



TOHOKU  
UNIVERSITY



東北大学

学際科学フロンティア研究所

Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences

# 赤外線アストロケミストリーの展望

下西 隆

(東北大学 学際科学フロンティア研究所 / 理学部天文学教室)

アストロケミストリー【Astrochemistry】①宇宙における化学現象の理解を通して物質の生成・進化の歴史を解き明かす学問。「私は—を学びたい」②原子・分子の化学的性質をツールとして天体の諸性質を理解する学問。「ここは思い切つて—だ」③天文学・化学・物理学・惑星科学などの広範囲にまたがる学際領域分野。「迷ったら—とっておく」④宇宙化学・星間化学・天体化学。

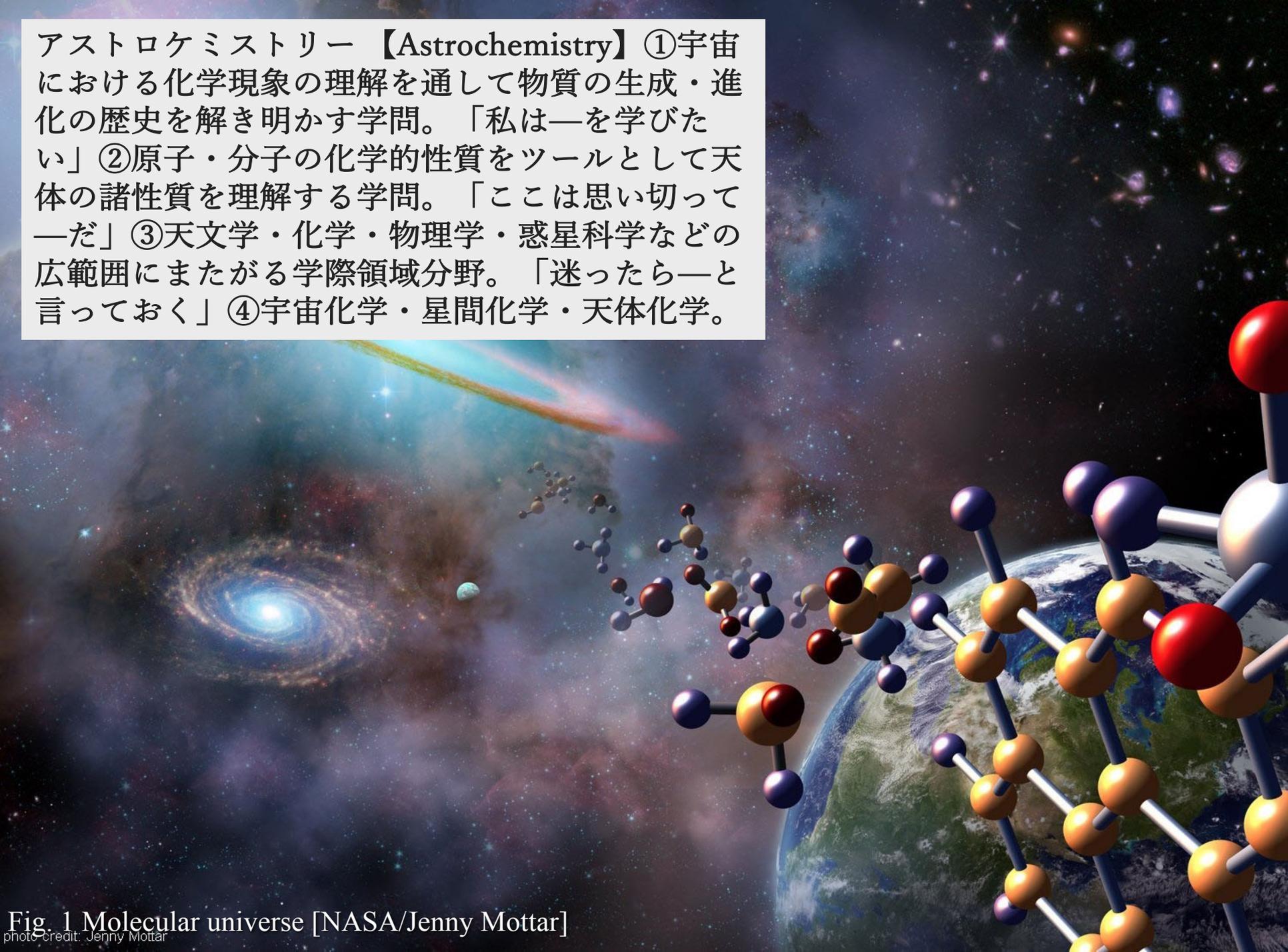


Fig. 1 Molecular universe [NASA/Jenny Mottar]  
photo credit: Jenny Mottar

# 赤外線アストロケミストリー

- 氷・ダスト・PAHの観測
- 電波では見えない分子ガス( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ , etc.)の観測
- 高温領域( $>500K$ )の分子ガスの観測

