

“超”低温度星探査 と初期質量関数

- ◆ 本日の話
 - ◆ IMFのイントロダクション
 - ◆ 星形成領域でのIMF観測
 - ◆ 褐色矮星と超低温度天体
 - ◆ WISHで狙うべきもの
 - ◆ まとめ

田村元秀

国立天文台

WISH サイエンスワークショップ

三鷹 2009/4/8 11:00-11:20

三種類の星：恒星・褐色矮星・惑星

太陽

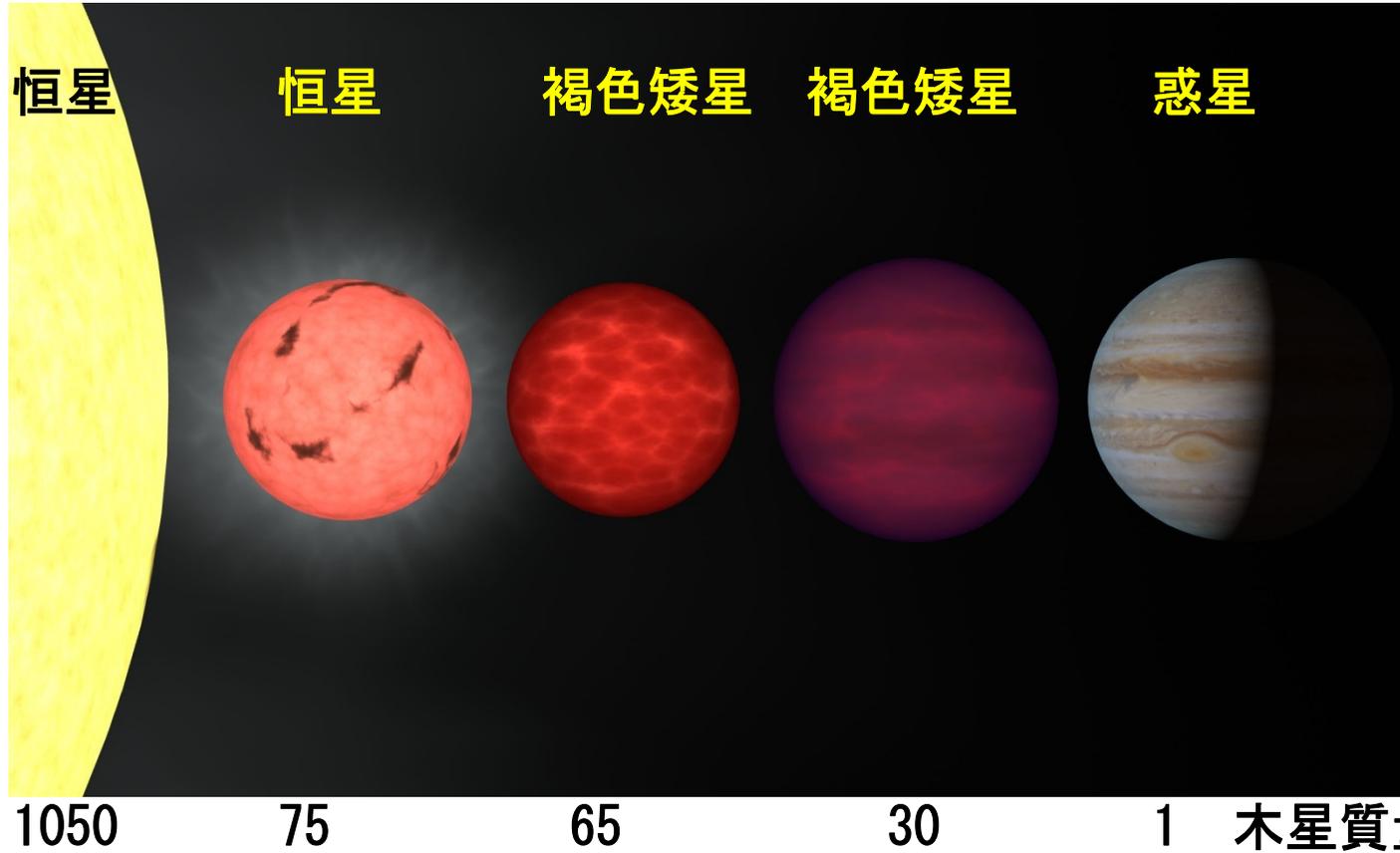
G型星

後期M型星

L型星

T型星

木星

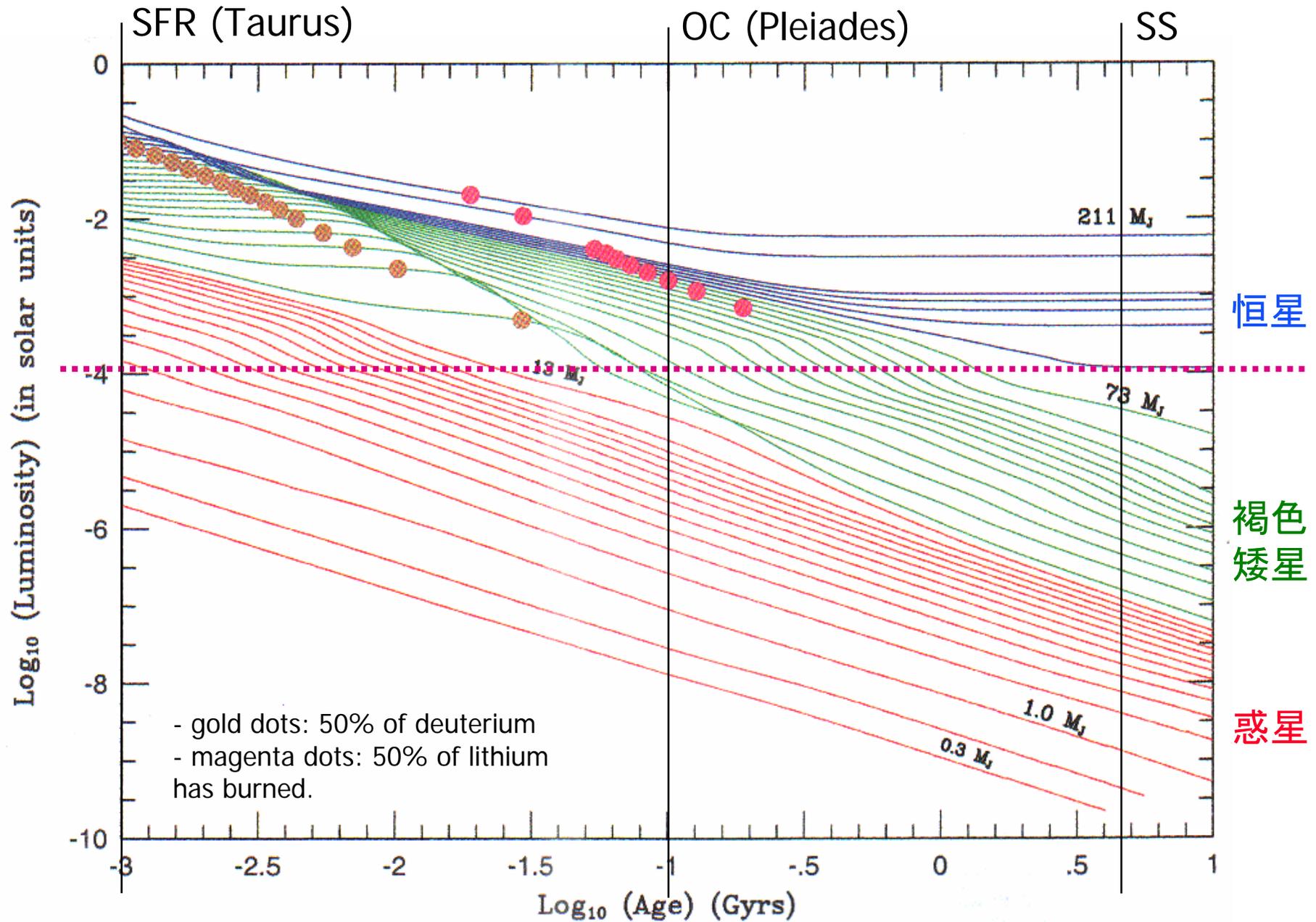


(注)
木星の質量
~太陽質量/1000

地球の質量
~木星質量/300

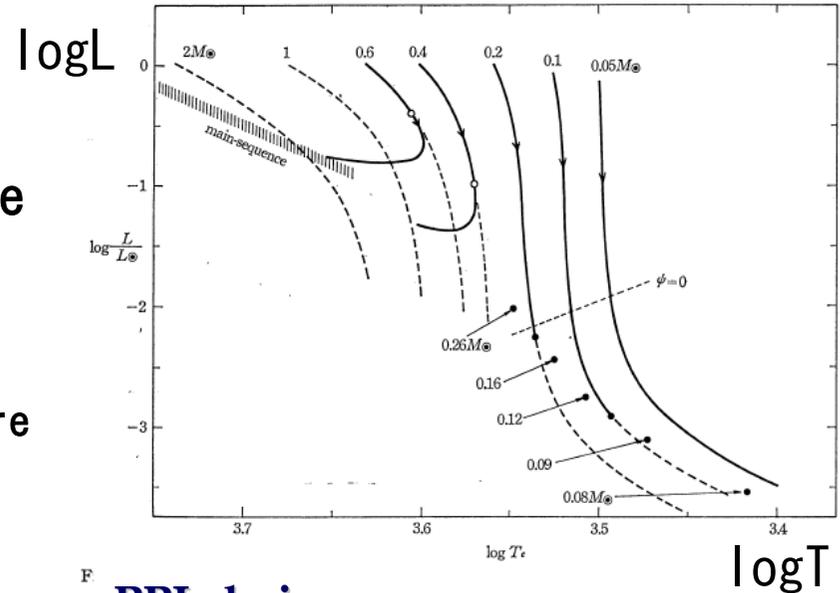
恒星： 太陽質量の 0.075倍以上 (コアにおける安定した水素燃焼)
褐色矮星： 太陽質量の 0.075-約0.013倍 (水素が燃えない)
惑星： 太陽質量の 0.013倍未満 (ただし、共通の定義なし)

