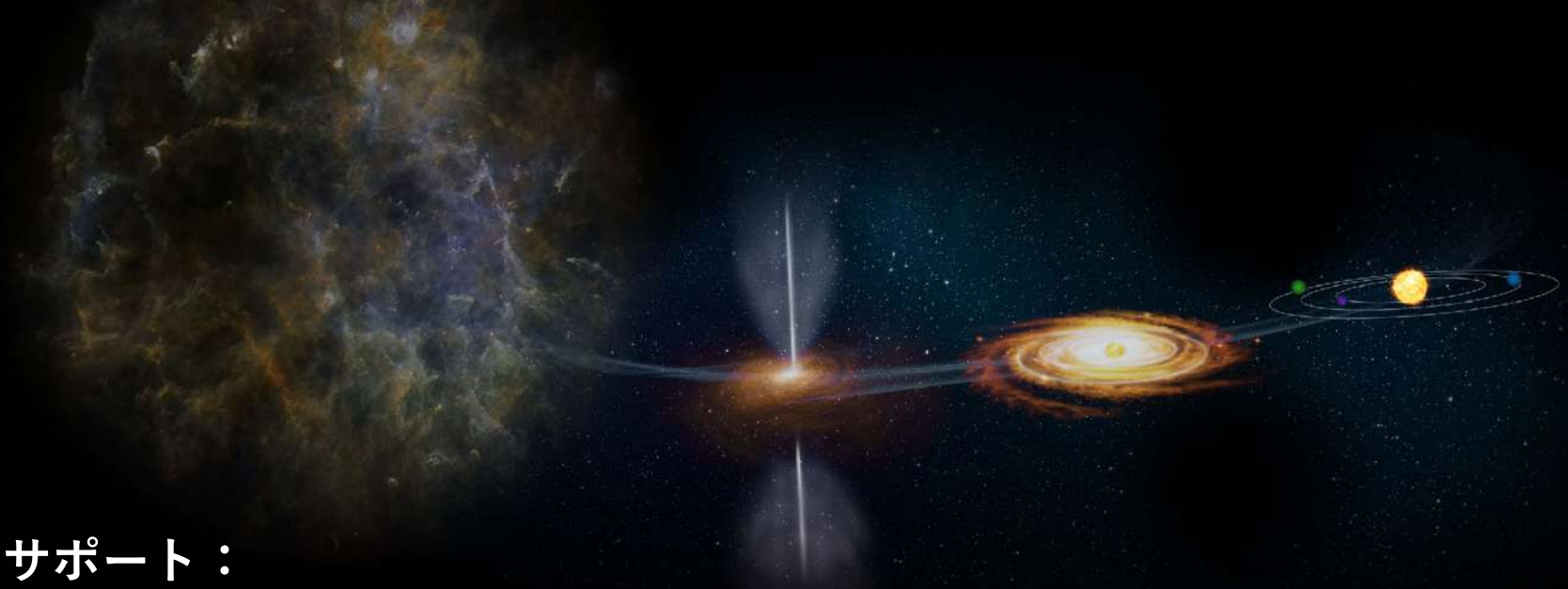
Main Collaborators

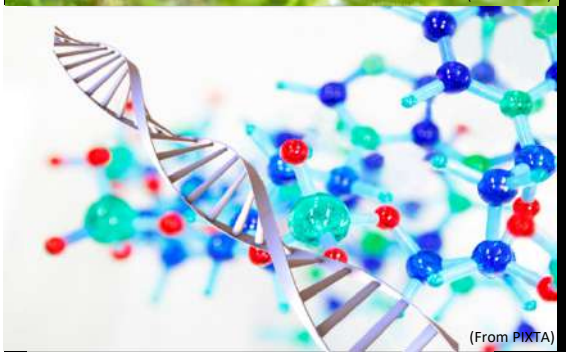
天文学と化学の融合で切り込む多様な惑星系の起源

坂井 南美
理化学研究所 開拓研究本部 坂井星・惑星形成研究室 主任研究員



研究費サポート：
開拓研究本部 Cluster for Pioneering Research
科研費 KAKENHI

(From PIXTA)



(From PIXTA)

“私たち”はなぜここにいるのか？

(From NASA)

