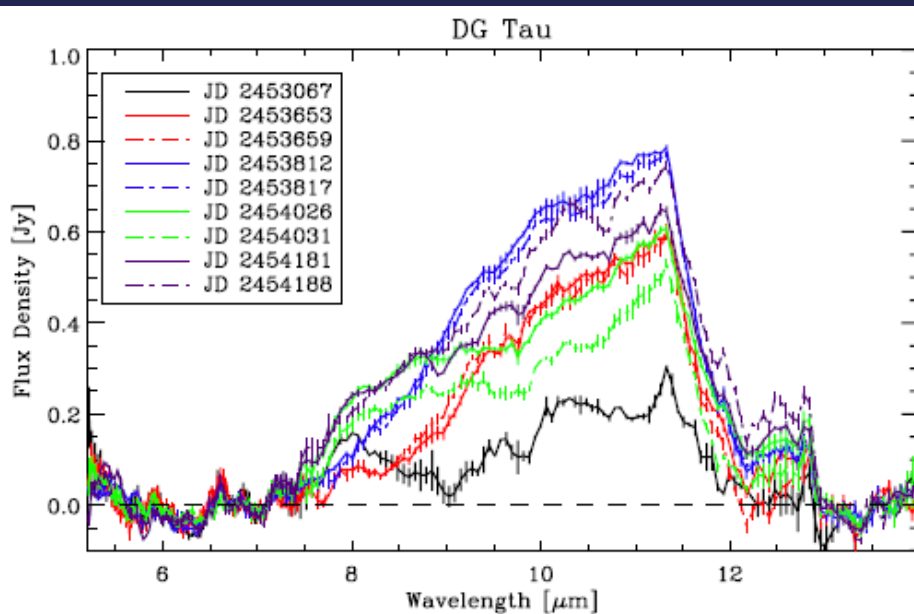
(2) 物質化学的興味 (ダスト結晶化・輸送)

- Episodic crystallization by outbursts (Ábrahám et al. 2009)
 - EX Lupi: 3 Myr, T Tauri型星 ($0.6 M_{\odot}$)、EX Ori型変光星 (episodic accretion, sub-FU Ori型)
 - 2008年1月にアウトバースト(可視で100倍増光)
 - 4月に Spitzer で分光(増光は30倍)。2005年と比較。
 - アウトバースト時、結晶化シリケート出現