「星」の光度進化 (Burrows et al. 1997, 2001)



褐色矮星の歴史：理論

- Hayashi & Nakano (1963)
 - Evolution of Stars of Small Masses in the Pre-Main-Sequence Stages
 - Progress of Theoretical Physics, 30, 460-474
 - "The stars less massive than 0.08 M_{\odot} are found to contract toward the configurations of high electron-degeneracy without hydrogen burning."
- Kumar (1963)
 - The Structure of Stars of Very Low Mass
 - ApJ, 137, 1121-1125
 - "Completely convective models have been constructed for stars of masses 0.09, 0.08, 0.07, ... It is shown that there is a limit to the mass of a main-sequence star."
- Tarter (1975)
 - 論文の中で"brown dwarf"と名付ける



F PPI chain:
 $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e, T_c = 3 \times 10^6 \text{ K}$

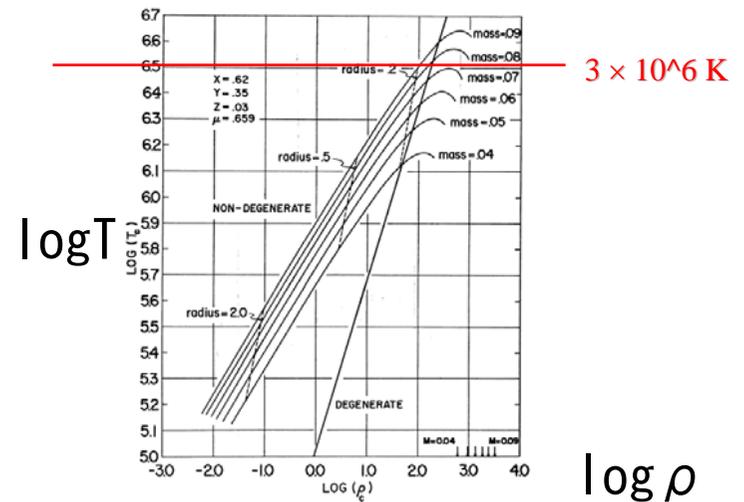
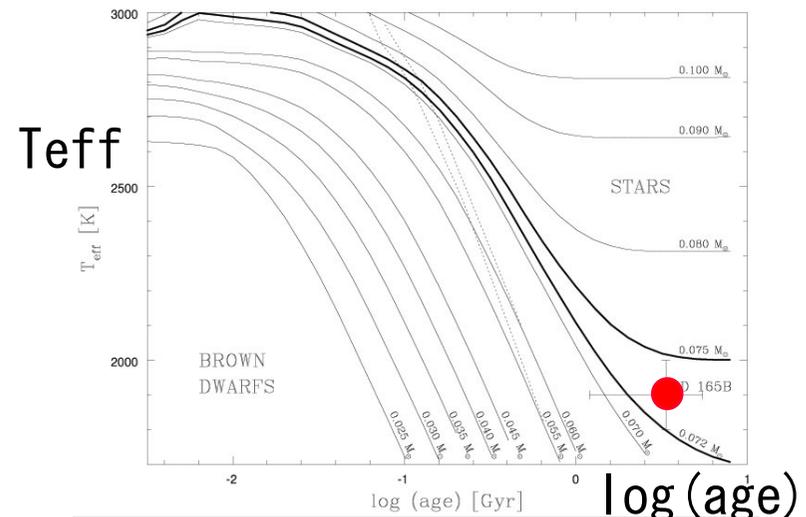
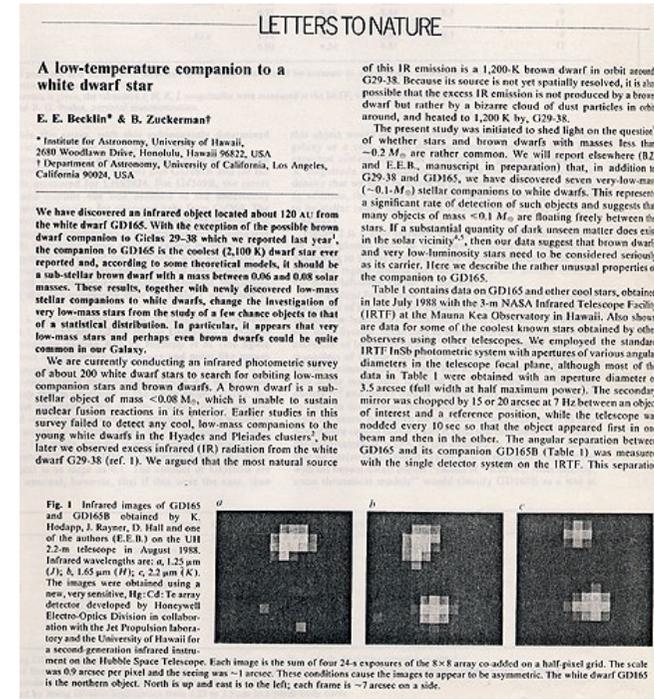


FIG. 3.—The temperature-density diagram for completely convective models. Population I

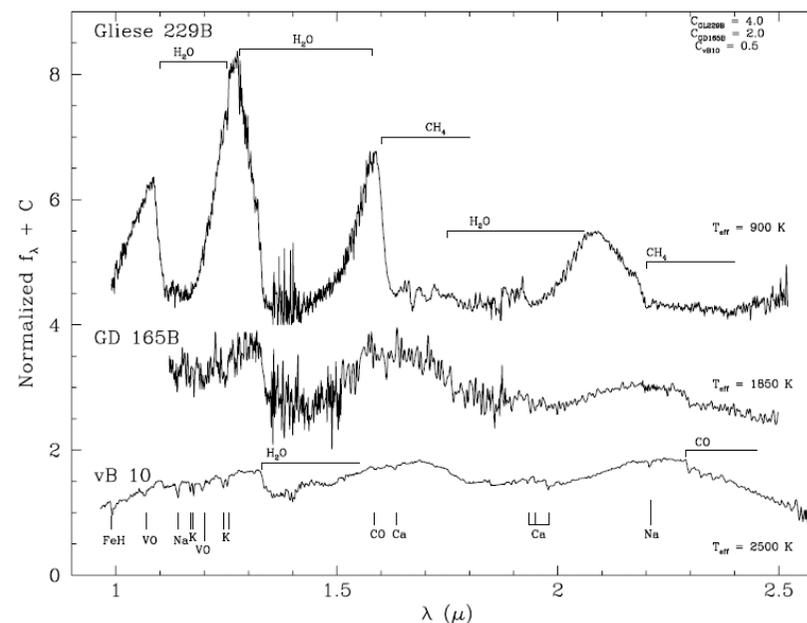
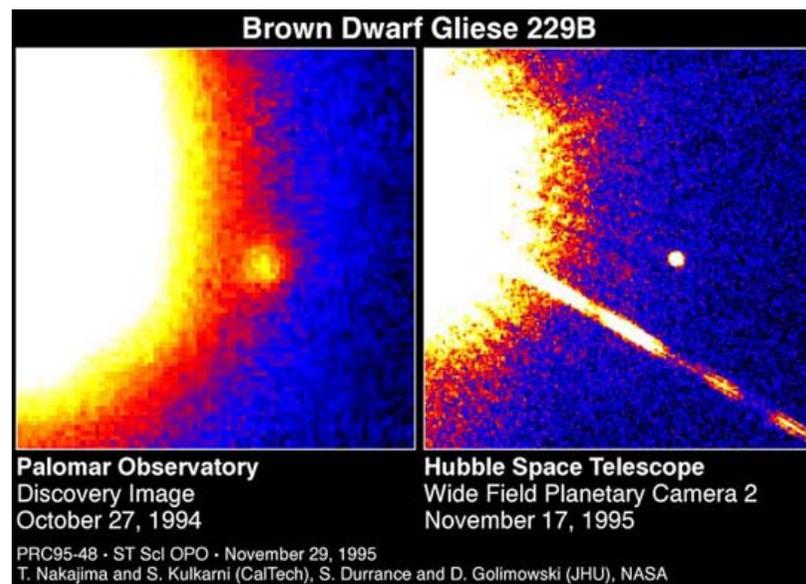
褐色矮星の歴史：観測 1

- 70年代からの探査競争
- 80年代の赤外線アレイの登場によって本格化
- Becklin & Zuckerman (1988)
 - A low-temperature companion to a white dwarf star
 - Nature, 336, 656
 - 最初のL型褐色矮星
 - Kitt Peakでも観測



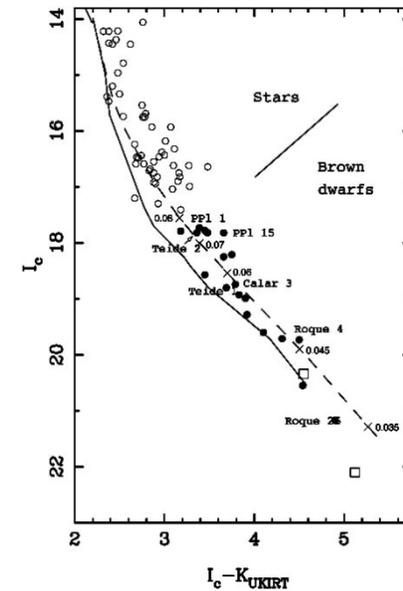
歴史：観測2（カルテクチーム）

- Nakajima et al. (1995)
 - Discovery of a Cool Brown Dwarf
 - Nature, 378, 463
 - 最初のT型褐色矮星
- Oppenheimer et al. (1996)
 - Infrared Spectrum of the Cool Brown Dwarf GL:229B
 - Science, 270, 1478



