

0.1秒角の 光・赤外線観測で 迫る星・惑星形成

田村元秀
深川美里、石井未来、林正彦 & SDPS team
2004年2月19日サブアークセカンドの角分解能で探る星形成
国立天文台 三鷹

本日の話: 約0.1秒角の撮像観測
のレビューと関連研究紹介

* 若い星の星周構造

(原始星とTタリ型星/Herbig AeBe)

HL Tau, HH30, GM Aur, HD141569, AB Aur

* 若い星における伴星探査:

disk-planet connection

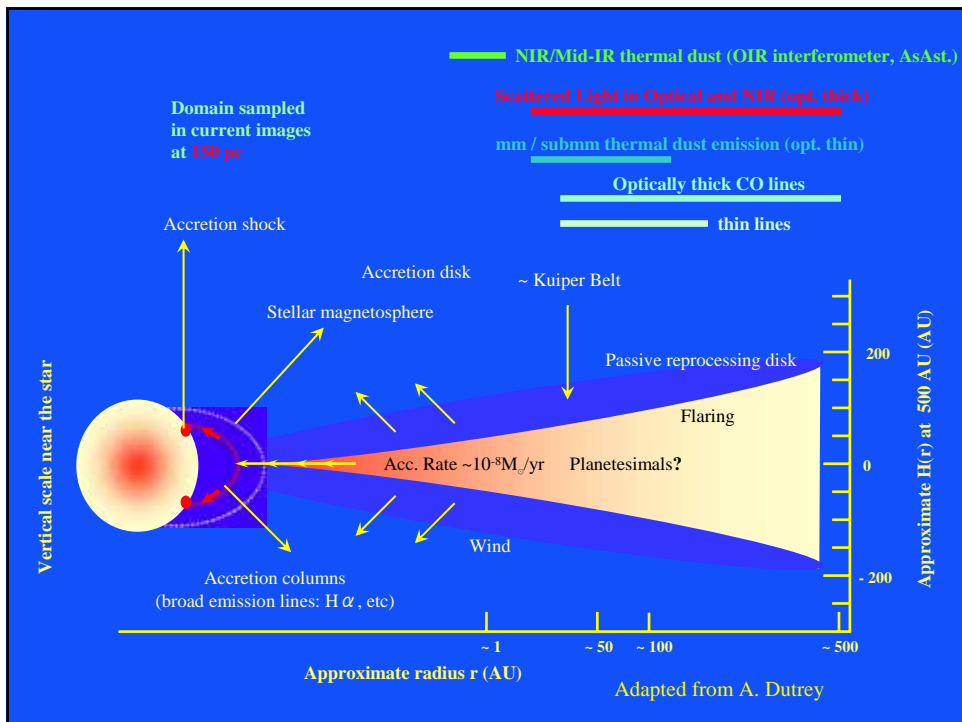
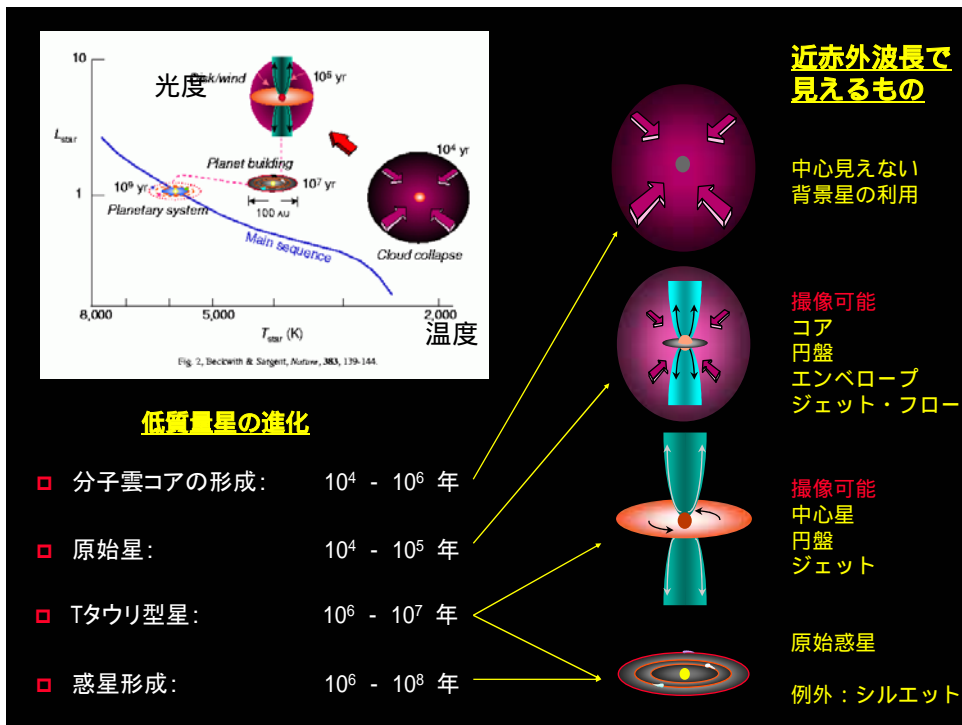
本研究会の他のトークでカバーされる星周構造トピック