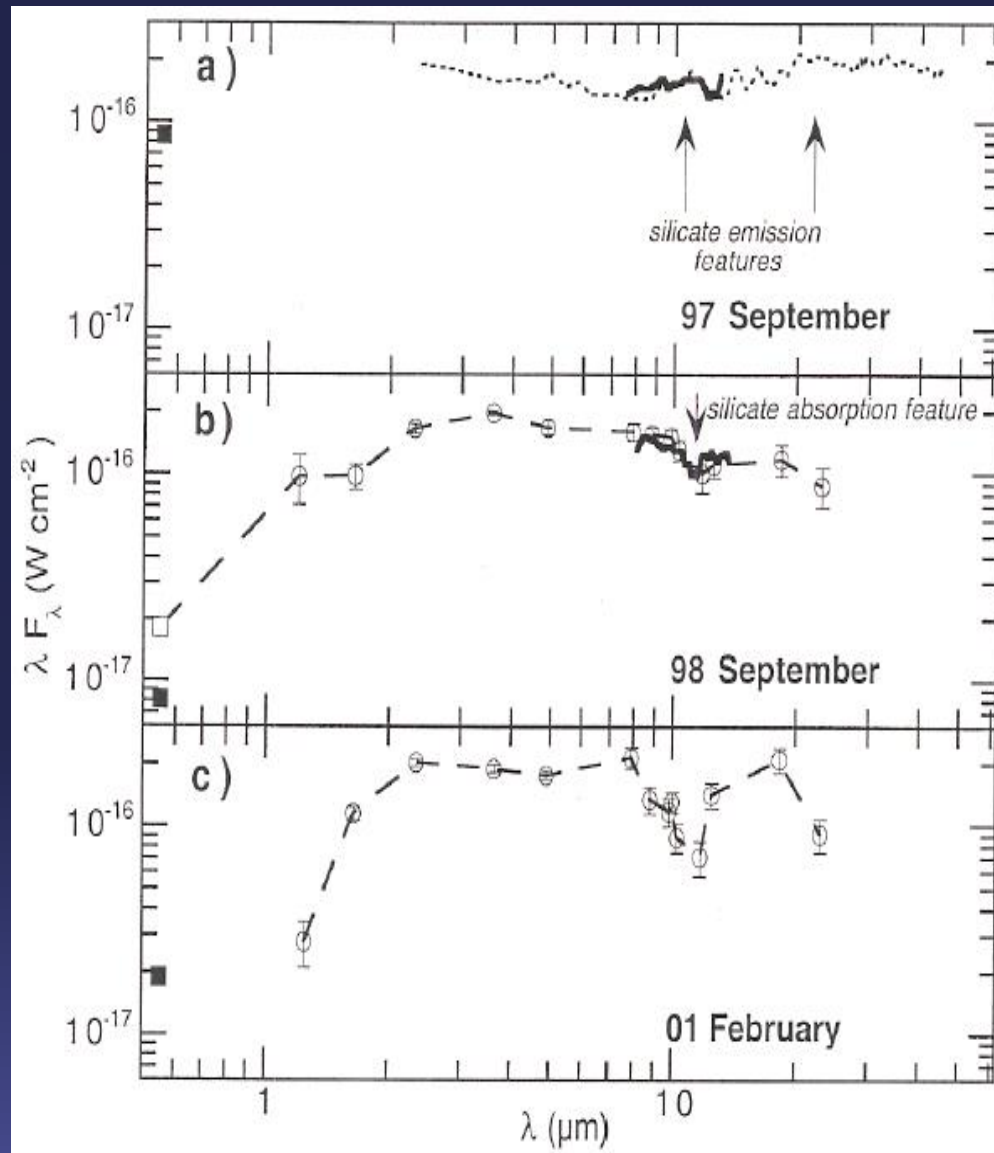


(3) Silicate feature の変動

- 10ミクロン帯シリケートフィーチャーの時間変動: DG Tau, XZ Tau (Bary et al. 2009): タイムスケールは month—year (day, week は検出されず。周期性は観測点が少ないので分からない。)
- サンプル数増加 (~50天体; Kospal et al. 2012)
- ダスト組成は変わらなくて良いケースも。Variable shadowing?