いろいろなアプローチ

- **直接探査（天文学）**
  （観測による系外惑星探査）

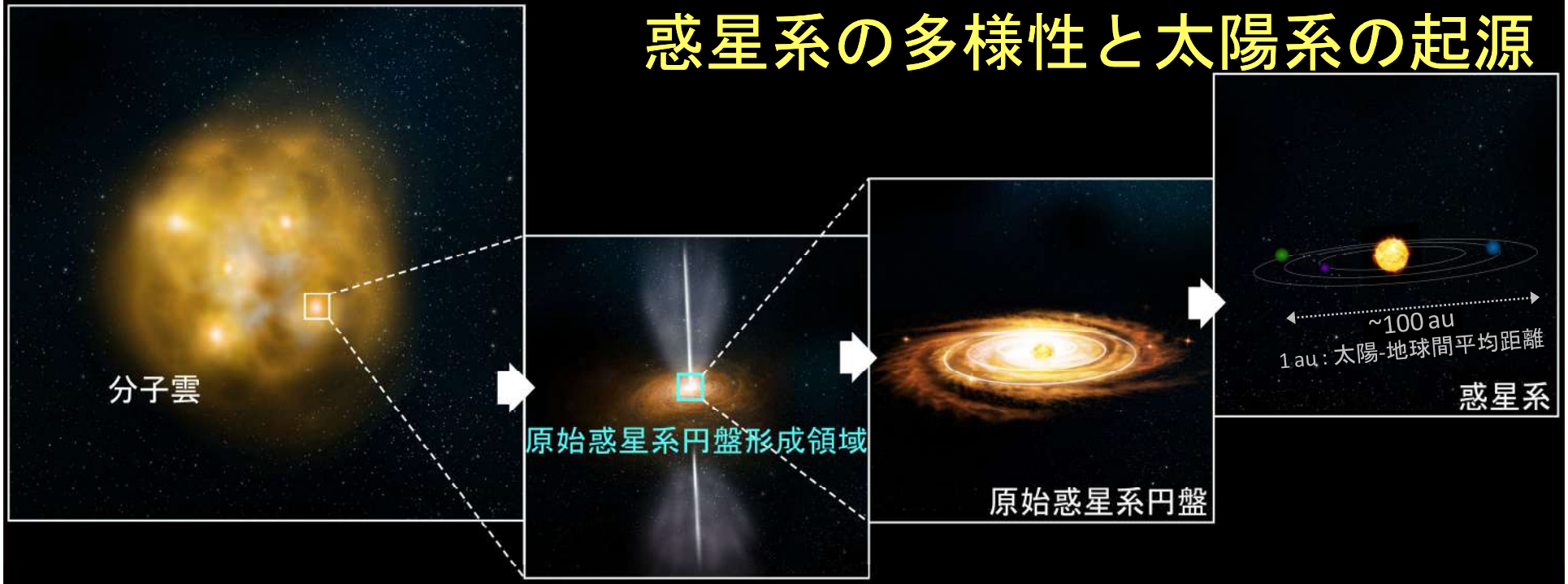
- **考古学的研究（惑星科学）**
  （隕石・サンプルリターン分析・惑星探査など）

- **星・惑星系の形成過程（天文学・宇宙物理学）**
  （質量の大小・連星系か否か・周囲の環境・惑星系の大きさ
  ・軌道面の傾き・安定/不安定・惑星自身の多様性・それらの起源）

- **物質進化（天文学・星間化学）**
  （原子→基本的分子→複雑な分子→・・・生命起源物質？）

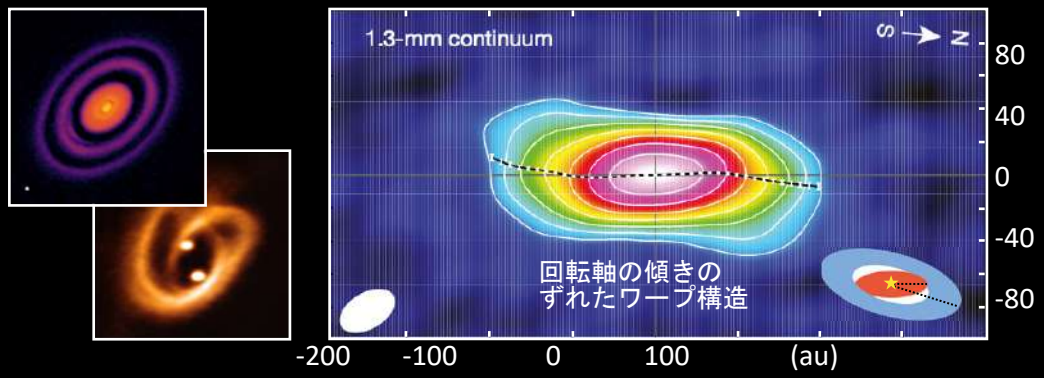
GREY CHOW / CATERS NEW

惑星系の多様性と太陽系の起源



様々な原始惑星系円盤

ギャップ構造・ワープ構造・連星系



e.g. Andrews+(2018)ApJ, 869, L41;
Alves+(2019)Science, 366,90

Sakai+(2019) Nature, 565, 206

様々な系外惑星 (系)