原始星: 酒向さん、根建さん

ジェット: 表さん

分光観測: 寺田さん

中間赤外・大質量星: 岡本さん



- サブミリ波～ミリ波： cold dust からの熱放射
- 中間赤外： hot dust からの熱放射
- 可視・近赤外： dust からの反射光

- 星周構造（特に、円盤）からの散乱光と星の光度コントラストが大きいのが問題

- 可視・近赤外撮像 基本的に、dust を解明
 - 基本的なダスト分布
 - 円盤のパラメータ
 - 傾き、表面輝度、厚み、質量（ただし不定性大）、ダストの光学的性質（含む、ダストの成長）
 - 動径構造、方位角構造
 - dust分布の擾乱源の情報
 - ring, gap, central hole, etc.
 - 惑星の間接的証拠
 - 熱円盤のパラメータはまだこの解像度では得られない
 - VLA 7mm 以外はミリ波干渉計の解像度は 1" 程度
 - SMA(>0.1")/ALMA(>0.01") 待ち
 - 温度・磁場・速度・電離度の情報は得られない

解像度 (AU) のめやす

	TW Hya	Tau/Cha/Oph	Ori
	50 pc	150 pc	450 pc
自然シーイング (1 μm; 1 ")	50	150	450
HST (1 μm; 0.1 ")	5	15	45
すばる (2.2 μm; 0.07 ")	3	12	36
すばる (10 μm; 0.3 ")	15	50	150
ESO VLTI (10 μm; 0.03 ")	2	5	14

可視光・近赤外高解像度観測装置の 状況：スペース

● HST

- **可視光**
- WFPC2
 - -0.1"
 - シルエット円盤 + some TTS; 今後はACS
- STIS
 - -0.1"
 - フィルターなしコロナグラフ
- ACS
 - -0.05"
 - マスクサイズの大きいコロナグラフ
- **近赤外線**
- NICMOS
 - -0.1" @ 0.8-2.4 μm
 - コロナグラフ機能、グリズム分光機能
- AOが使えない原始星の高解像度観測では独壇場
- 高いストレール比(98%)と安定したPSFを生かした撮像(例：コロナグラフ)
- 1997/3-1998/12: LN2無くなる
- 2002/4復活：冷凍機のインストール