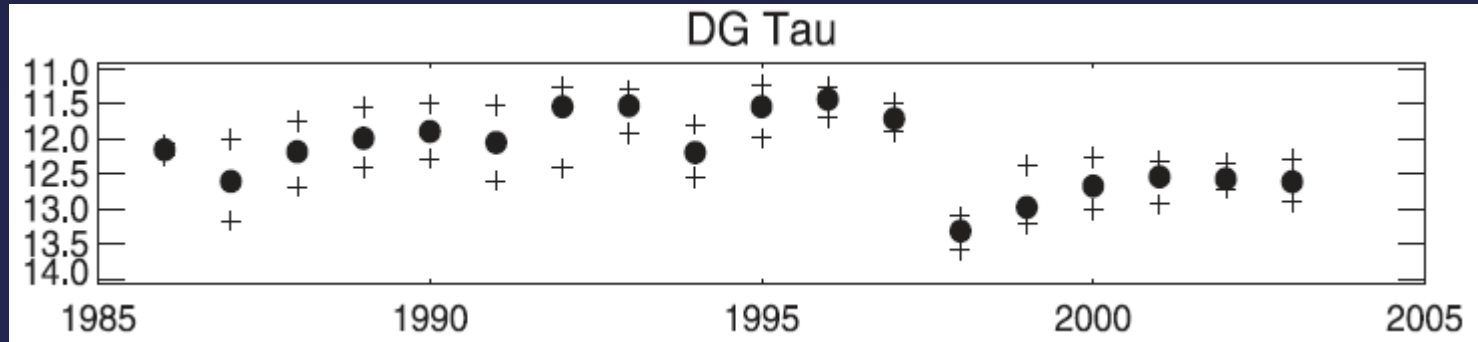


(3) DG Tau – silicate emission/absorption

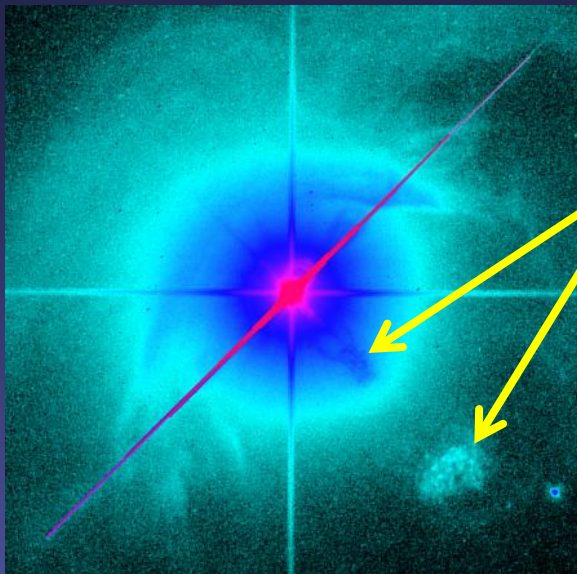


(3) DG Tau – silicate emission/absorption

- V band, long-term photometric variability (Grankin et al. 2007)



- Ejection event in between 2001 and 2004?

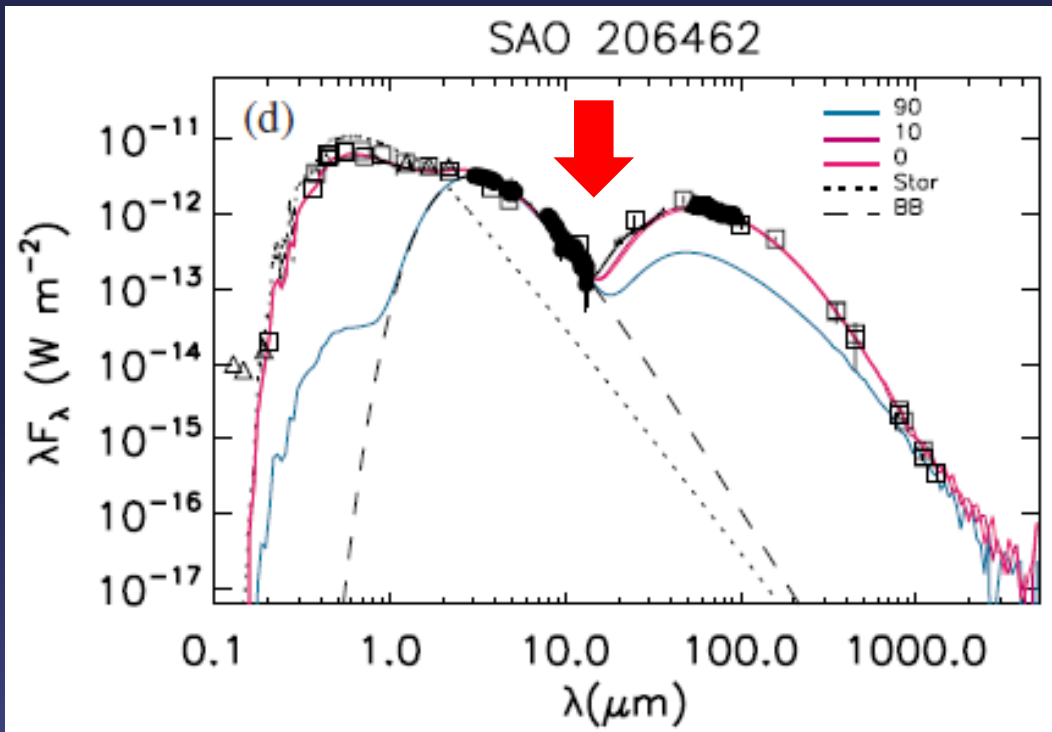


ejected material
(jets in the stellar vicinity; Agra-Amboage
et al. 2009)