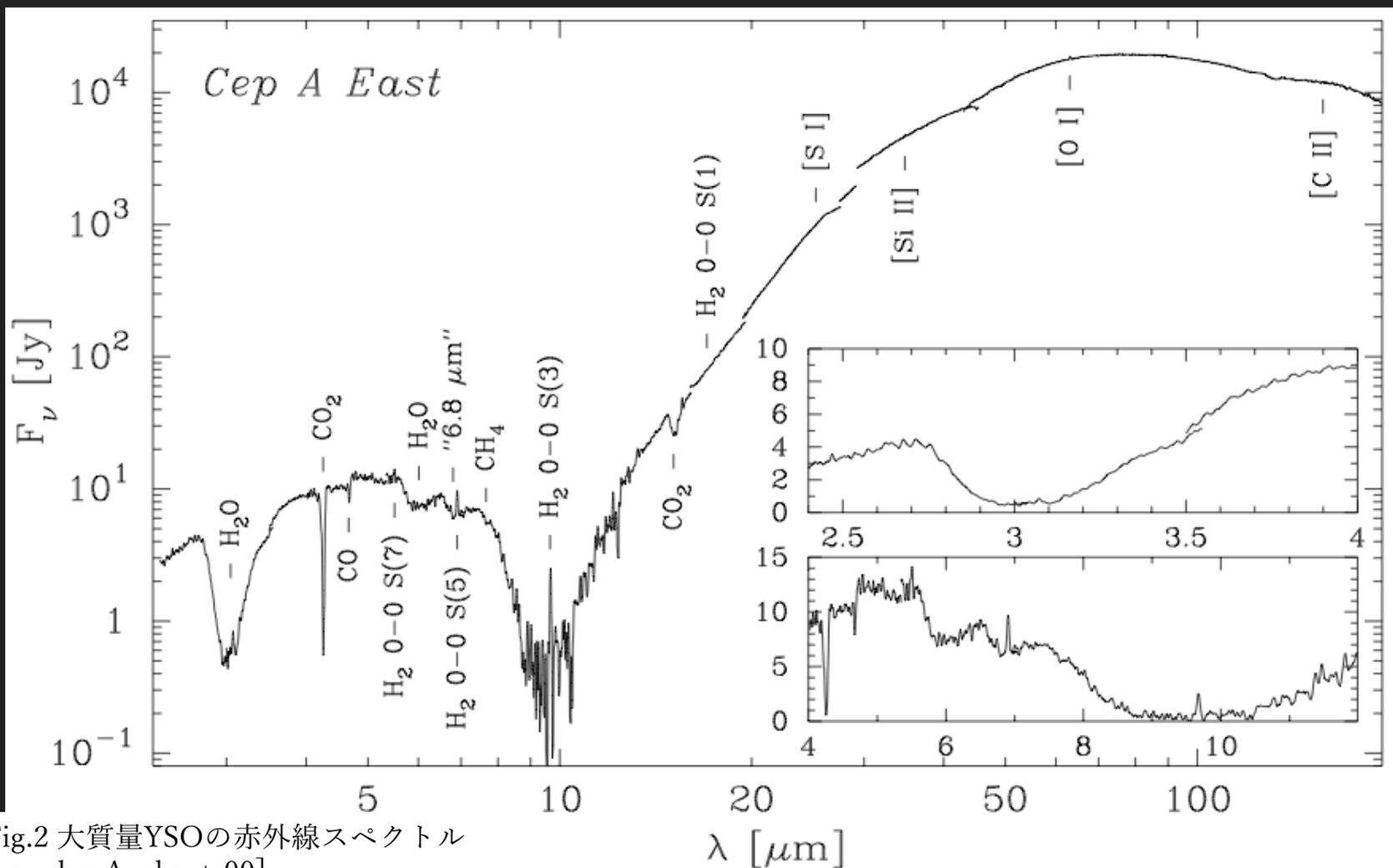
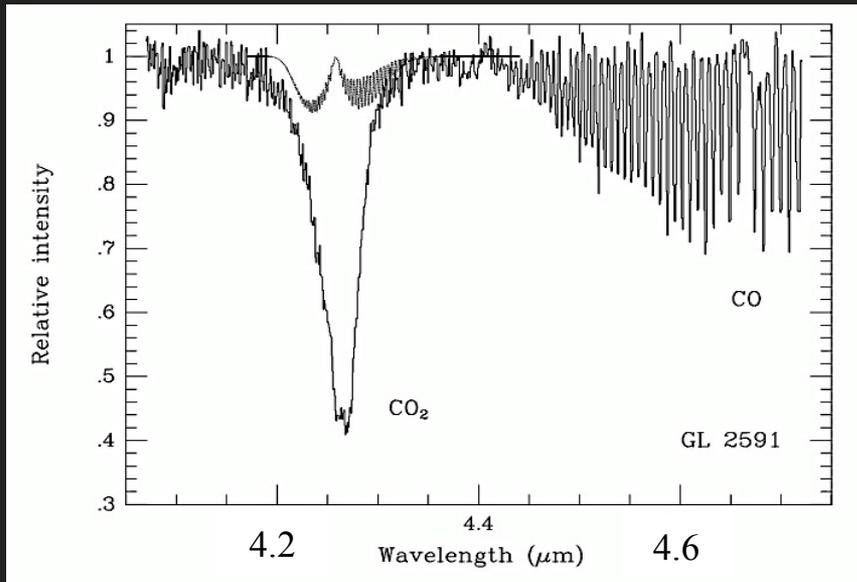


Fig.2 大質量YSOの赤外線スペクトル  
[van den Ancker+ 00]

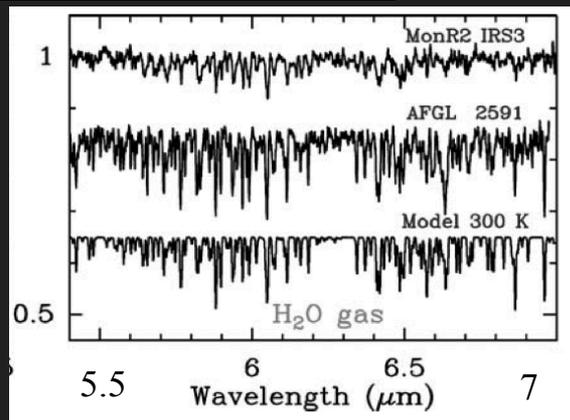
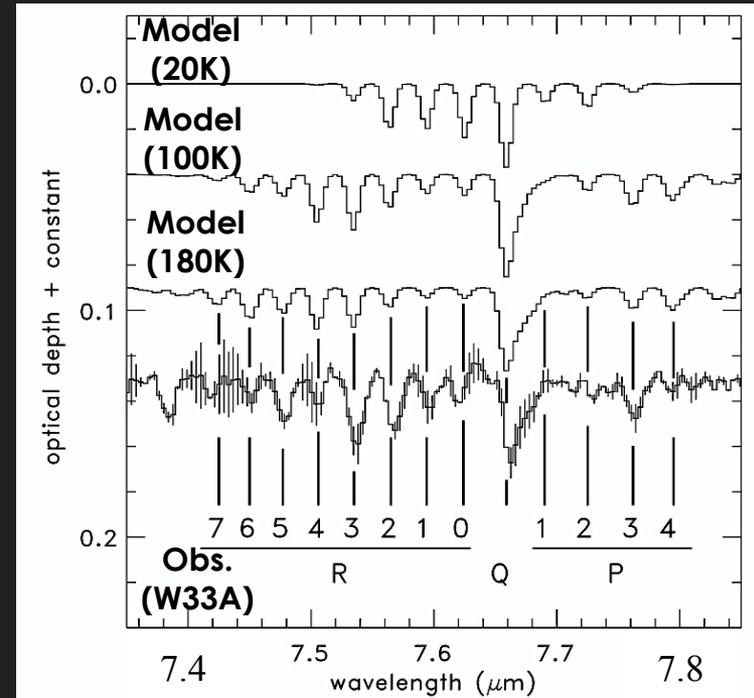
# 赤外線アストロケミストリー

- 氷・ダスト・PAHの観測
- 電波では見えない分子ガス(H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, etc.)の観測
- 高温領域(>500K)の分子ガスの観測

CO<sub>2</sub>  $\nu_3$  and CO  $\nu_1$  ro-vibrational line



CH<sub>4</sub>  $\nu_2/\nu_4$  ro-vibrational line



H<sub>2</sub>O  $\nu_2$  ro-vibrational line

Fig.3 赤外線域の分子ガスバンド  
[van Dishoeck+ 96, 04, Boogert+ 98 ]