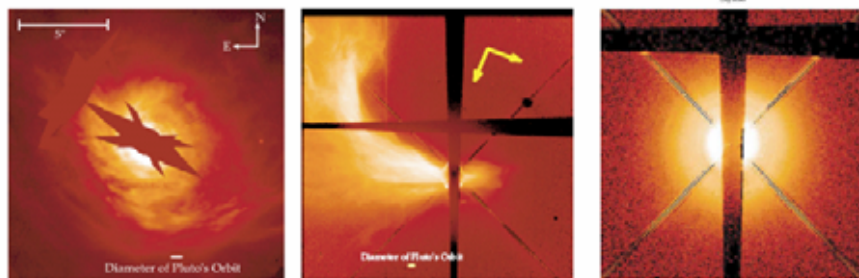
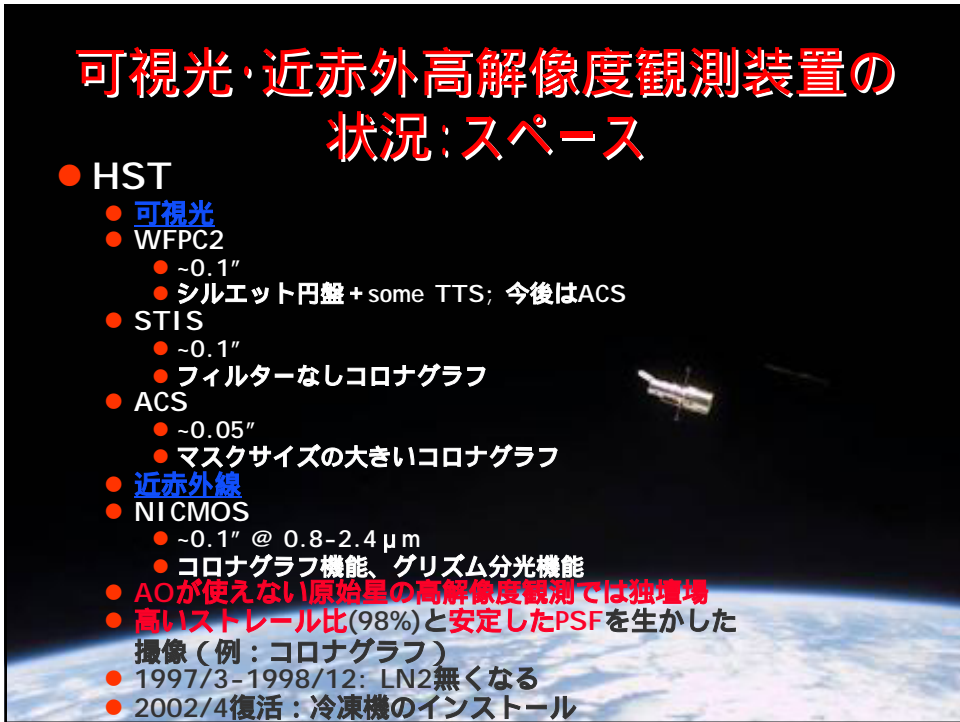


Figure 4. STIS coronagraphic images of objects with nebulosity detectable in direct images with HST provide improved contrast, with minimal contamination by saturation. left) AB Aur, center) SU Aur, and right) TW Hya.

wedge width = 0.5 - 3"

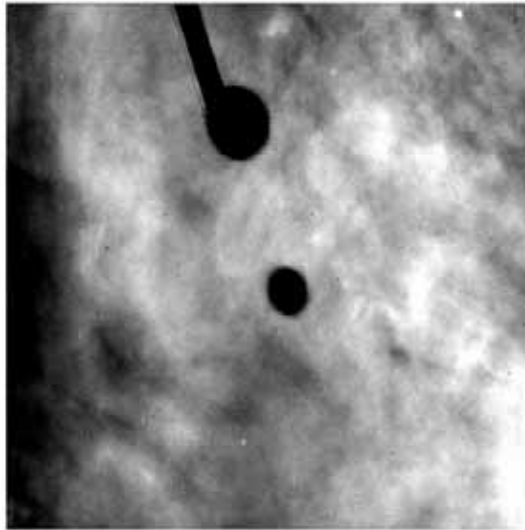
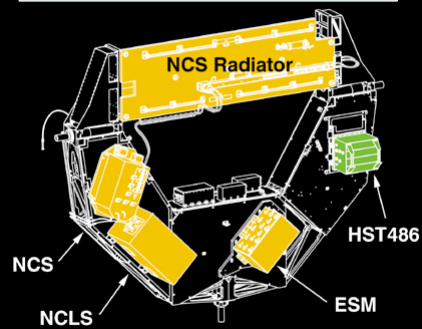


Figure 4. Region of the Orion Nebula observed with the coronagraph in filter F606W. The silhouettes of the occulting spots and finger can be seen superposed against the background nebulosity.

mask size = 1.8" & 3.0"

NICMOS COOLING SYSTEM



可視光・近赤外高解像度観測装置の 状況:地上

- 補償光学 (AO) の登場で、0.1秒角を切る解像度を近赤外波長域で日常的に観測可能になった
- Subaru
 - CIAO/IRCS + 36 素子AO
 - 2005年頃から : 188素子
- Keck
 - KCam/NIRC/NIRC2+349素子AO
- VLT
 - CONICA+185素子NAOS (NACO)
- Gemini
 - Hokupa'a 85素子AO+偏光
- その他
 - CHFT (UH-AO)、ADONIS、IRTF/CoCo