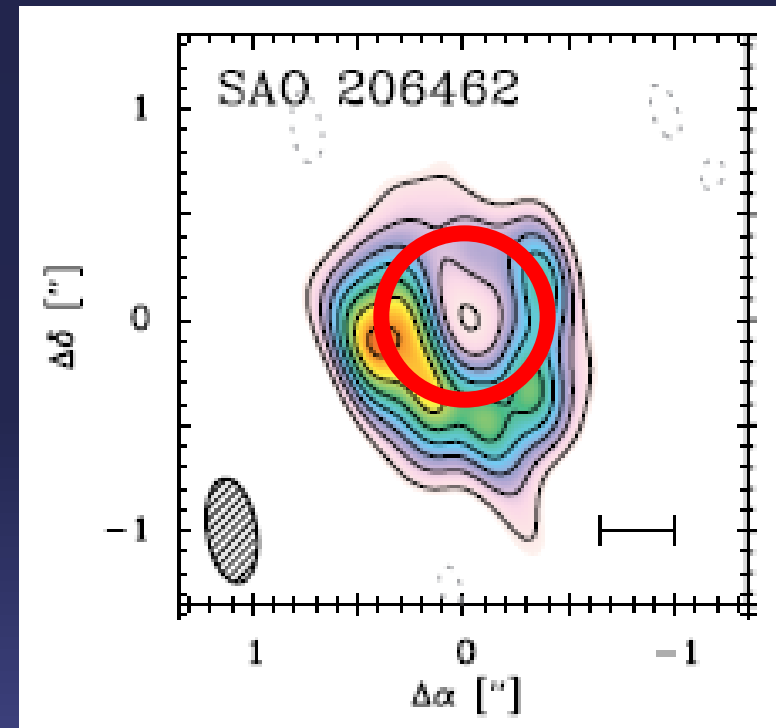
HST/STIS optical archival image
(filter=clear, obtained in 2003 December)

(4) Transitional disks の赤外変光

- Transitional disk – 穴/ギャップ有りの円盤
惑星形成直後？直前？ 円盤進化理解のために重要な進化段階



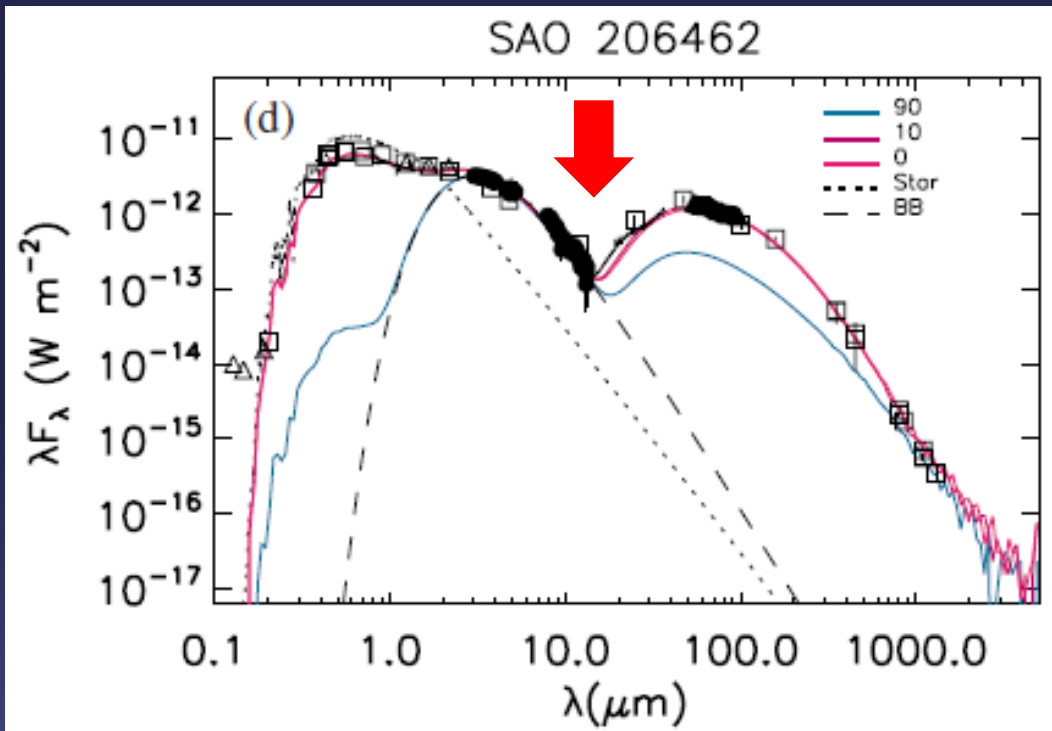
Grady et al. (2009)