# 赤外線アストロケミストリー

- 氷・ダスト・PAHの観測
- 電波では見えない分子ガス(H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, etc.)の観測
- 高温領域(>500K)の分子ガスの観測

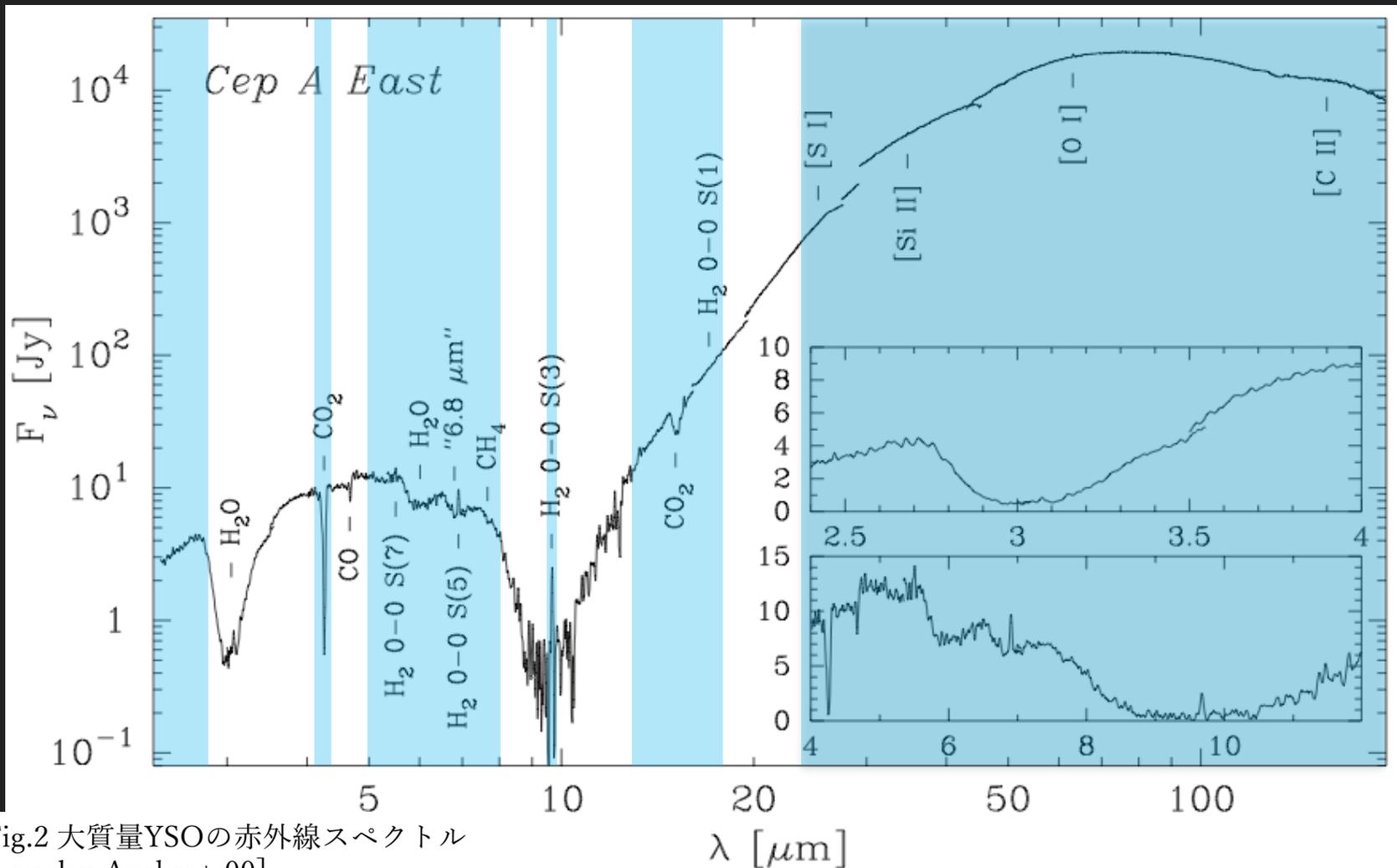


Fig.2 大質量YSOの赤外線スペクトル  
[van den Ancker+ 00]

# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

- 1980年代以前 (ISO以前)
  - 地上望遠鏡によるH<sub>2</sub>O (3 μm), CO ice (4.7 μm)の検出 (e.g., Leger+ 79; Geballe+ 86; Smith+ 89; Whittet+ 88,89; Tanaka+ 90, Sato+ 90)
  - 気球搭載望遠鏡(KAO)による中・遠赤外線氷バンド(5–8, 40–70 μm)の検出 (e.g., Tielens+ 84; Omont+ 90)
  - IRASによるCO<sub>2</sub> iceの検出 (d’Hendecourt & de Muizon 89)
  - 実験・ダスト表面反応モデルの黎明期 (e.g., Allamandora +88; Tielens+ 82)

## 探査・分類の時代

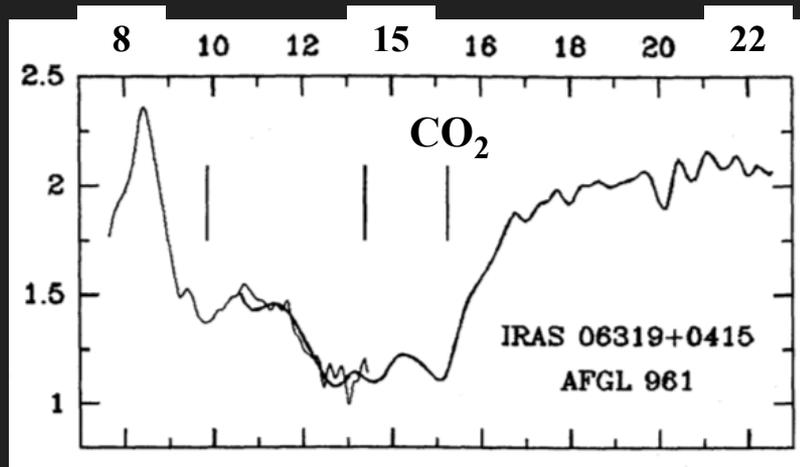
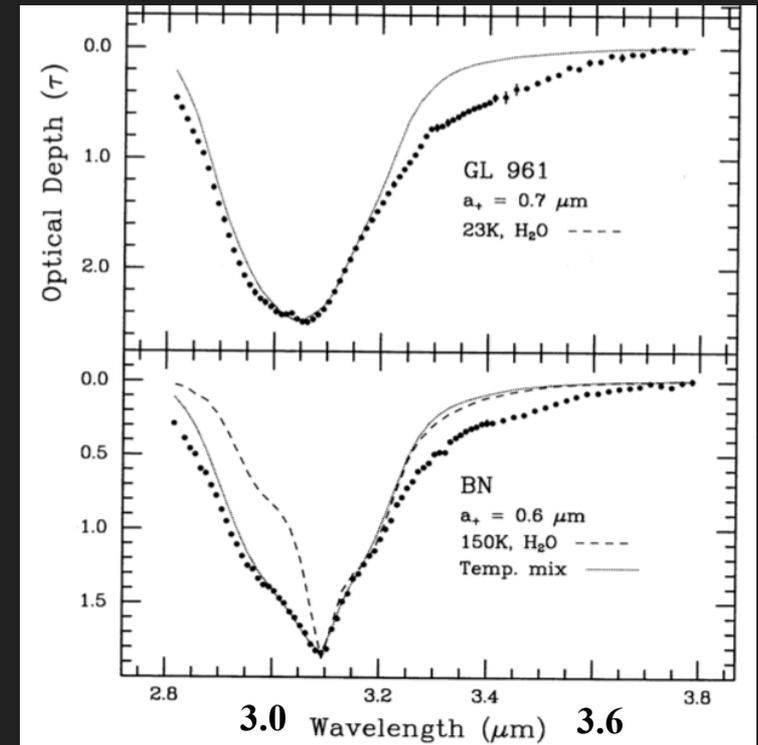