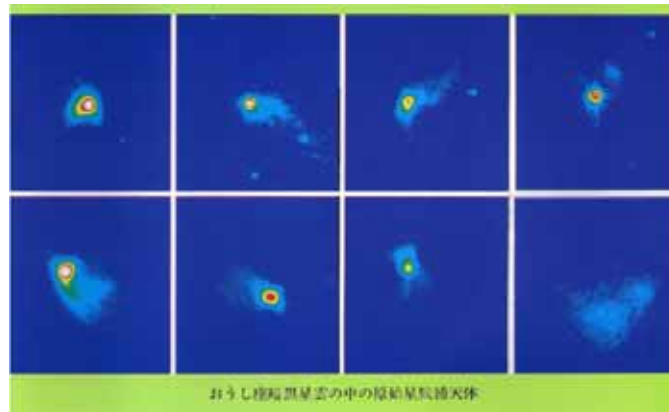


原始星の観測

- Tタウリ型星と違って、中心星が可視光で見えないため、AOのためのガイド星が使えないことが多い
 - レーザガイド星が使えるようになれば改善される
 - VLTは赤外波面センサーがあるのでAO観測可能
 - 近くにTTSがあれば (TTSとの伴星) AO観測可能
- 撮像は、ほぼハッブルの独壇場? (0.1")
- 地上では、良好なシーイング (0.3"程度) の利用や分光に特徴を出せる

2ミクロンで見た原始星： 1秒角の世界(キットピーク)

- Tamura, Gatley, Werner et al. 1991, ApJ, 374, L25 (w/ 62x58 IR arrays)

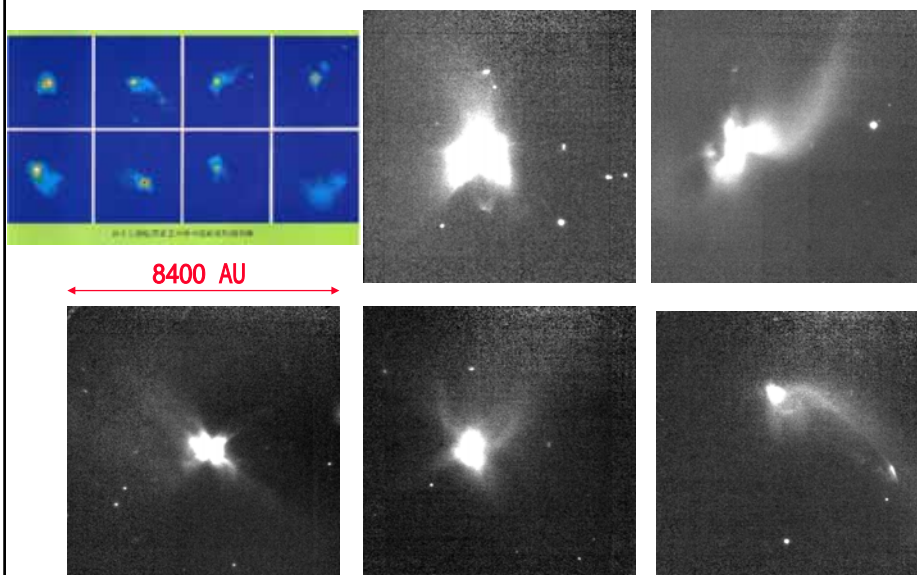


~ 8400 AU

すばる望遠鏡：2ミクロンで見た原始星と星周構造

解像度 = 0.3-0.4" w/ 1024x1024 arrays

Tamura et al.



IRAS 04302+2247: Butterfly



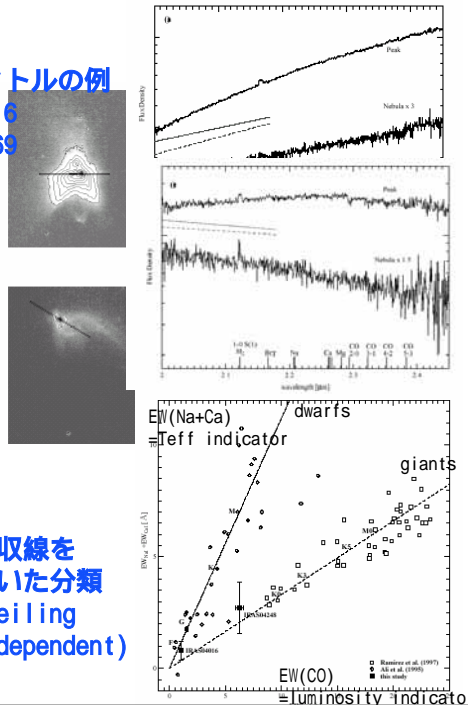
JHK composite; HST/NICMOS
11" x 11" (1500AU x 1500AU),
Padgett et al. 1999