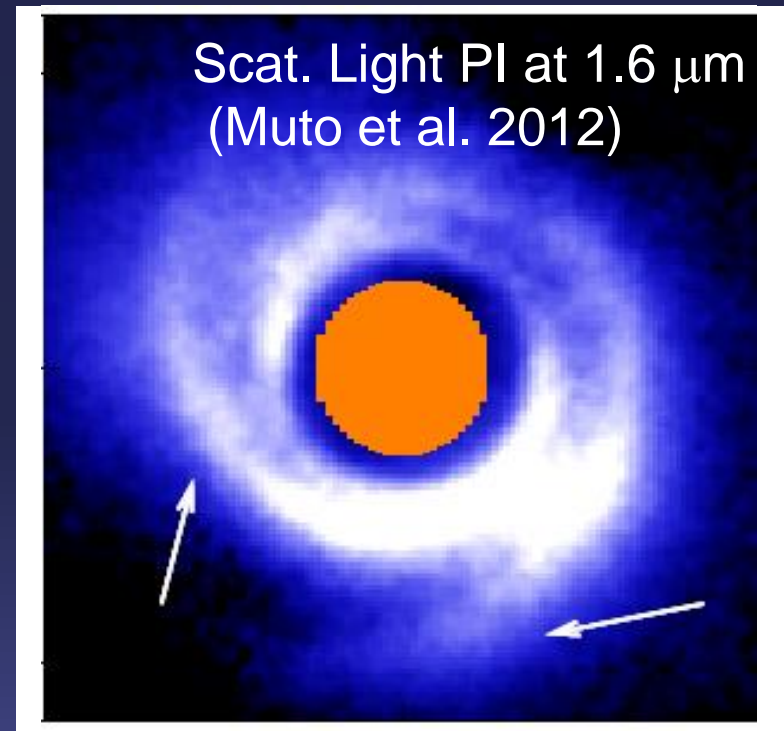
880 μm dust cont.
(Andrews et al. 2011)

(4) Transitional disks の赤外変光

- Transitional disk – 穴/ギャップ有りの円盤
惑星形成直後？直前？ 円盤進化理解のために重要な進化段階



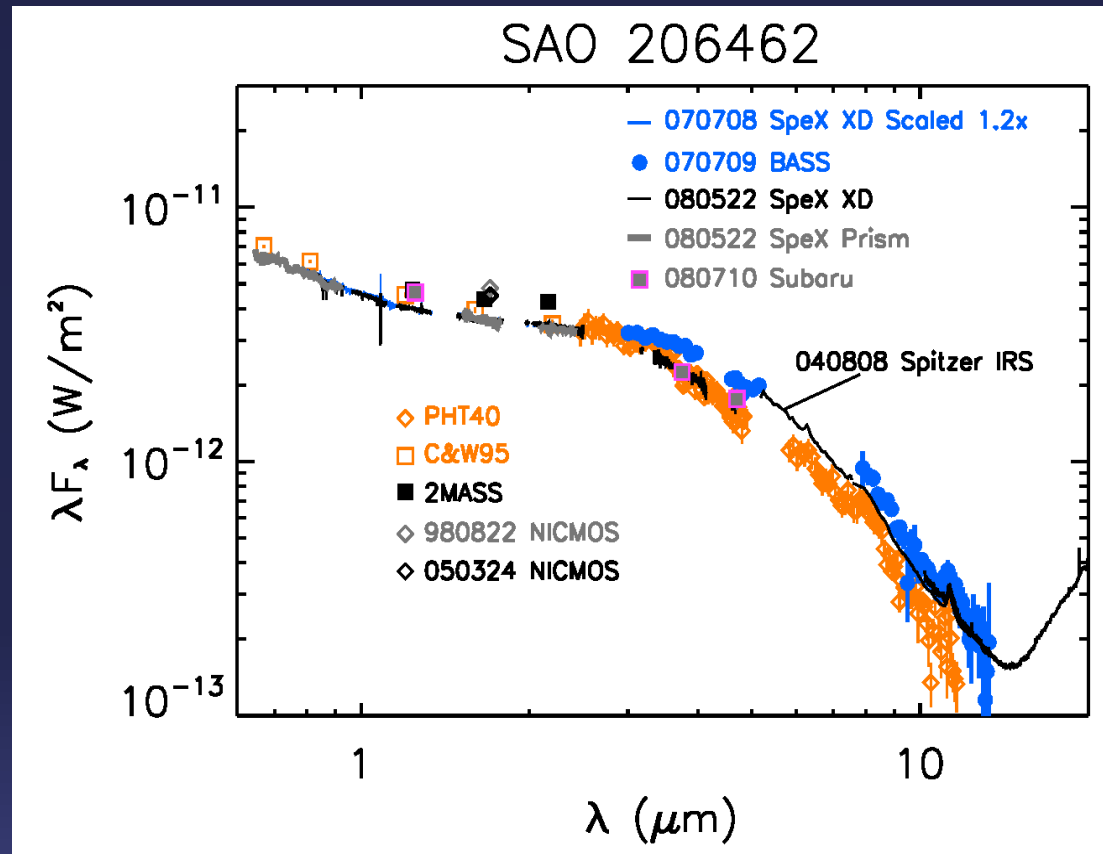
Grady et al. (2009)