歴史：観測 3

- Rebolo et al. (1995)
 - Discovery of a Brown Dwarf in the Pleiades Star Cluster
 - Nature, 377, 129
 - 星団中の褐色矮星
- Tamura et al. (1998)
 - 星形成領域の褐色矮星
 - 最初の浮遊惑星質量天体候補
 - Science, 282, 1095
 - See also Oasa et al. 1999



Isolated and Companion Young Brown Dwarfs in the Taurus and Chamaeleon Molecular Clouds

Motohide Tamura, Yoichi Itoh,* Yumiko Oasa, Tadashi Nakajima

Infrar (YSO: colors magn surve faintn tified broww

It is possible to estimate the mass of the Taurus and Chamaeleon ELL-YSOs by the same method as described above. Assuming ages of 10^6 and 10^7 years with the DM evolutionary tracks and the tracks for the brown dwarfs and giant planets (25), we obtained the upper limit of the mass of the fainter ELL-YSOs (ITG 9C, 33B, 45B; OTS 11, 48) of $0.012 M_{\odot}$. This is below the star-brown dwarf mass boundary and is close to the giant planet mass regime ($\leq 0.013 M_{\odot}$) (25). Their J -band luminosities are comparable to or less than those of the known brown dwarfs in the Pleiades whose ages are about 10^8 years (2). Therefore, even if we take into

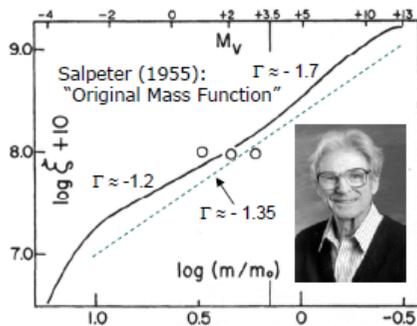
lar objects ar-infrared round four in earlier ve extreme usly iden-very young

Stellar Initial Mass Function (IMF)

1

➤ 太陽近傍の星のIMFの決定

- 太陽近傍のOBアソシエーションとフィールド星の観測から導く
- 主系列星の光度関数が観測量
- 主系列星の質量・光度関係式を用いて現在の質量関数 (present day mass function) を導く
- 星の進化を考慮して、IMFを導く



➤ Salpeter 1955: **power-law IMF**

$$\xi \sim 0.03 (M/M_{\odot})^{-1.35} \text{ stars pc}^{-3} [\log M]^{-1}$$

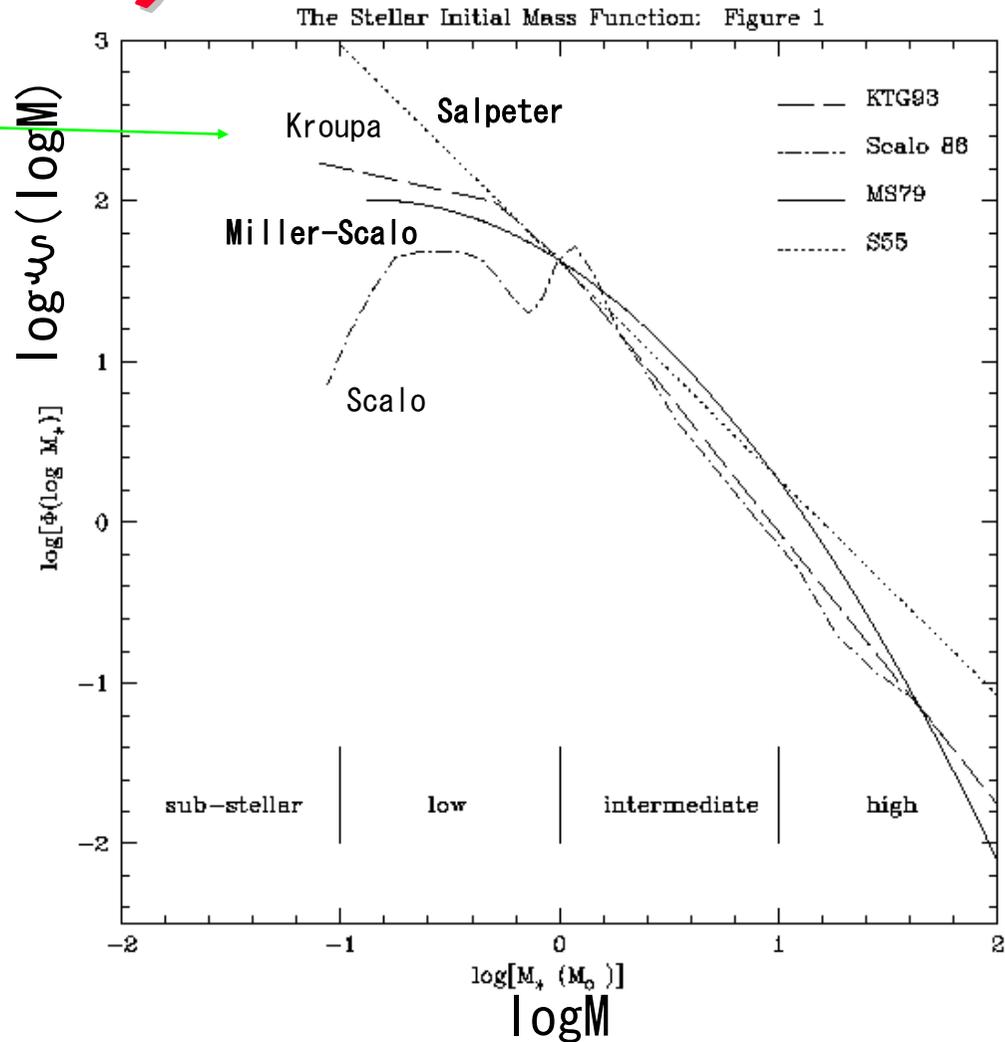
$$\Gamma = \text{IMF slope} = d[\log \xi (\log M)] / d \log M = -1.35$$

for **0.4–10 M_{\odot}** stars

- Miller & Scalo (1979), Scalo (1986): **lognormal IMF**
より広範囲の質量に適用 (**0.1–60 M_{\odot}**)

Stellar Initial Mass Function (IMF) 2

- 比較図
- $M > 5M_{\odot}$ ではほとんど power law
- $M < 1M_{\odot}$ でフラットになる
- $0.1M_{\odot} < M < 0.5 M_{\odot}$ は、増えるのか、フラットか、減るのか、まだ未決着
- いわんや $M < 0.08M_{\odot}$ をや (1995年以前は発見されてもいなかった)
- Field star IMFの欠点
 - 銀河系寿命での平均
 - 「太陽近傍」といった空間的な平均



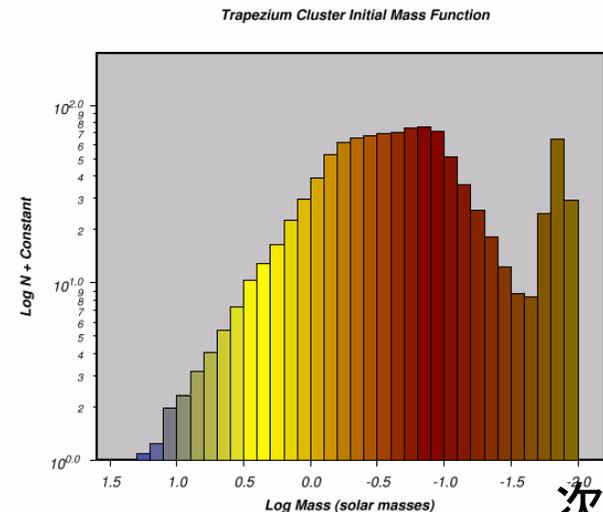
Meyer et al. 1999

Embedded Young Clusterの 観測によるIMF決定

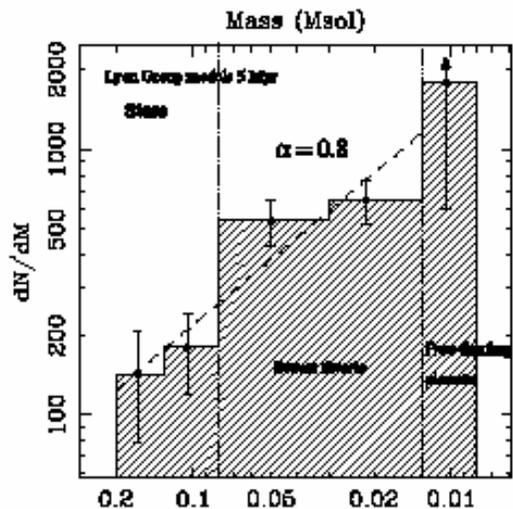
- EYCの“人口”調査からIMFを求める
 - 散開・球状星団の可視光観測によるIMF導出の赤外版
 - $dN/d\log M = (dN/dm) * (dm/d\log M)$; $M = \text{mass}, m = \text{magnitude}$
 - 星形成領域の赤外撮像 ⇒ (赤外波長での) 光度関数
 - EYCの星の年齢の導出または仮定
 - YSOの進化理論により、もしくは、観測により、導出した光度・質量関係式 (mass-luminosity relation)
-

IMFの決定に向けて：超低質量側を議論した観測例

- σ Orionis cluster
 - Bejar et al. 2001
 - $\alpha=+0.8$ (0.013–0.2 M_{\odot}) $\alpha=1-\Gamma$
- Trapezium cluster (aka. ONC)
 - Muench et al. 2000, data compile
 - $\alpha=-0.35$ (0.02–0.08 M_{\odot})
 - $\alpha=+1.25$ (0.08–0.80 M_{\odot})
 - $\alpha=+2.35$ (0.80–63.1 M_{\odot}) ←Salpeter
 - Hillenbrand et al. 2000
 - $\alpha=+0.43$ (0.02–0.15 M_{\odot})
 - Luhman et al. 2000, NICMOS
 - $\alpha=+0.7$ (0.035–0.56 M_{\odot})
- IC348
 - Najita et al.
 - $\alpha=+0.5$ (0.015–0.22 M_{\odot})
- S106
 - Oasa et al. (すばる)
 - $\alpha=+1.0$ (0.025–0.6 M_{\odot} ; variable within the region、距離不定性、背景星のコンタミ?)