- ◆ dark laneと対称的な星雲
完全なedge-on disk
- ◆ フレア円盤 + 回転落下エンベ
ロープのモデルを用いた円盤
のパラメータの導出(Wood
et al. '03)
 - ◆ Shakura & Sunyaev '73
 - ◆ Ulrich '76
- ◆ Outer radius
 - ◆ R(out)=300AU
- ◆ disk flaring parameter
 - ◆ =1.29
- ◆ radial density profile
 - ◆ =2.37
- ◆ scale height
 - ◆ h(100AU)=15AU
- ◆ M(disk)=0.07Mo

原始星の観測： すばる分光

スペクトルの例
*04016
*04169

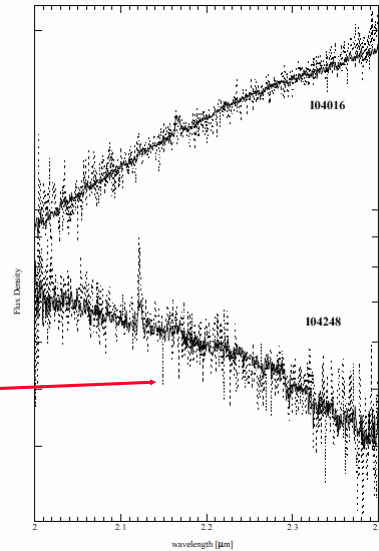
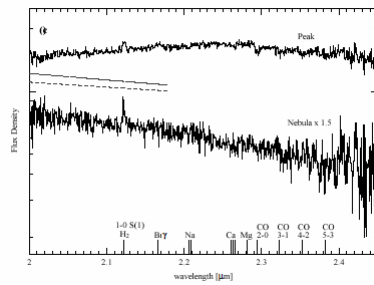
- 原始星の中心天体に迫る
(Ishii, Tamura, & Itoh 2004)
- おうし座の原始星5天
体の赤外(2ミクロン
帯)スリット分光
- 中心のコアと反射星雲
の明るい部分を同時に
分光
- 反射星雲自体の2 μ m帯
分光は初めて
- 2天体：光球の吸収線
を検出
- 巨星に似た大気を示す
ものあり



吸収線を用いた分類
(veiling independent)

Ishii et al. 2004

反射星雲のスペクトル
= コアのスペクトル+吸収で
説明可能



IRAS 04248+2612



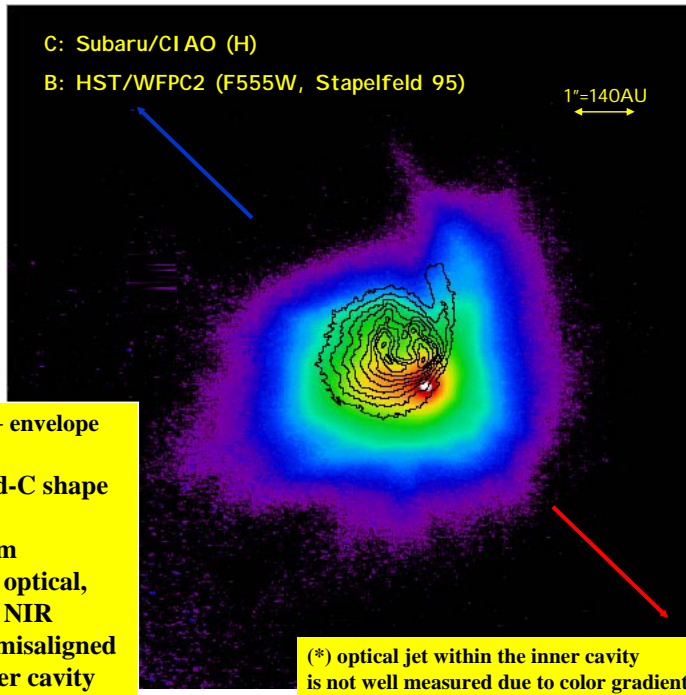
- ◆ 近赤外線で中心を分解
 - ◆ 2重星
 - ◆ separation=25 AU
- ◆ 反射星雲
 - ◆ アウトフローをトレース
 - ◆ helical jet?