880 μm dust cont.
(Andrews et al. 2011)

(4) Transitional disks の赤外変光

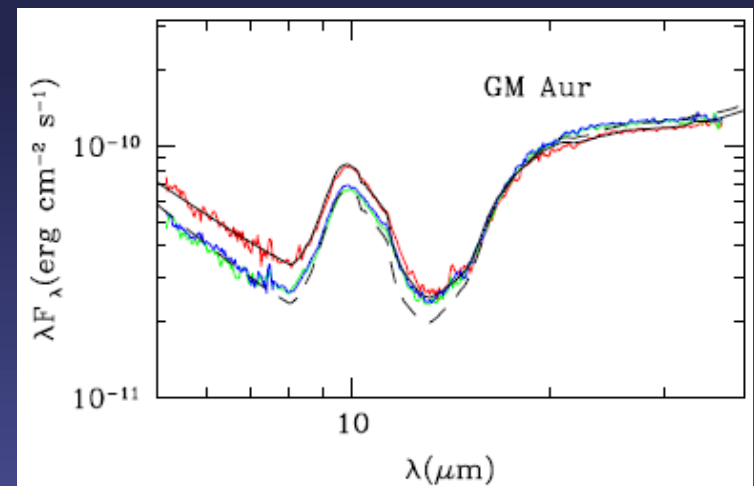
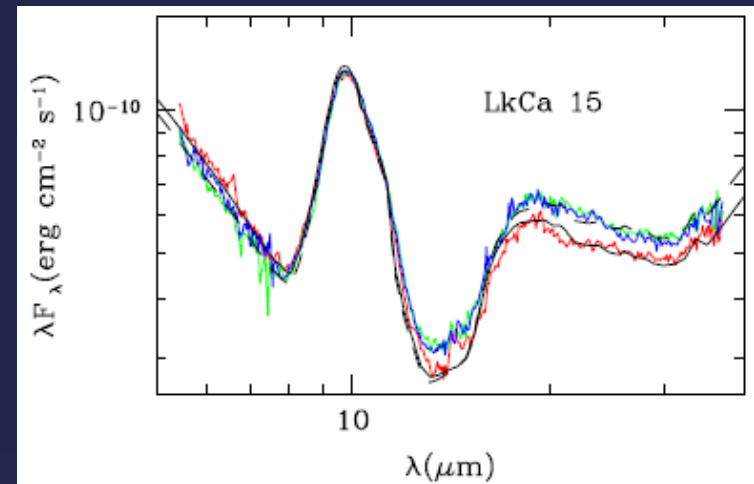
- 近赤外～10ミクロンで変動を検出 ($>3\sigma$)
 - 変動のパターンが HD 163296 と異なる
 - 熱いダストベルトが出現、1回限りのイベントではない
- 惑星により微惑星どうしの衝突が促され、小さいダストが生成されている？