次頁

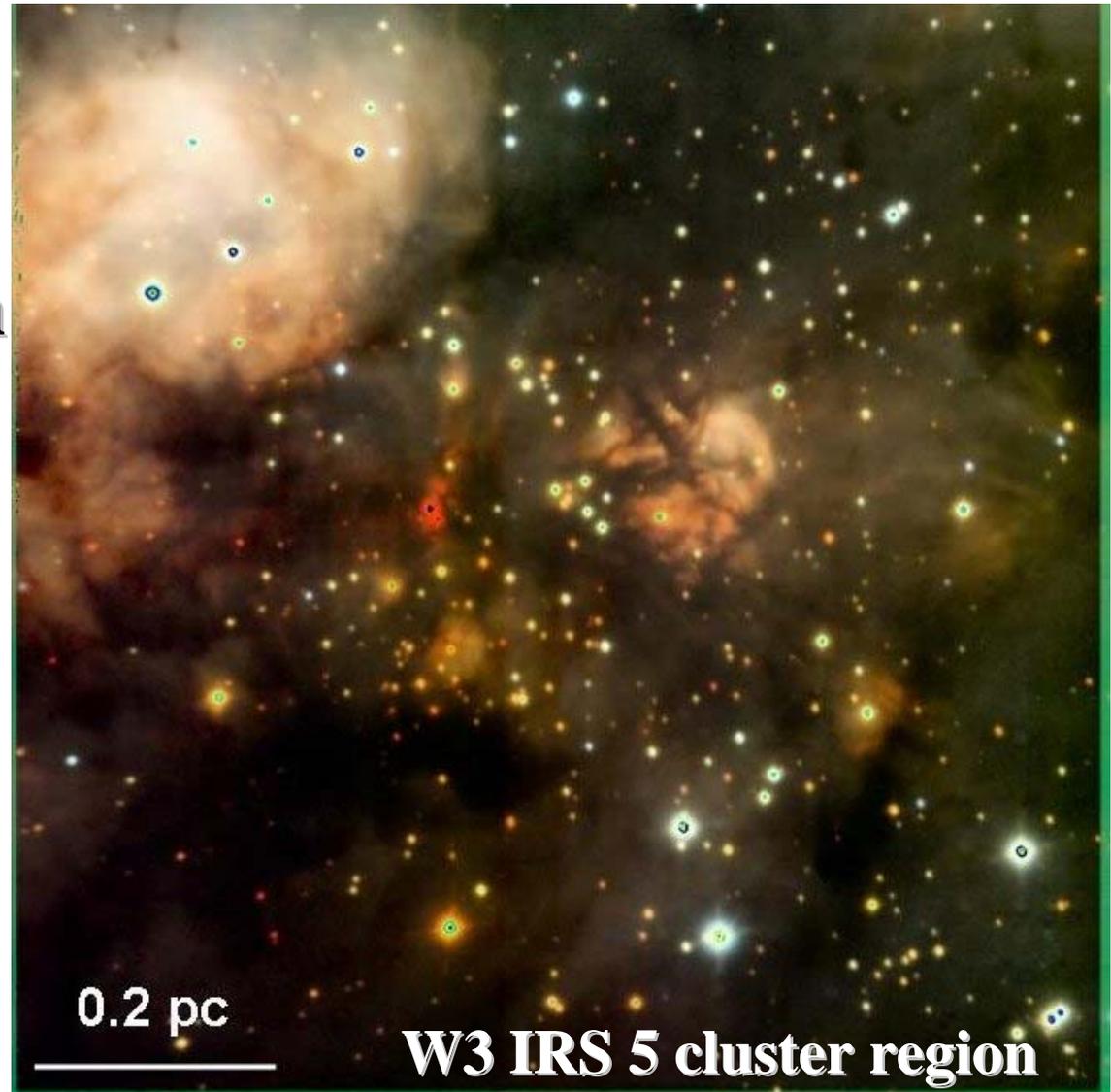


Faint end of the Luminosity Function ($< 0.1 M_{\text{sun}}$)

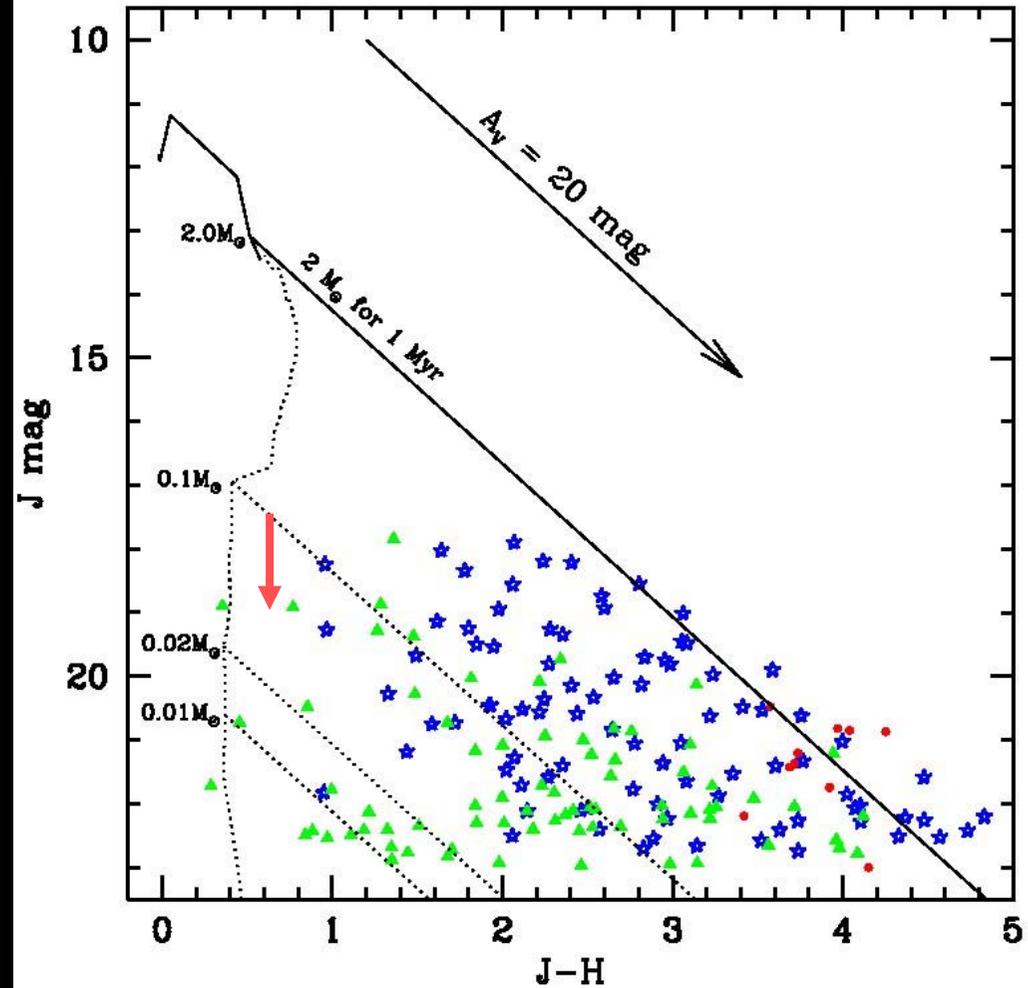
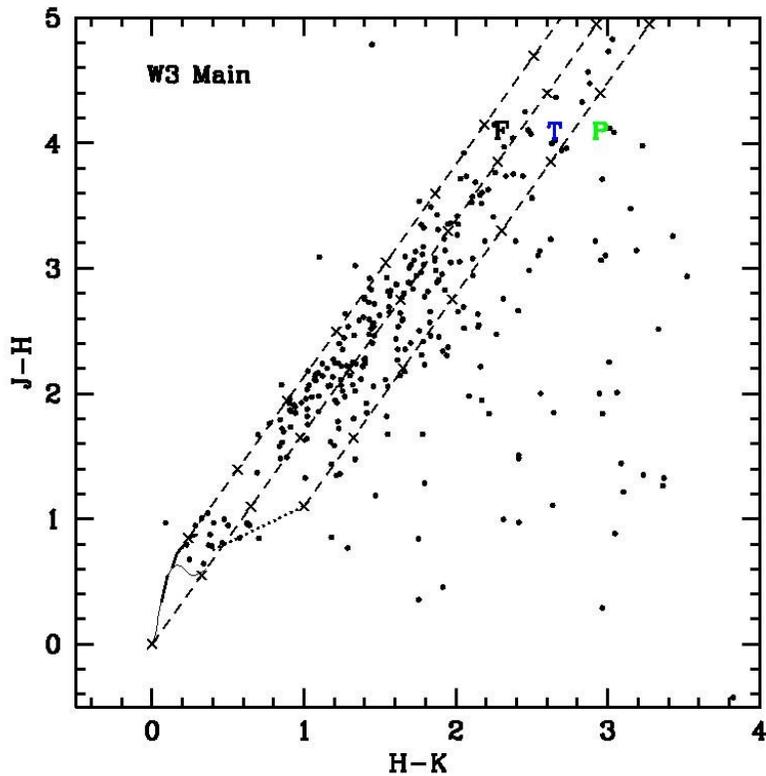
**High sensitivity
and high resolution**