*JHK composite, HST/NICMOS
11"x11" (1500AUx1500AU),
Padgett et al. 1999*

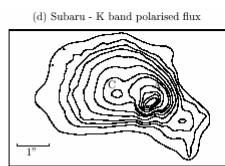
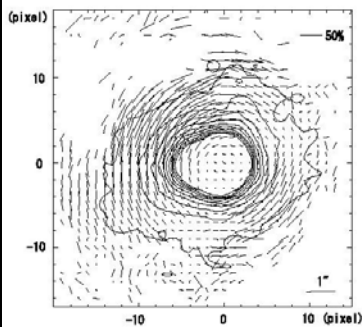
HL Tau

NIR w/AO
vs.
optical/
space

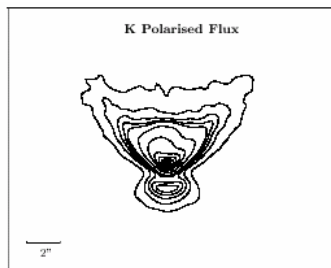
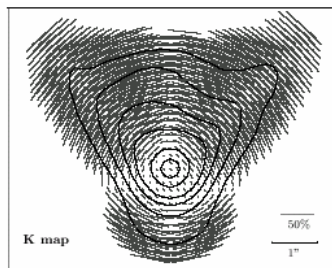
- point-like source + envelope
- two cavities
 - inner flipped-C shape nebula
 - northern arm
 - inner part – optical,
 - outer part – NIR
 - optical jet* misaligned with the inner cavity



Polarization image of HL Tau



- a. Subaru + CIAO + polarimeter w/o AO (0.4")
- b. centro-symmetric pattern
- c. polarization disk
- d. aligned vectors across star
- e. Monte Carlo modeling