Fig. 4 (上) IRAS-LRSによる大質量YSOの15.2 μm CO<sub>2</sub> ice バンドの検出 [d’Hendecourt & de Muizon 89]. (右)大質量YSOの3 μm H<sub>2</sub>O ice バンド[Smith+ 89]



# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

## ● 1990年代 (ISO)

- ISOによる $\text{H}_2\text{O}$ ,  $^{12/13}\text{CO}_2$ ,  $^{12/13}\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  ice (2–20  $\mu\text{m}$ )の系統的観測 (主なターゲットは大質量YSO) (e.g., Gerakines+ 99; Boogert+ 97, 00, Whittet+ 97, 98; Dartois+ 01; also see review by van Dishoeck & Black 98; Gibb+ 04)
- 実験データの充実化 (e.g., Gerakines+ 95,96; Ehrenfreund+ 96)
- 大質量YSOにおける赤外線分子ガスバンド( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.)の検出 (Lacy+ 91; Boogert +98; Gonzalez-Alfonso +02; Boonman+ 03)

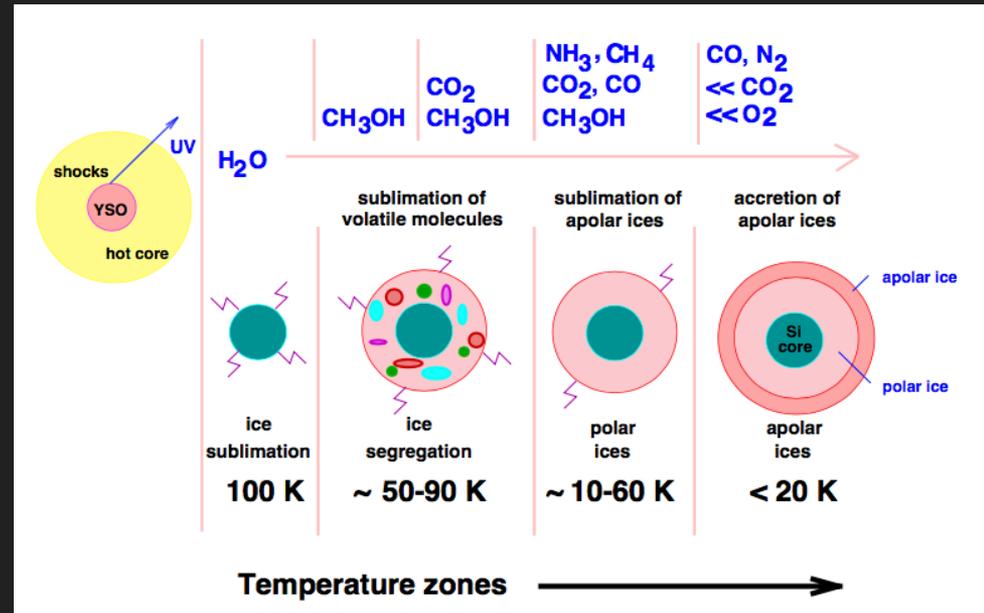
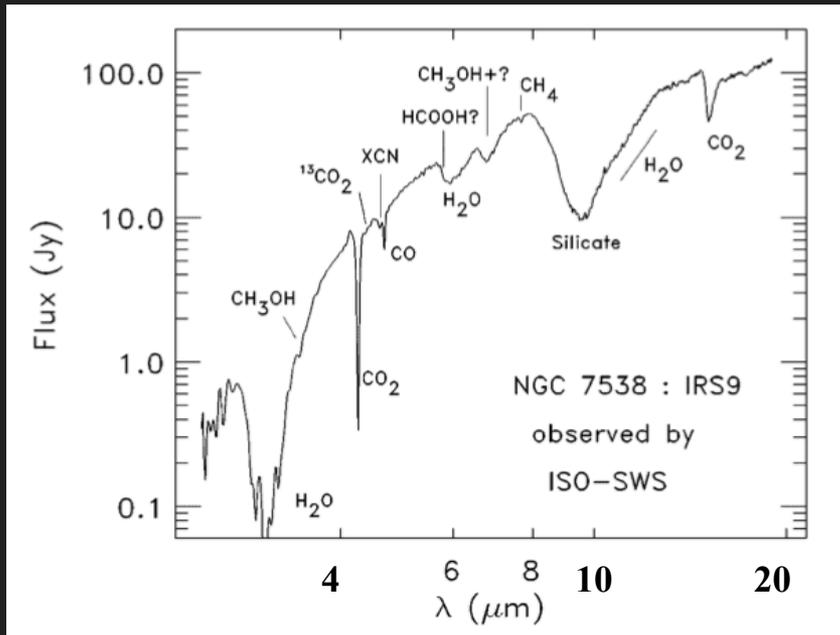


Fig. 5 (左) ISO-SWS による埋もれた大質量YSOの赤外線スペクトル [van Dishoeck & Blacke 98; ]. (右) 大質量YSO周囲の化学構造 [Ehrenfreund+ 98].

# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

## ● 1990年代 (ISO)

- ISOによる $\text{H}_2\text{O}$ ,  $^{12/13}\text{CO}_2$ ,  $^{12/13}\text{CO}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  ice (2–20  $\mu\text{m}$ )の系統的観測 (主なターゲットは大質量YSO) (e.g., Gerakines+ 99; Boogert+ 97, 00, Whittet+ 97, 98; Dartois+ 01; also see review by van Dishoeck & Black 98; Gibb+ 04)
- 実験データの充実化 (e.g., Gerakines+ 95,96; Ehrenfreund+ 96)
- 大質量YSOにおける赤外線分子ガスバンド ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , etc.)の検出 (Lacy+ 91; Boogert +98; Gonzalez-Alfonso +02; Boonman+ 03)
- 中小質量星についても少しずつ氷の観測が進む (e.g., Nummelin+ 01)
- 地上観測の進展による $\text{CO}$ 及び $\text{CH}_3\text{OH}$  iceの詳細研究 (e.g., Chiar+ 98; Allamandola +92, Brooke +99)
- 彗星氷及び星間氷の化学的類似性の指摘 (e.g., review by Mumma 97, Ehrenfreund & Schutte 00, Ehrenfreund & Charnley 00)
- ダスト鉱物学の発展・多様な天体に対するUIRバンドの観測
- 晩期型星における氷・分子ガス ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{HCN}$ , )の検出 (e.g., Sylvester+ 99; Justtanont+ 96; Cami+ 97; Hron+ 98; Yamamura+99ab)



定量化・モデル化・手法確立の時代

# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

- 2000年代 (Spitzer・AKARI・地上8m級望遠鏡)
  - 中小質量YSO・分子雲背景星への氷観測の本格的な拡張 (e.g., Boogert+ 08,11; Pontoppidan+08; Oberg+ 08,11; Bottinelli+ 10; Whittet+ 07,11; Aikawa+ 12, Noble+ 13,17)
  - 彗星のサーベイ観測 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) (e.g., Otsubo+ 2012)
  - 原子惑星系円盤内, 中心星から数AU付近の高温ガス ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{OH}$ ) の観測 (e.g., Carr & Najita 08,11; Salyk+ 08)

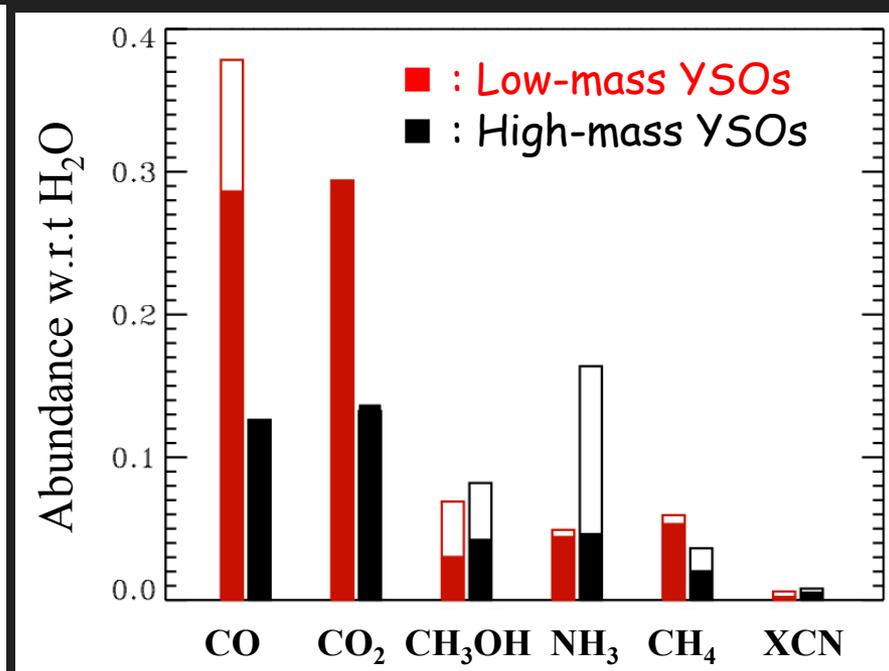
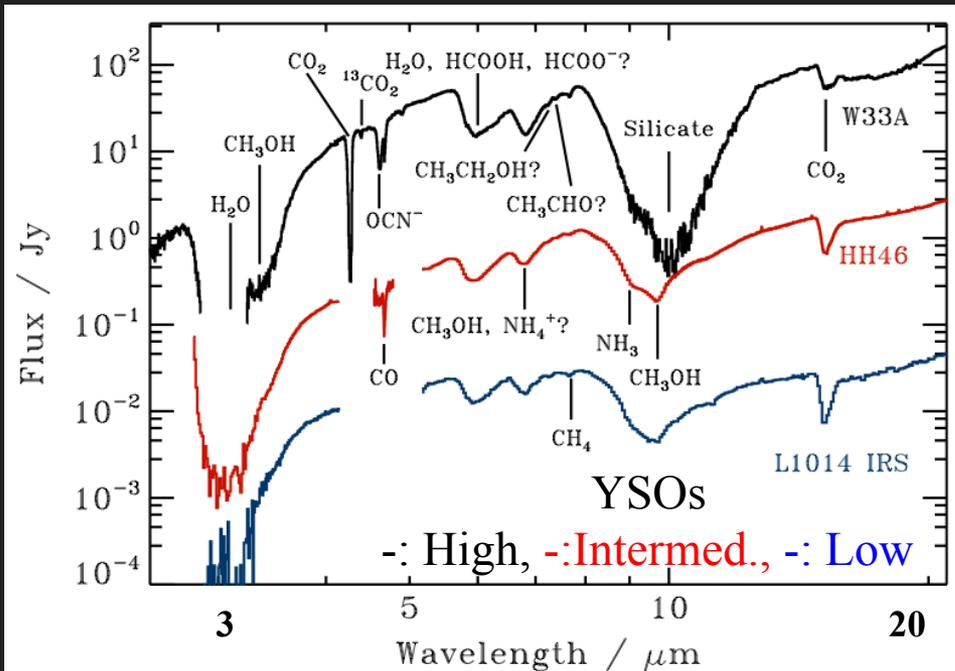


Fig.6 (左) 大中小質量YSOの赤外線スペクトル.

(右) 原始星周囲の氷の典型的な存在比

[Oberg+ 2011].

# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

- 2000年代 (Spitzer・AKARI・地上8m級望遠鏡)
  - 中小質量YSO・分子雲背景星への氷観測の本格的な拡張 (e.g., Boogert+ 08,11; Pontoppidan+08; Oberg+ 08,11; Bottinelli+ 10; Whittet+ 07,11; Aikawa+ 12, Noble+ 13,17)
  - 彗星のサーベイ観測 ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) (e.g., Otsubo+ 2012)
  - 原子惑星系円盤内, 中心星から数AU付近の高温ガス ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{OH}$ ) の観測 (e.g., Carr & Najita 08,11; Salyk+ 08)

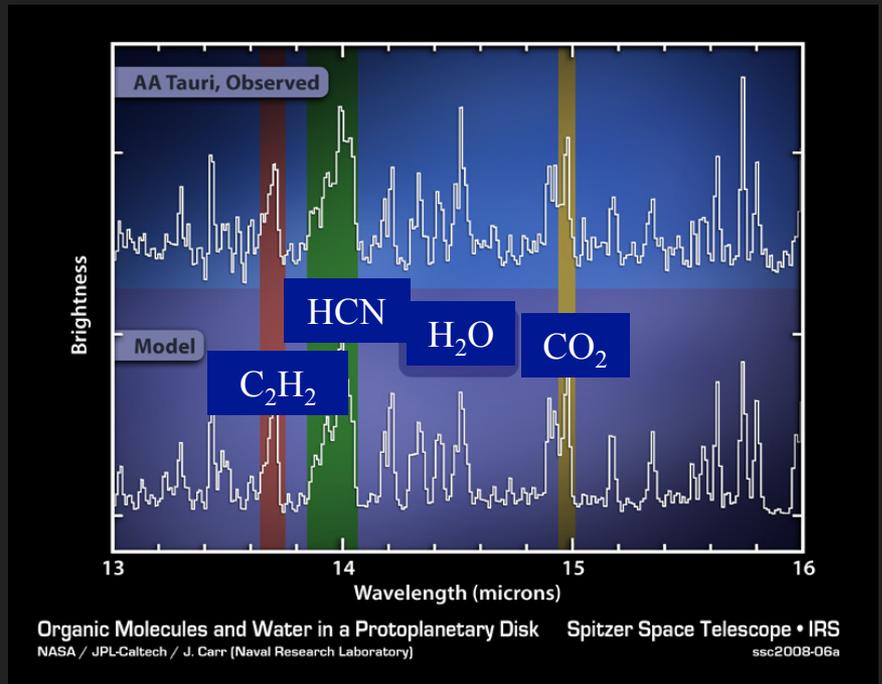
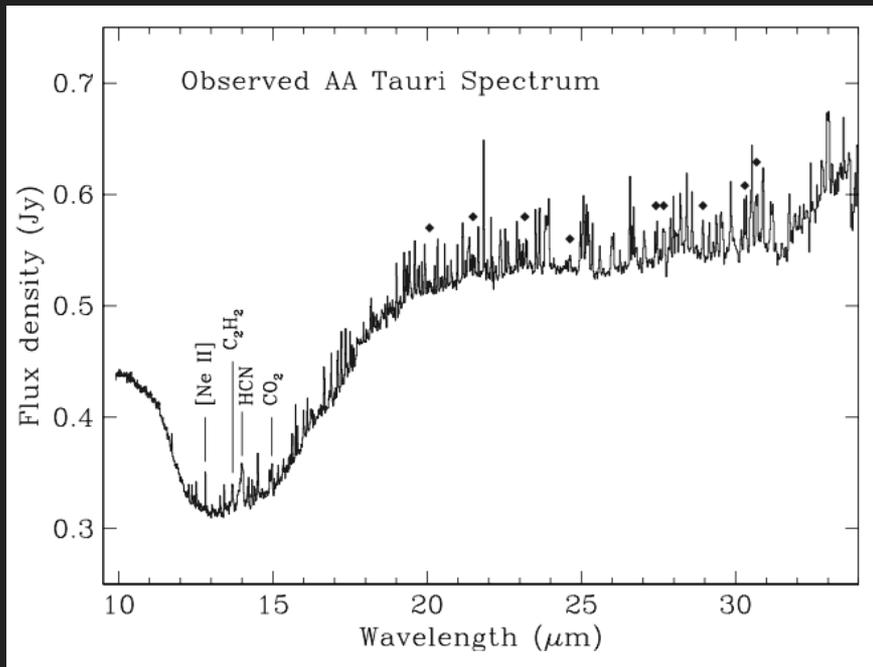


Fig.7 (左) Tタウリ型星 AA Tauの高分散赤外スペクトル. (右) 連続成分補正後 [Carr & Najita + 2008].

# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

- 2000年代 (Spitzer・AKARI・地上8m級望遠鏡)
  - 銀河系外の大質量YSO (大小マゼラン雲) の氷・ダスト観測 (e.g., van Loon+ 05; Shimonishi+ 08,10,16; Oliveira+ 09,13; Seale+ 11)
  - 系外銀河の氷の観測,  $z$  up to  $\sim 2$  (e.g., Spoon+ 03; Imanishi+ 03,06; Yamagishi+ 10,13,15, Sajina+ 09)
  - 未同定の吸収バンドの検出 (e.g., Boogert+ 08,15; Shimonishi+ 16)

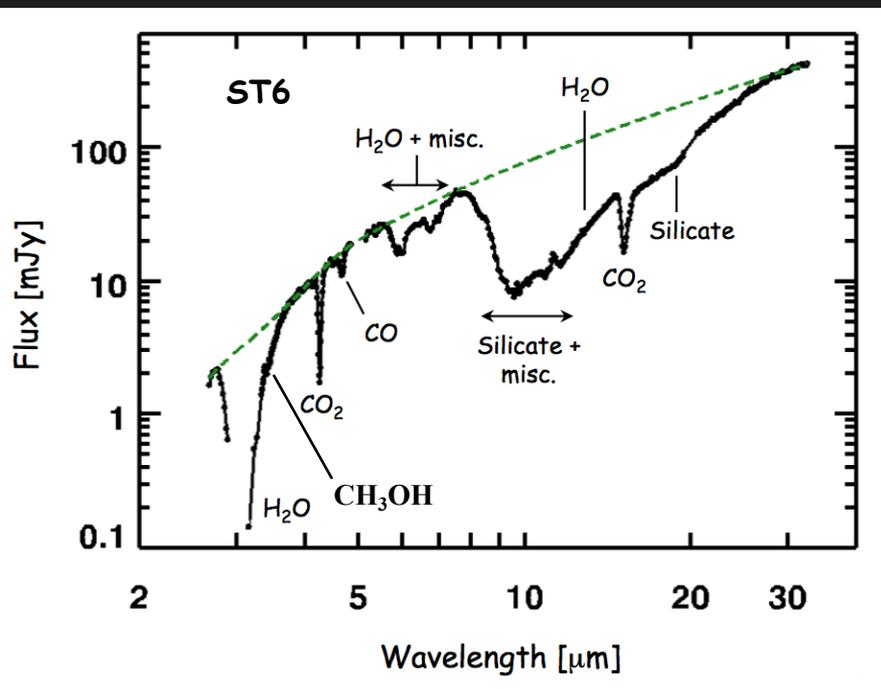


Fig.8 大マゼラン雲の大質量YSOの赤外線スペクトル [Shimonishi+ 16]