**Deep JHK imaging
with SUBARU**



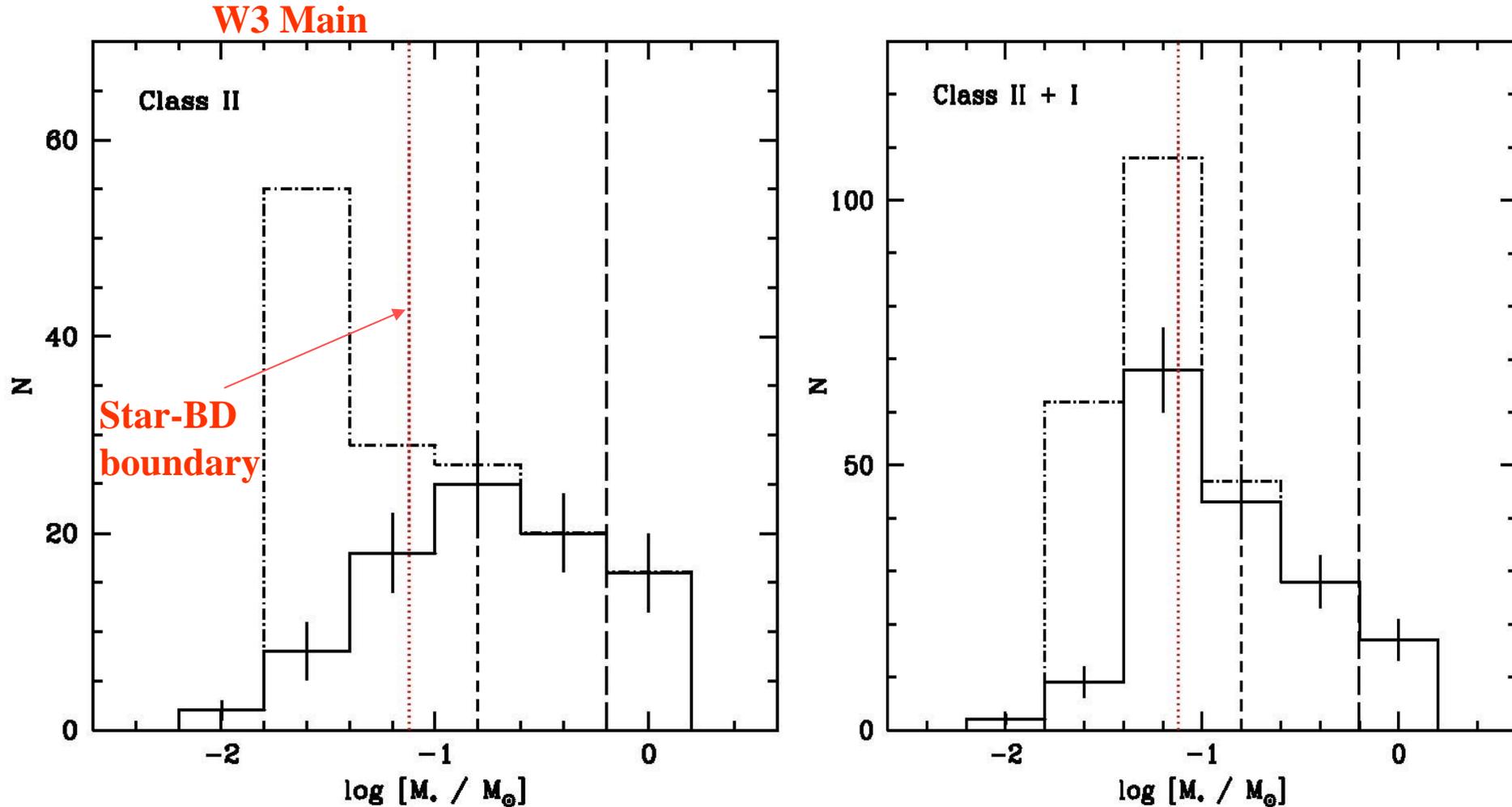
Young Brown Dwarfs in the core of W3 Main



A large number of low-mass sources below hydrogen burning limit ($M \sim 0.1 M_{\text{sun}}$) : probably young BDs and young sub-BDs

Mass Function in substellar regime

W3 Main



超低質量星の温度分類

● M型星

- $T_{\text{eff}}=3800-2500\text{K}$
- TiO, VO, H₂O, CO absorption plus metal/alkali lines.

● L型星

- $T_{\text{eff}}=2500-1400\text{K}$
- hydrides (FeH, CrH, MgH, CaH) and alkalis

● T型星

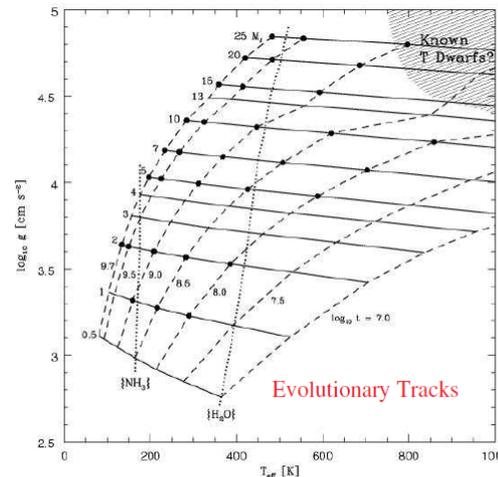
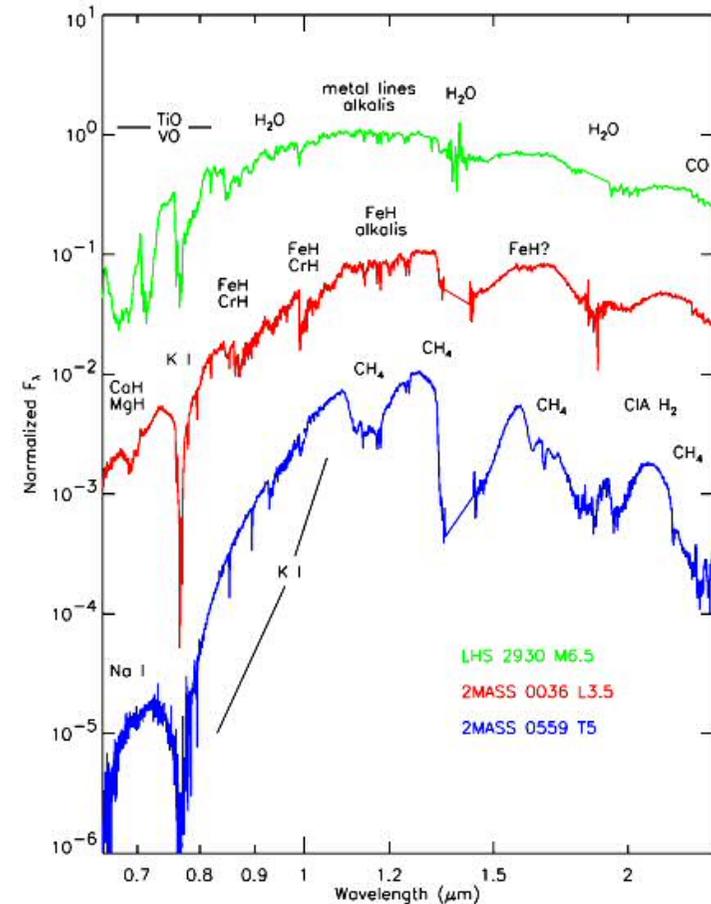
- $T_{\text{eff}}=1400-500\text{K}$
- strong CH₄ and H₂O
- $\leq 12M_{\text{JUP}}$, 10-100Myrの「惑星」に対応

● Y型星

- $T_{\text{eff}} < 500\text{K}$
- H₂O cloud形成

● その先

- $T < 160\text{K}$
- NH₃ cloudの形成



UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS)

とは？



Casali et al 2007

- ・ WFCAMで7500平方度をサーベイする
- ・ UKIDSSは5つのサーベイからなる
 - ・ **Large Area Survey (LAS)**
 - 4000 sq. degs, $K=18.4$
 - ・ Galactic Plane Survey (GPS)
 - 1800 sq. degs, $K=19$
 - ・ Galactic Clusters Survey (GCS)
 - 1400 sq. degs $K=18.7$
 - ・ Deep Extragalactic Survey (DXS)
 - 35 sq. degs, $K=21.0$
 - ・ Ultra Deep Survey (UDS)
 - 0.77 sq. degs, $K=23.0$

日英協力のひとつ

観測と結果：3天体

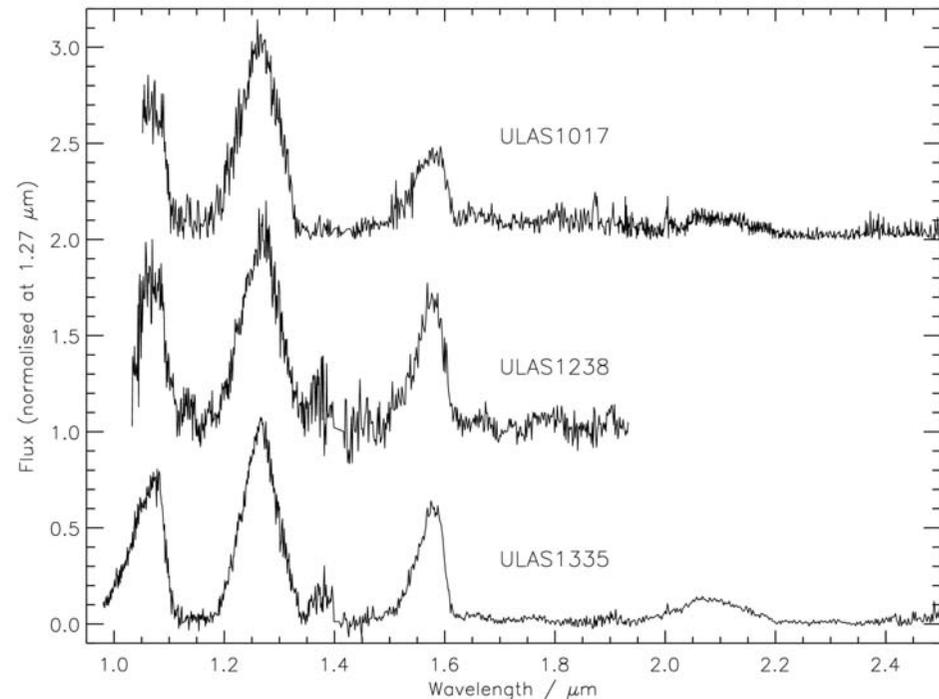
- 測光

- UKIRT & UFTI
- WHT & LIRIS
- NTT & EMMI
- Spitzer (ULAS1335)