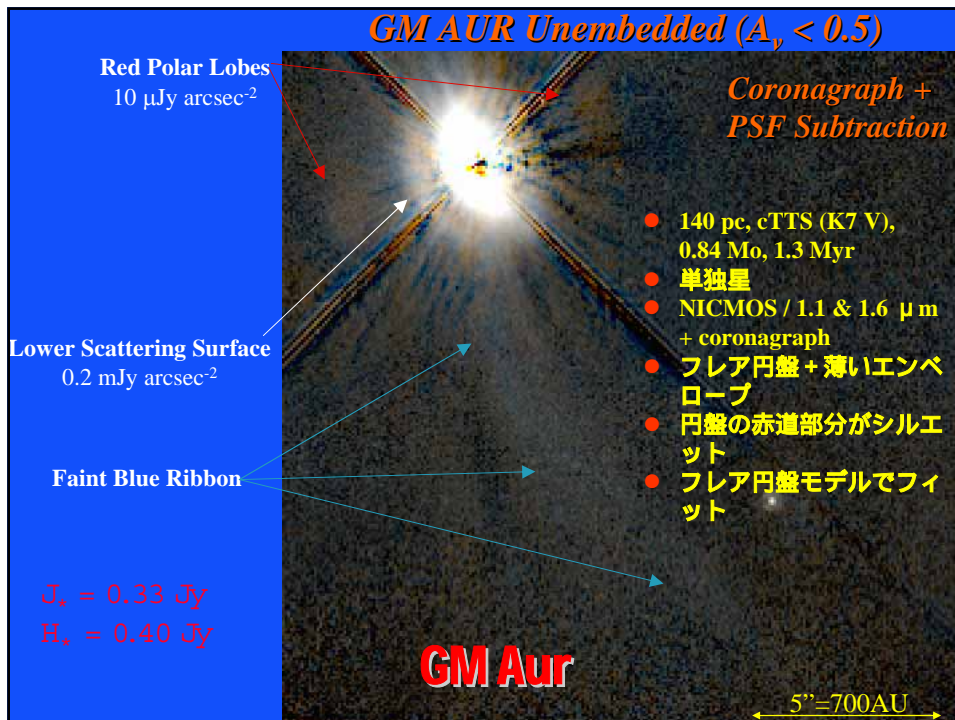
Lucas,
Fukagawa,
Tamura et al.
2004

HH 30: 円盤に隠されたTTS

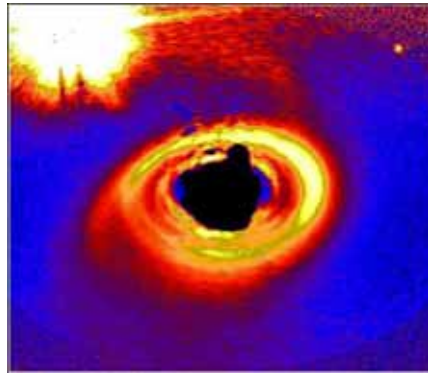
- HST/NICMOS
- 多色直接撮像
- フレア円盤
- 非軸対称性あり
 - 光球上のスポットで説明
- カラーとモデルから、大きなダストが必要
 - $a(\text{max}) > 50 \mu\text{m}$
- $M(\text{disk}) > 0.0015 M_{\odot}$



*F675W/F119/F204M composite
~1"x1" (140AUx140AU)
Cotera et al. 2001*



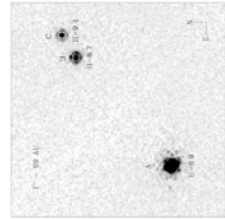
HD 141569 A



500 AU

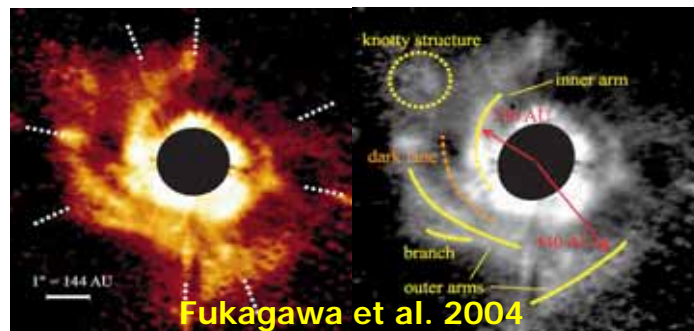
V-band image, HST/ACS
Clampin et al. 2003

- ◆ 99 pc, Herbig Be (B9.5 Ve)
- ◆ HST/ACS + coronagraph
- ◆ 多重リング構造
 - ◆ STIS/NICMOSの方が構造は見やすい(後で)
- ◆ 惑星擾乱説
- ◆ 非惑星擾乱説
 - ◆ dust migration
- ◆ アーム
 - ◆ 伴星との重力相互作用



AB Aur

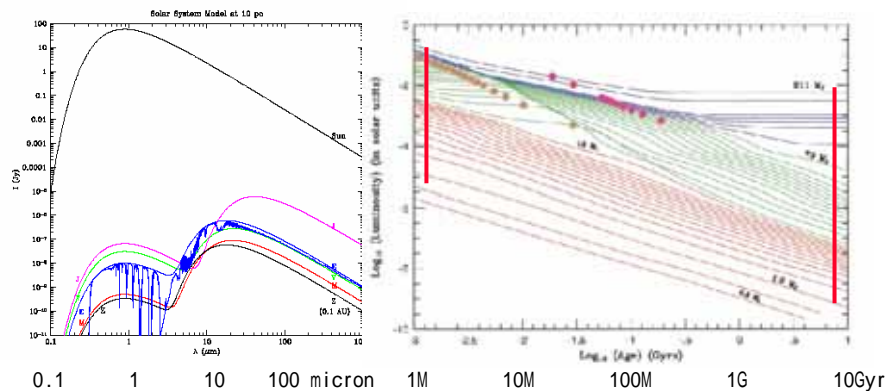
- 144pc, Herbig Ae (A0 Ve), 2.4 Mo, 約4Myr
- Subaru + CIAO + AO、コロナグラフあり
- 580 AUにまで広がるディスク(可視光で見えているエンベロープとは異なる)
- 単独星にもかかわらずアーム構造が顕著
- フレア円盤 + 不規則腕 エンベロープからの物質落下による重力不安定性か?