多様化の時代

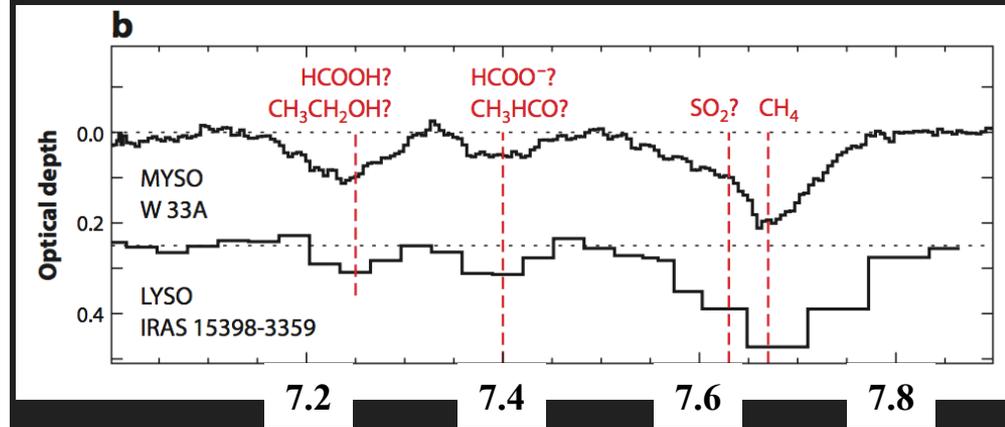


Fig.9 Spitzer/IRSにより観測された未同定の吸収バンド [Boogert+ 15]

# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

## ● 2010年代 (Herschel)

— 「水」の徹底観測 (see van Dishoeck+ 13 and references therein)

- ・ 原始星の進化段階・物理構造の良いプローブとしてのH<sub>2</sub>O gas line の提案
- ・ 遠赤外線域の水・ダストバンドへの挑戦 (e.g., McClure+ 12,15; Min+ 16)

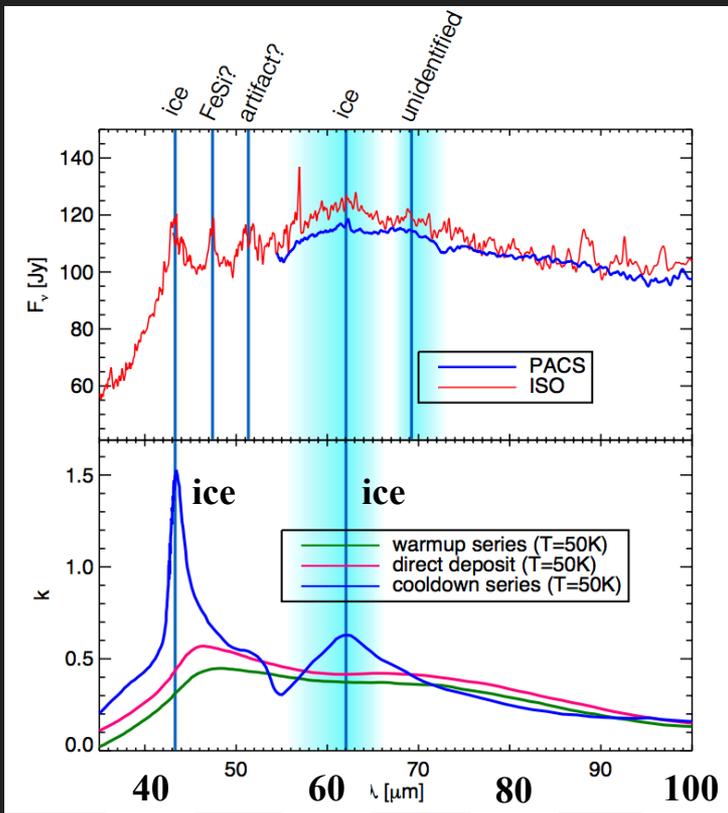
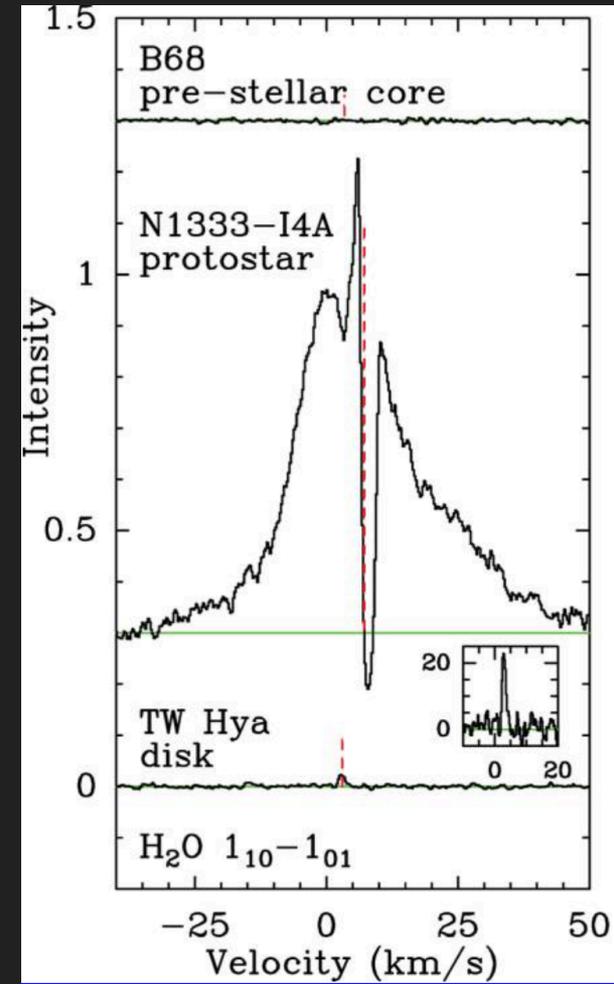


Fig.9 原子惑星系円盤HD142527の遠赤外線スペクトル [Min+ 16].

Fig.10 Pre-stellar core, protostar, disk の各進化段階におけるH<sub>2</sub>O gas 輝線 [van Dishoeck+ 13].