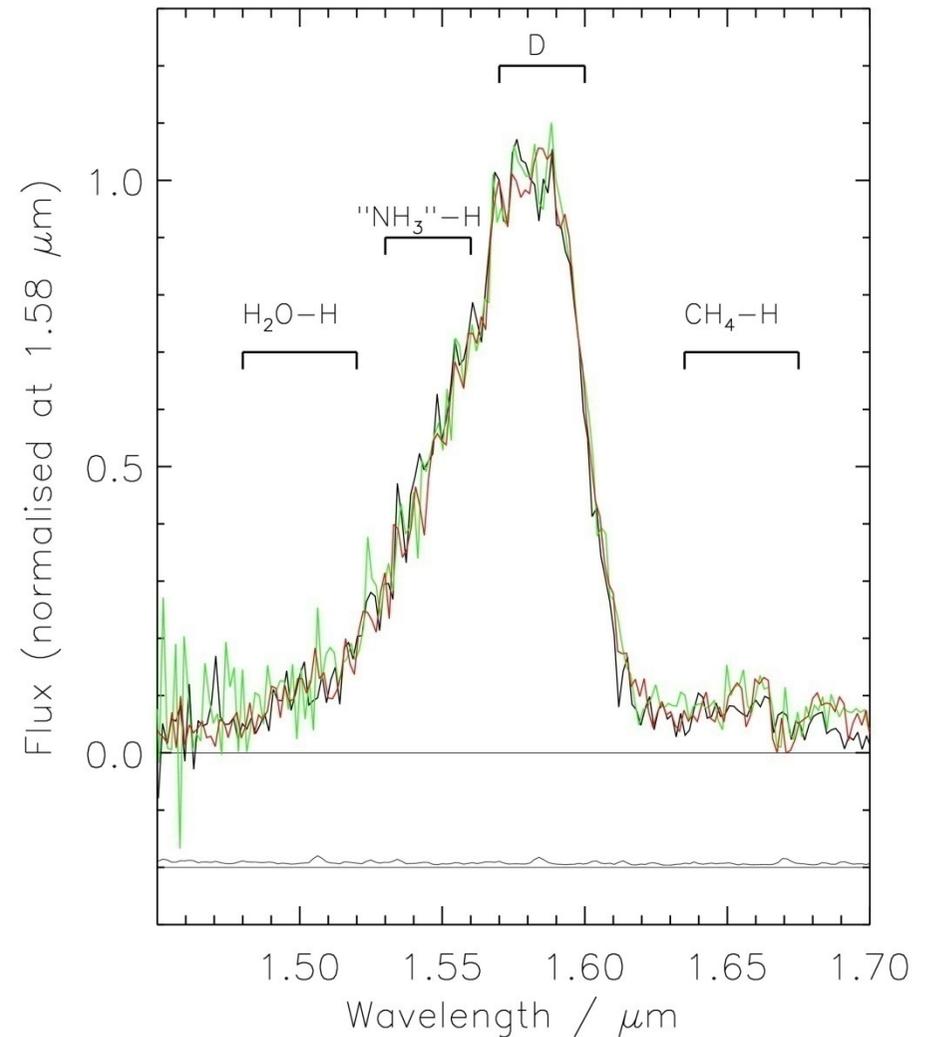
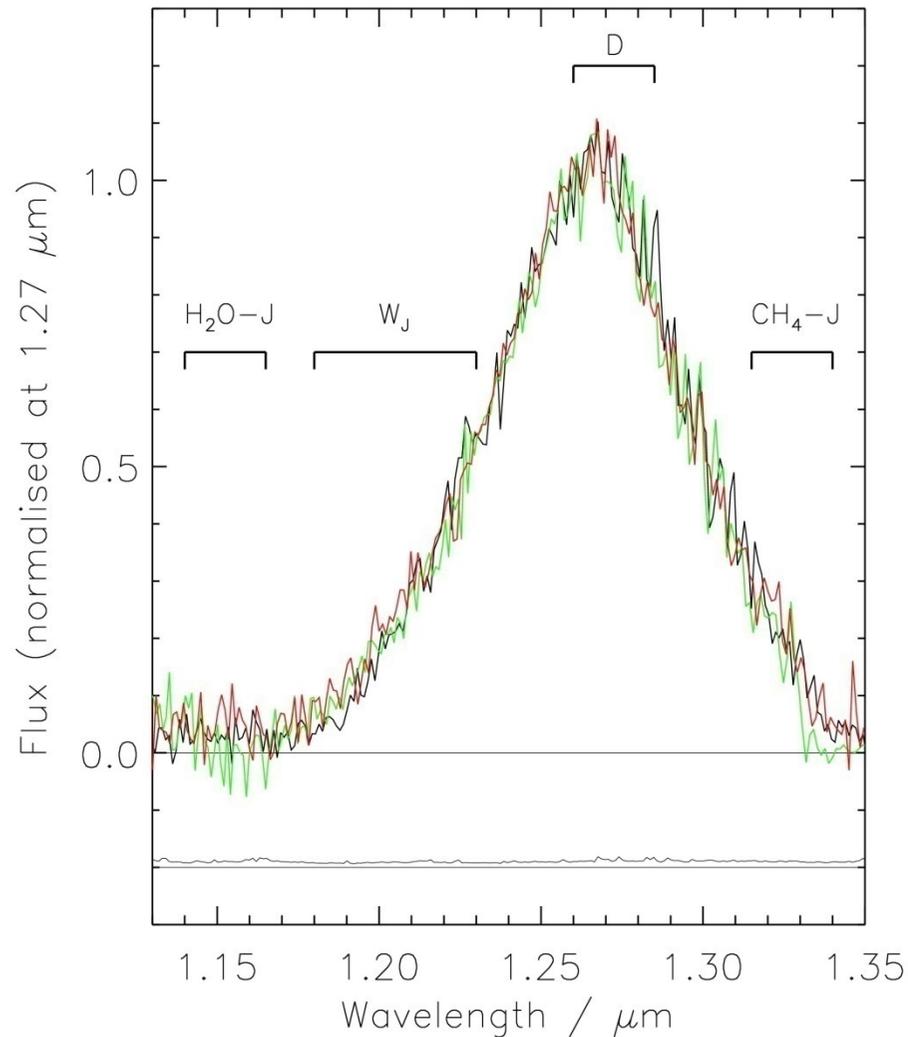
	Y	J	H	K
ULAS1017	19.72	18.57	19.38	19.01
ULAS1238	19.55	18.78	19.25	---
ULAS1335	18.70	17.90	18.15	18.47