Fukagawa et al. 2004

Intro: planet & BD direct detections

- ◇ sensitivity, angular resolution, **dynamic range**
- ◇ aged planets: beyond current instrument power
- ◇ hot jupiters: beyond 8-mAO; go to 8m IR interferometers
- ◇ **the younger**, the better (both luminosity & dynamic range)
- ◇ current searches: **SFRs**, nearby clusters



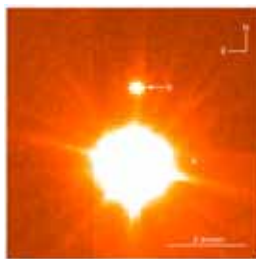
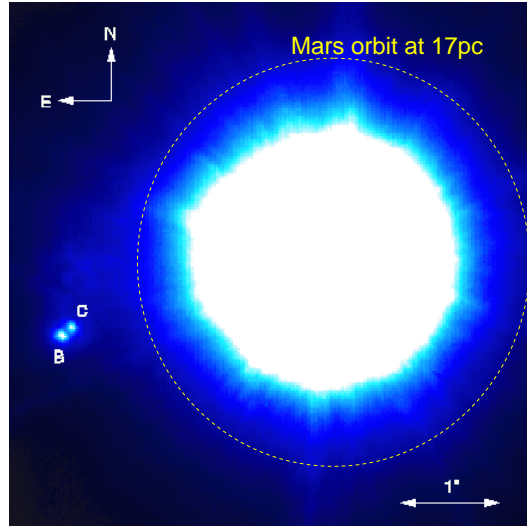
Current Status direct planet detections

- **Companion searches around nearby stars**
 - HST faint companion (FC) searches around nearby 23 stars with WFPC2 (Schroeder et al. 99)
 - NICMOS survey of 45 young (<300Myr) nearby stars (Lowrance 03)
 - Palomar searches for 8pc sample (Oppenheimer et al. 00)
 - Subaru searches around slow movers (Nakajima et al. planned)
- **Companion searches around Doppler planet stars**
 - Keck searches around 25 stars (Luhman & Ray-Jay 00)
 - Lick et al. searches around 11 stars (Patience et al. 02)
- **Companion searches around VLM objects**
 - HST searches around VLM objects (eg., Reid et al. 01)
 - Gemini searches around VLM objects (Potter et al. 02; Close et al. 03)
 - BD binaries <NOTE:VLM objects=Very Low Mass objects>
- **Companion searches around YSOs or clusters**
 - Various searches in Pleiades (Martin et al. 00)
 - ADONIS survey of Tuc-Hor association (Chauvin et al. 03)
 - Subaru searches around 100 stars (Hayashi, Tamura et al. ongoing)
- **Various Free-Floating Planet (aka. Sub-Brown Dwarfs) searches in SFRs**
- **No planets except several BDs (e.g., Gl229, Gl86, HD130948, TWA-5, HR 7672) discovered so far.**

Two ultracool companions to the young star HD130948

Potter et al. 2002; Goto et al. 2002

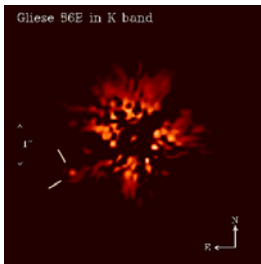
- ◆ Pair has same proper motion as primary (7 month basis 148 mas/yr)
- ◆ Gravitationally bound pair
- ◆ brown dwarf binary
 - ◆ Pair separation = $0.134 \pm 0.002''$
 - ◆ Subaru/IRCS spectroscopy (Goto et al.)
- ◆ Primary < 1 Gyr



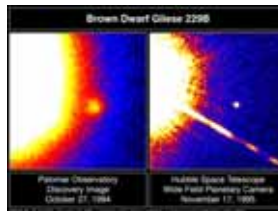
TWA-5B
(CoD-33 ° 7795)
55pc
YBD(12MYr)
15-40 M_{Jupiter}



HR 7672B
(15 Sge)
18pc
~2Gyr for Pr.
~65 M_{Jupiter}



Gl 86B
11pc
several GYr
~50? M_{Jupiter}



Gl 229B
11pc
16-100MYr??
~50? M_{Jupiter}

我々の伴星低質量候補天体

- ✓おうし座のTタウリ型星の伴星
- ✓Common proper motionを確認できているものもある
- ✓年齢が正しければ、木星の10-20倍質量程度
- ✓分光フォローアップ中



まとめにかえて: 今後の計画

- Subaru Disk and Planet Search projectの継続
 - 統計が議論できるまで
- disk morphology details
- AO有りの偏光観測
- disk spectroscopy
- 次期補償光学のための円盤・惑星探査装置の計画
- 高感度スペース赤外観測との連携
 - SEDと撮像
 - 新しい観測対象