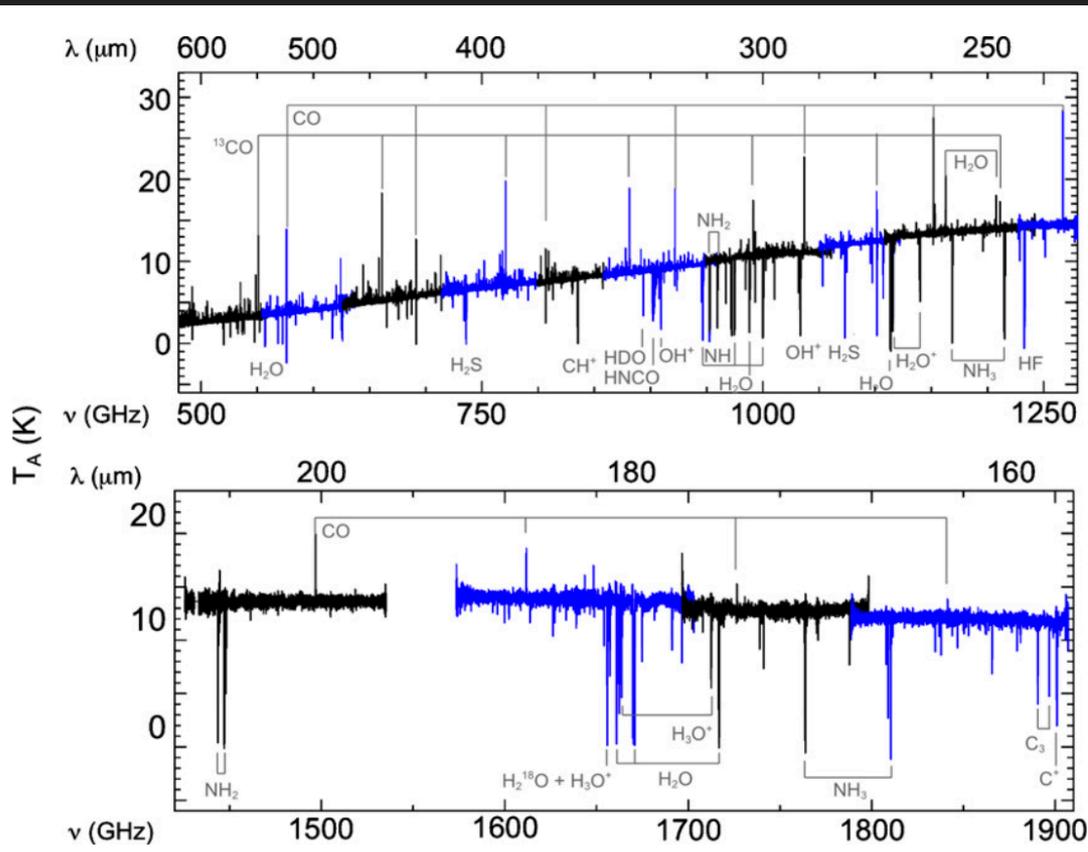
# 赤外線アストロケミストリー: 発展の経緯

- 2010年代 (Herschel)

- 「水」の徹底観測 (see van Dishoeck+ 13 and references therein)

- ・ 原始星の進化段階・物理構造の良いプローブとしてのH<sub>2</sub>O gas line の提案
- ・ 遠赤外線域の水・ダストバンドへの挑戦 (e.g., McClure+ 12,15; Min+ 16)

- 遠赤外・テラヘルツ帯の分子ガス観測の開拓 (e.g., Neil+ 14; Tahani+ 16)



新規開拓の時代

Fig.11 Herschel/HIFIによるSgr B2(N)に対する遠赤外線・テラヘルツ領域の分子ガス輝線サーベイ. 水から有機分子まで44種類の様々な分子種が検出された [Neil+ 14].

# 赤外線アストロケミストリー: 2020年代の展望

- 2020年代 (JWST・SPICA・TMT・E-ELT・TAO・etc)

## 銀河系内

- 高感度・広帯域・氷の分光に適した中分散の赤外線観測により、分子雲及び原始星周囲に存在する氷に含まれる大型の有機分子の同定が進む (JWST), 但し実験的なサポートが必須
- 原子惑星系円盤内(ハビタブルゾーン付近)の水及び有機分子(ガス)の系統的な観測が進む (JWST・SPICA)
- 遠赤外線水氷・水蒸気バンドの観測によるスノーラインの観測 (SPICA)
- 銀河中心・銀河外縁部など、極限環境のアストロケミストリーの開拓 (all)
- 氷・分子ガスのマッピング観測 (JWST・SPICA・TMT・E-ELT)

## 銀河系外

- 原始星の分光観測は、より低質量の天体へ、そしてより多様な銀河へ (マゼラン雲のYSOであれば数 $M_{\odot}$ 程度まで、Local Group内の銀河であれば大質量のYSOについて、氷・ダスト・分子ガスの情報が得られる (JWST・SPICA・TMT・E-ELT)
- High-z 銀河の水・有機分子の探査 (JWST・SPICA・TMT・E-ELT)

# 赤外線アストロケミストリー: 2030年代の展望

- 宇宙の物質的豊かさの形成

1. 元素の出現

2. ダストの生成

3. 分子の誕生 (特に水や有機分子など、星惑星形成の化学的初期条件に影響を与える高密度領域の氷・分子ガス)

=> 2030年代は、③について、現在の宇宙から過去の宇宙まで網羅的に理解することが求められる(はず)

- ・ 近傍低金属量銀河の太陽質量原始星の統計的な分光観測
- ・ High-z銀河の化学組成の統計的観測
- ・ 極限環境下の分子観測

- 惑星形成領域の化学組成の徹底解明

=> JWST・SPICAで行えない広波長カバレッジ・高分散 (1-1000, R = 数万~数十万) の分光は、おそらく最後の未開拓領域となる

# 赤外線アストロケミストリー: 2030年代の展望

- 当該分野の発展の経緯を振り返ってみて思うこと
  - 赤外線衛星の登場に伴い飛躍的に分野が発展し、関連する地上追観測も活発になる。しかし、衛星の運用期間の短さと、狭間の世代の人材育成が課題
    - =>スペースで開拓されたサイエンスを地上で継続的に発展させていくことを視野に入れた装置開発
    - =>同時に、長期間の運用に重きを置いた天文衛星の開発も必要
    - =>アストロケミストリーにおいては、アーカイブデータを用いたサイエンスの推進、装置開発に加えて、後述の実験室アストロケミストリーによる人材育成も重要
  - 分野の発展は常に実験データ・理論化学データの充実化と共にある
    - =>天文観測と分子分光等の実験的研究の密接な連携が必要
    - =>水・有機分子の化学の徹底解明には、ダスト表面反応モデルの充実、及びモデル化に必要な基礎物性データの整備も重要
  - 新規波長域の開拓は重要な役割を果たしてきたが、2030年代には赤外線ほぼ全ての波長域の開拓が終了している。今後は波長の厳選か?それとも広帯域化か?