- 分光

- Subaru & IRCS
- Gemini & NIRI



スペクトル分類: 近赤外インデックス(指標)の定義

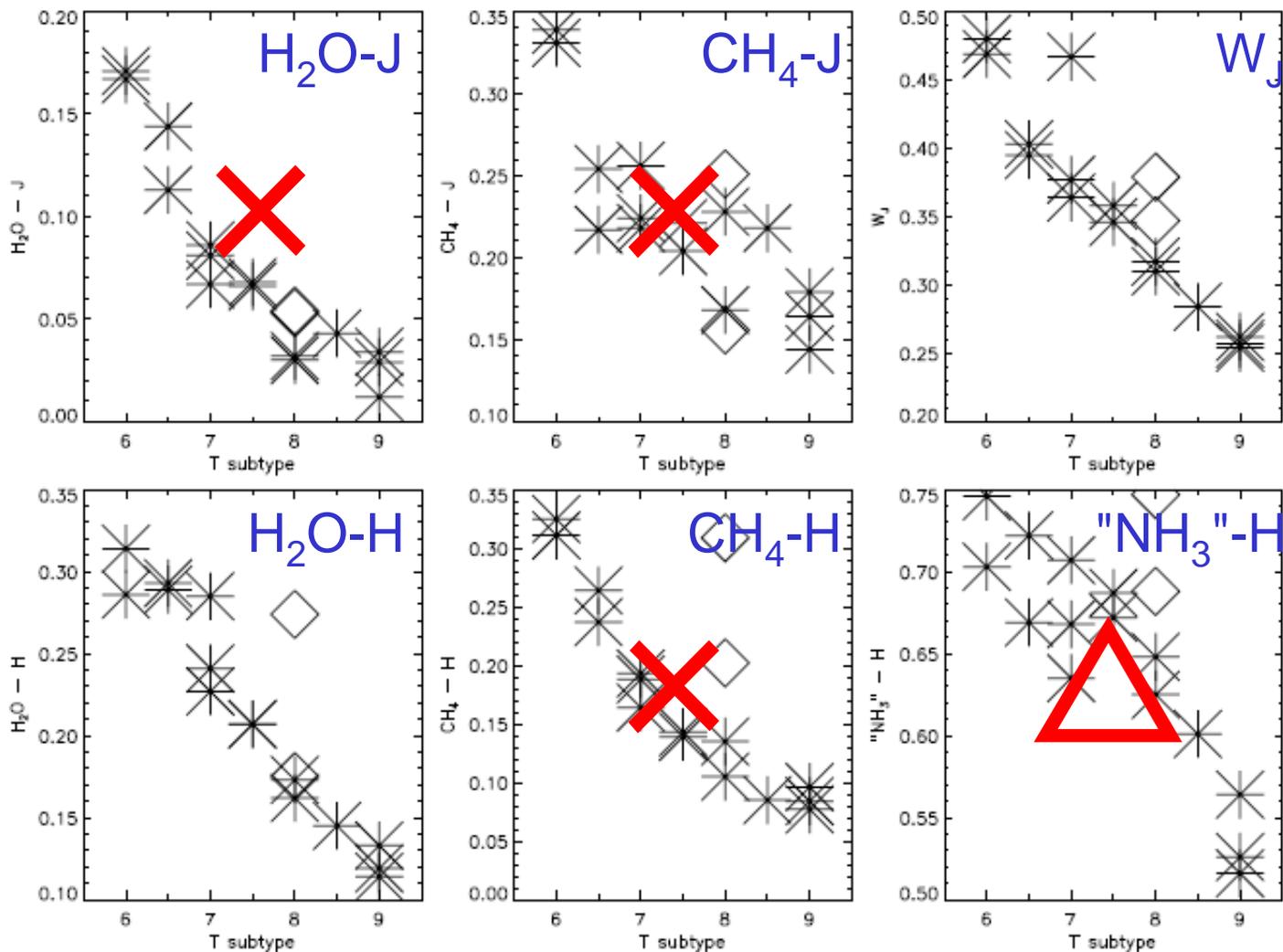


$$W_J = F(1.18-1.23 \mu\text{m}) / 2F(1.26 - 1.285 \mu\text{m})$$

$$\text{NH}_3 - \text{H} = F(1.53-1.56 \mu\text{m}) / F(1.57 - 1.60 \mu\text{m})$$

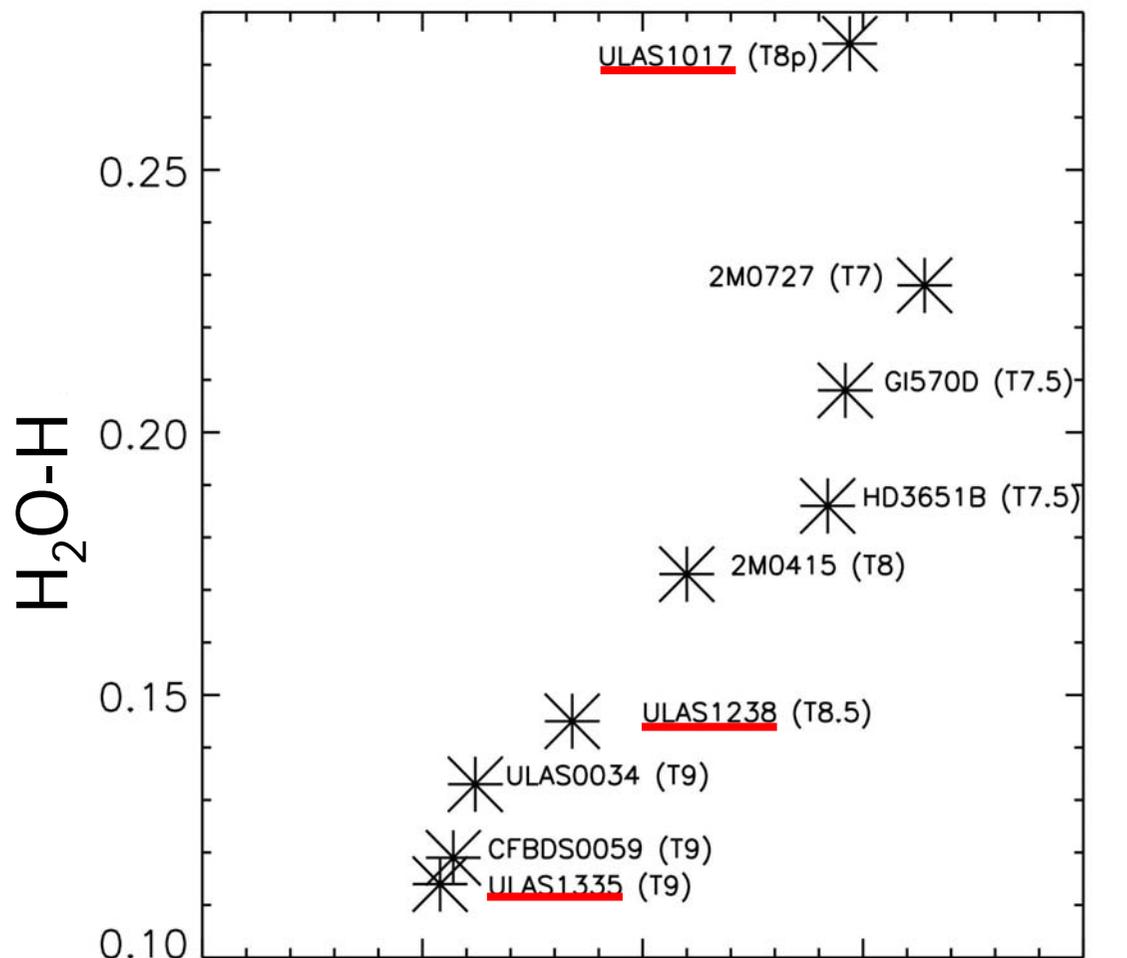
黒 = ULAS1238 (T8.5), 緑 = ULAS0034 (T9),
赤 = 2MASS0415 (T8)

スペクトル分類： 近赤外インデックスの比較



◇はpeculiar type (バンドによって推定クラスが異なる)

スペクトル分類： W_J と H_2O-H によるT9型星の定義



近赤外波長では
 W_J インデックスと
 H_2O-H インデックスが
最も良い指標。

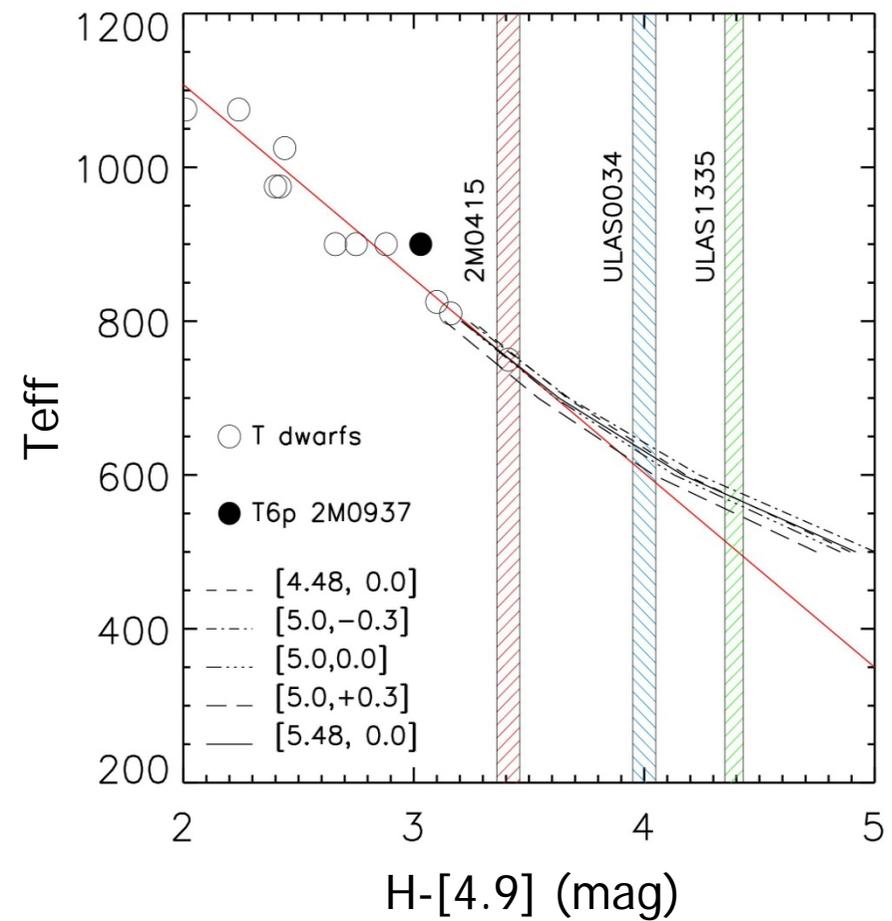
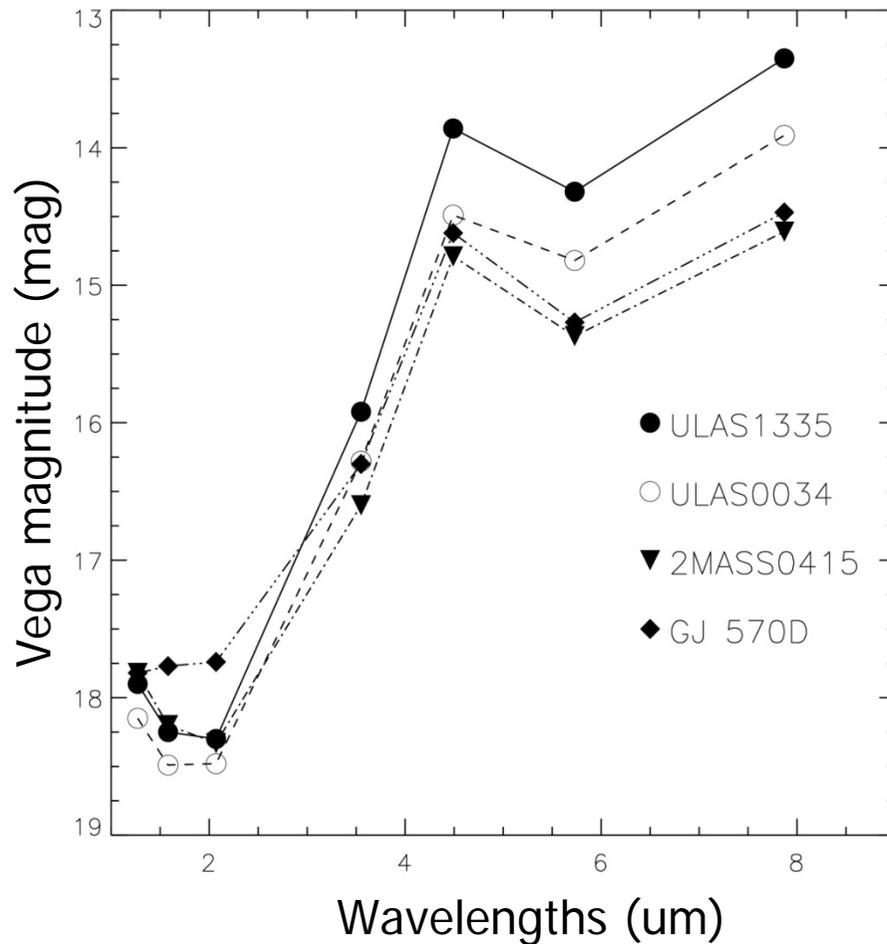
今回観測した
ULAS1335は
ULAS0034や
CFBDS0059と併せて
「T9」型
と初めて分類した。