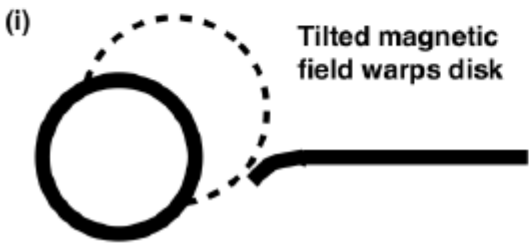
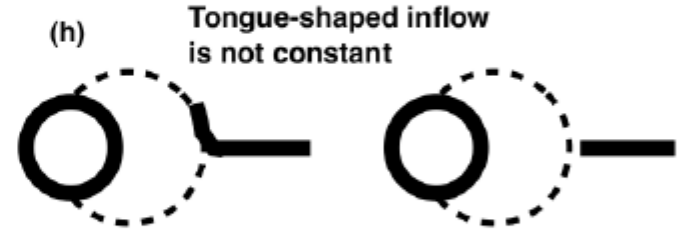
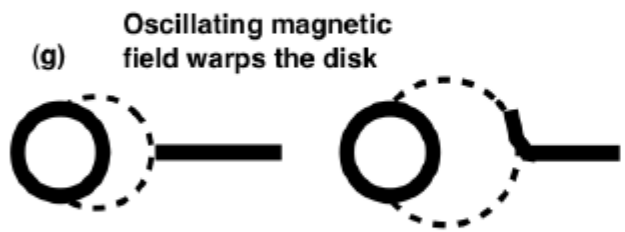
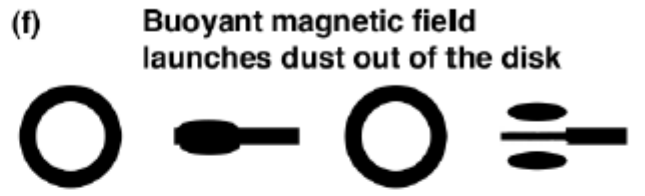
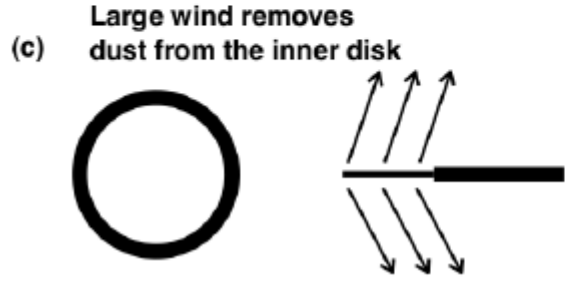
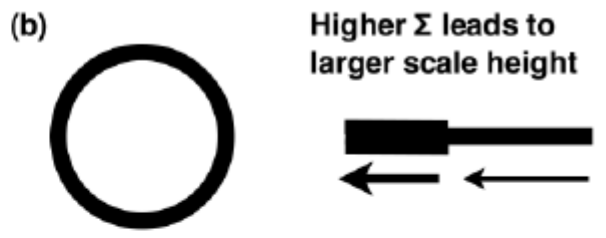
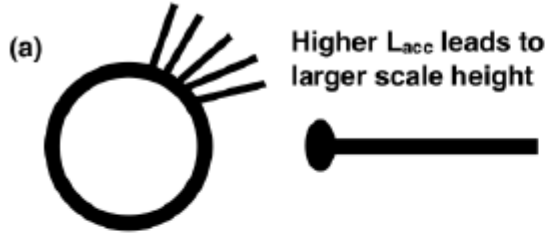


Grady et al. (2009)

(4) Transitional disks の赤外変光

- LRLL31 (Muzerolle et al. 2009)
- 12個 (/14個) の Tタウリ型星で変光を検出 (Espaillat et al. 2010)
- タイムスケールは典型的に 2~3年
- 多くは LRLL31 のようなシーソー型
- 円盤内縁の厚みを 20%ぐらい変化させることで観測を説明できる。
Variable shadowing. (e.g., Sitko et al. 2008)
- ちなみに、4個の円盤では、ギャップ外側に結晶化シリケートが存在。これらには 1 week のスケールの変動がある。

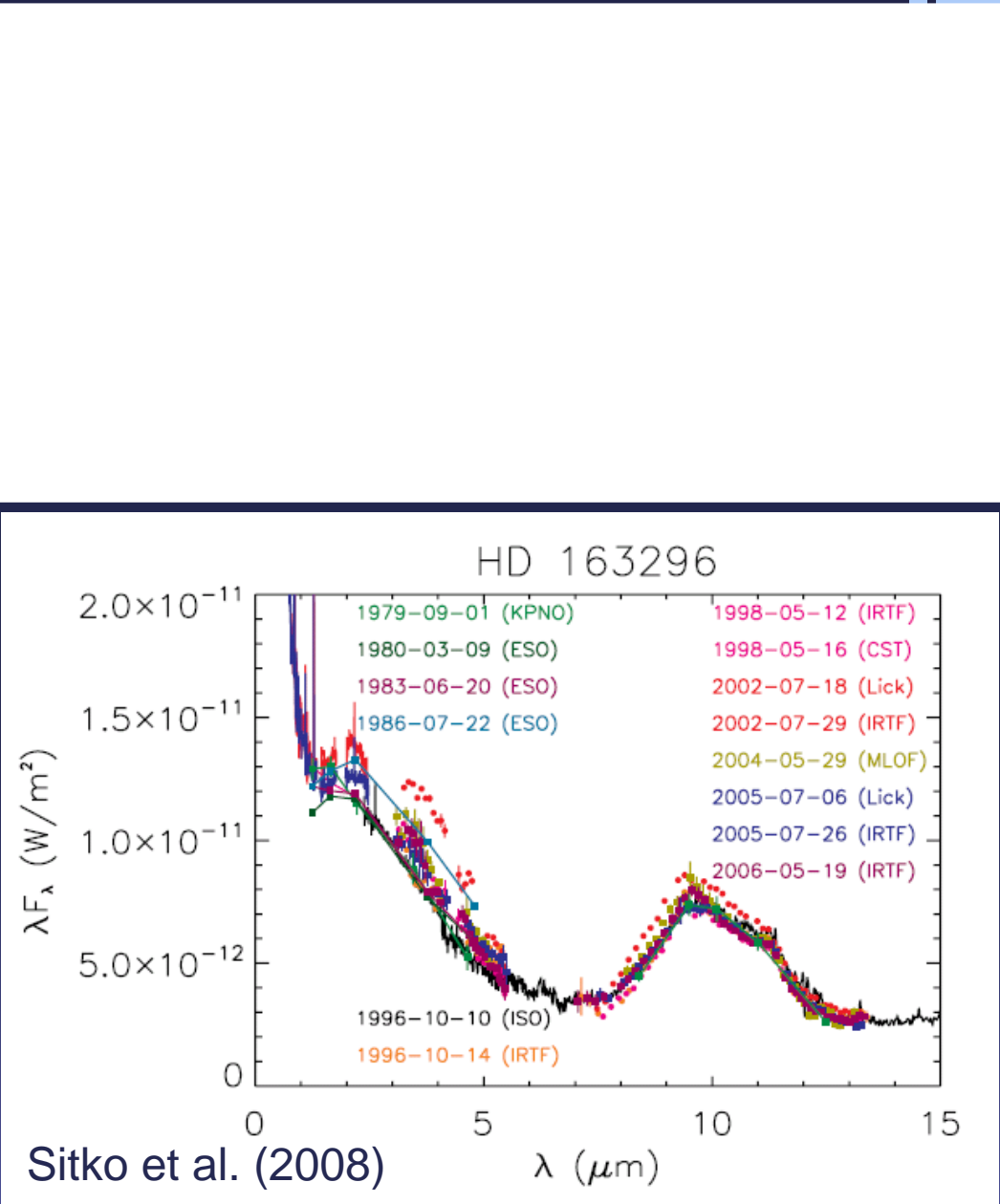




多角的な観測アプローチ

複数領域を同時に見る

- 中心領域からの光が円盤表面のダストに当って散乱 → 円盤上空のダストに感度
- 散乱で暗い
→ ダストがない
→ 中心からの光が当たらない
- 散乱では、2007-2008年の方が2004年より暗い。
- Variable shadowing?



まとめ(可視・赤外線)

- 変光観測は、可視測光だけでなく、ラインや赤外線を組み合わせて盛んに行われている。”Disks are not static at all.”
- ダスト変性、円盤内輸送や、ダスト構造の議論に密接に関連
 - AA Tau型: 磁場と円盤との相互作用
 - Transitional disks の赤外線変光は一般的
 - 円盤内側の厚みの変化 (variable shadowing/illumination) で説明できるパターンが多い
- なぜ変光？
 - (1) 間欠的な質量降着、(2) 円盤密度、構造の非一様性(降着と完全に独立ではない)
 - 円盤の不安定性 (thermal, MRI, ...)
 - 惑星の影響

電波観測の可能性

- 星や円盤内縁が変光すると、円盤外側の照らされ方が変わる
 - 温度が変わる
 - 励起温度の時間変化(～ライン強度)はガス密度に依存
- ライン強度の変化幅、変化のタイムスケール → ガス密度
- モデル計算の試み
Non-LTE, non-LVG