ULAS1017はT8p
ULAS1238はT8.5

W_J

$W_J < 0.28, H_2O-H < 0.14$

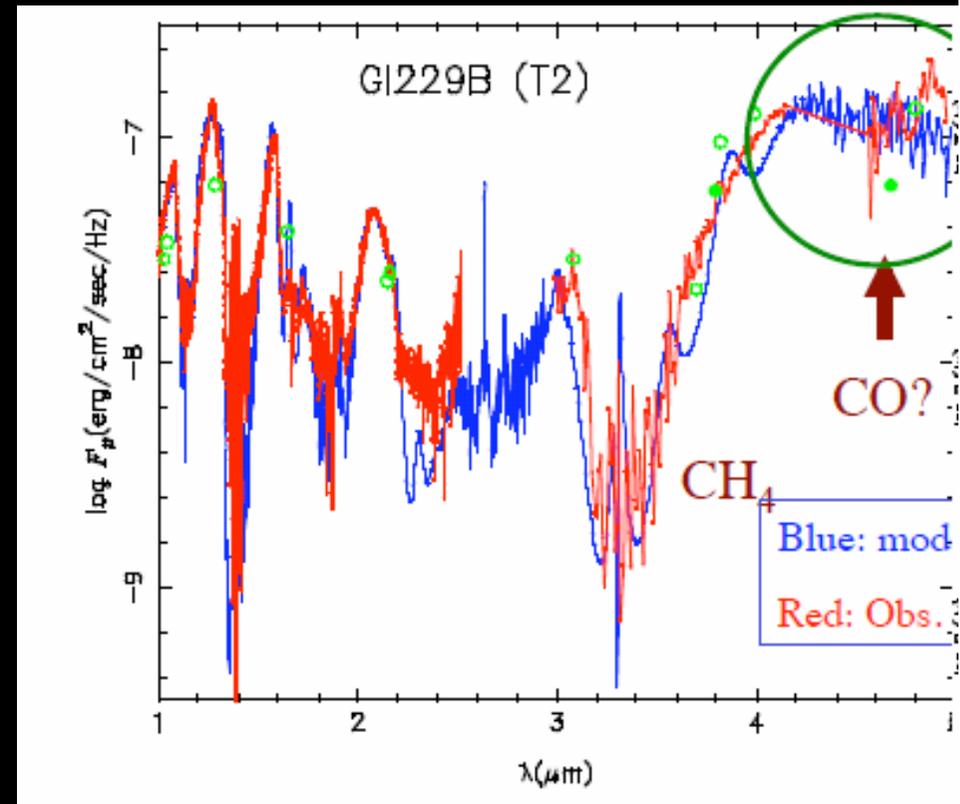
ULAS1335: 最低温度星



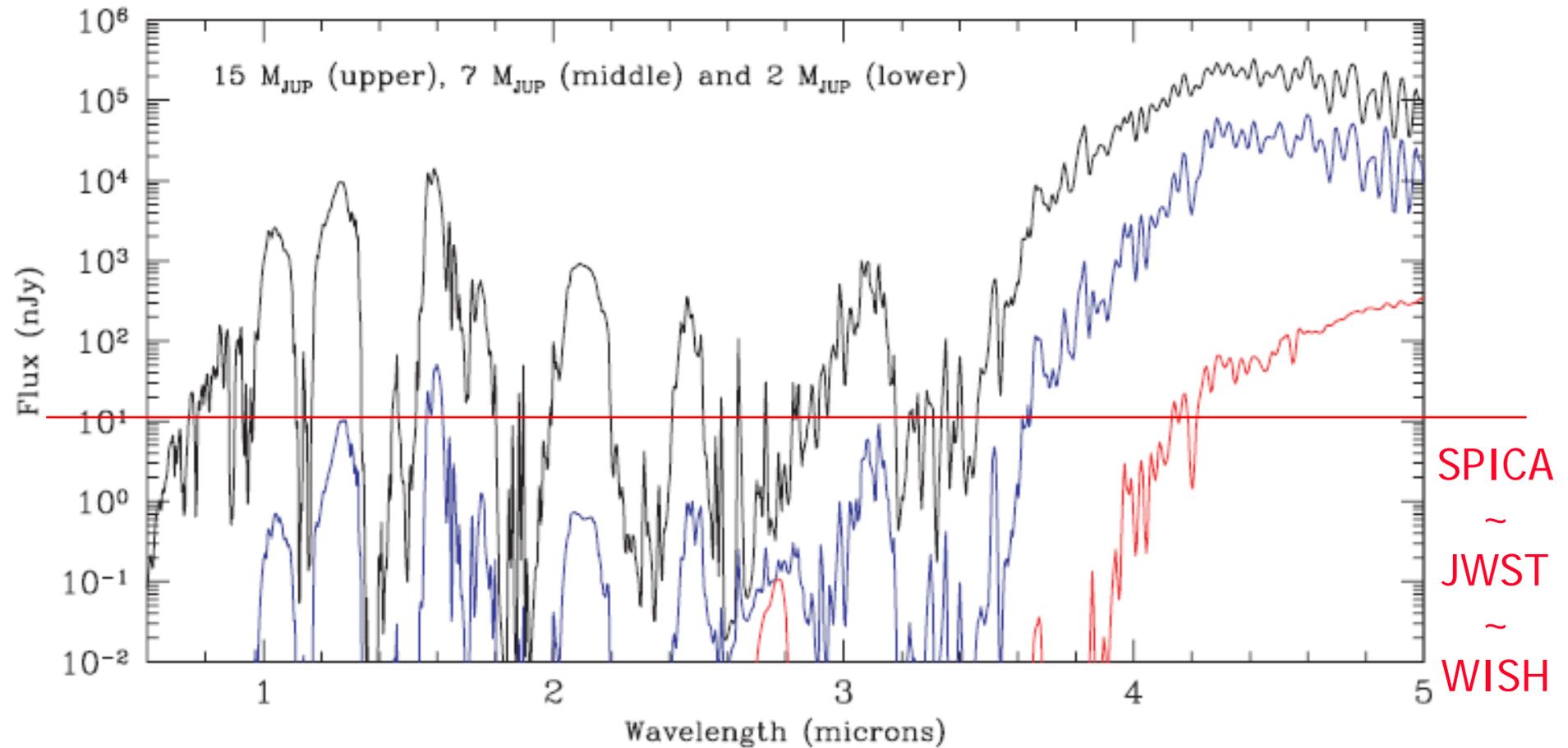
- ULAS1335はWJ/H2Oインデックスからも最低温度
- ULAS1335はULAS0034より赤い H- [4.49] カラー
 - 既知のT dwarfで最も赤い
- $T_{\text{eff}} \sim 550\text{K}$: これまでで最低温度星

Very Cool Object Surveys

- ◆ Filter selection is crucial.
- ◆ According to Akari data on T dwarfs;
 - ◆ 3.3 micron
 - ◆ deepest methane
 - ◆ 4.1 micron
 - ◆ opacity free zone
 - ◆ 4.7 micron for WISE?
- ◆ Resolution is not crucial.
- ◆ Grism spectroscopy?
 - ◆ SPICA FPC-S?



Model Spectra (OPT-NIR)



10 pc, 5 Gyr (Gardner et al. 2006)

WISE vs. WISH

	WISE	WISH
telescope/fov/ λ λ	0.4m/47'/3-23um	1.5m/TBD/1-5um
survey area	~41253 sq.deg.	~100 sq.deg.
sensitivity	~100 microJy	~10 nanoJy
distance factor	1	100(= $\sqrt{100000/10}$)
volume factor	1x41253	100x100
gain	1	0.2(= $10000/41253$)
expected number of BDs	~1000(T<750K) ~200 (T<500K) ~10 (T<300K)	WISEx0.2

But "deepness" is critical for nearby very cold objects.

本日の話のまとめ

- 褐色矮星、超低温度星の簡単なレビューと最近の地上観測のまとめを行った。
- WISHにより、星形成領域のYSOのIMFを超低質量天体側まで決めることは確実なサイエンスとなる。JWST/SPICAに比べ解像度の問題あり。
- WISHによる広域サーベイにより、近傍の超低温度星の探査とそれらのMFを求める。
- TMT/SPICAによるフォローアップ分光のためのターゲットを提供できる。
- このサイエンスのためには、なるべく広域の（～1000平方度）にできれば良い。