ホットジュピター
スーパーアース
主星の自転と逆行する惑星
軌道面が揃っていない惑星系

(NASA Ames/JPL-Caltech)

宇宙空間にある主な元素

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe										

水素の約1千分の1

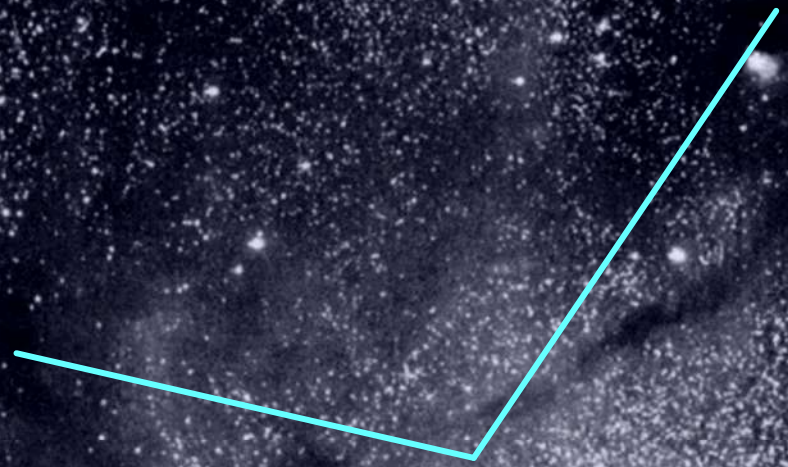
存在量比

O C

水素の約1万分の1

Ne N Mg Si Fe S Ar

星の誕生と分子進化



星間分子雲：温度~10 K, 密度~$10^{3\text{-}7}$ cm^{-3}
(地上：温度~300 K 密度~3×10^{19} cm^{-3})

星間分子(約200 種)

2 Atoms (42 Species)

H_2, CO, AlF, AlCl, C_2, CH, CH^+, CN, CO^+, CP, SiC, HCl, KCl, NH, NO, NS, NaCl, OH, PN, SO, SO^+, SiN, SiO, SiS, CS, HF, HD, FeO (?), O_2, CF^+, SiH (?), PO, AlO, OH^+, CN^-, SH^+, SH, HCl^+, TiO, ArH^+, NO^+ (?), N_2

3 Atoms (40 Species)

C_3, C_2H, C_2O, C_2S, CH_2, HCN, HCO, HCO^+, HCS^+, HOC^+, H_2O, H_2S, HNC, HNO, MgCN, MgNC, N_2H^+, N_2O, NaCN, OCS, SO_2, c-SiC_2,

CO_2, NH_2, H_3^+, SiCN, AlNC, SiNC, HCP, CCP, AlOH, H_2O^+, H_2Cl^+, KCN, FeCN, HO_2, TiO_2, C_2N, Si_2C

4 Atoms (27 Species)

c-C_3H, l-C_3H, C_3N, C_3O, C_3S, C_2H_2, NH_3, HCCN, $HCNH^+$, HNCO, HNCS, $HOCO^+$, H_2CO, H_2CN, H_2CS, H_3O^+, c-SiC_3, CH_3, C_3N^-, PH_3, HCNO, HOCN, HSCN, H_2O_2, C_3H^+, HMgNC, HCCO

5 Atoms (23 Species)

C_5, C_4H, C_4Si, *l*-C_3H_2, c-C_3H_2, H_2CCN, CH_4, HC_3N, HC_2NC, HCOOH, H_2CNH, H_2C_2O, H_2NCN, HNC_3 , SiH_4, H_2COH^+, C_4H^-, HC(O)CN,

HNCNH, CH_3O, NH_4^+, H_2NCO^+ (?), $NCCNH^+$

6 Atoms (17 Species)

C_5H, *l*-H_2C_4, C_2H_4, CH_3CN, CH_3NC, CH_3OH, CH_3SH, HC_3NH^+, HC_2CHO, NH_2CHO, C_5N, l-HC_4H, l-HC_4N, c-H_2C_3O, H_2CCNH (?), C_5N^-,

HNCHCN

7 Atoms (10 Species)

C_6H, CH_2CHCN, CH_3C_2H, HC_5N, CH_3CHO, CH_3NH_2, c-C_2H_4O, H_2CCHOH, C_6H^-, CH_3NCO

8 Atoms (11 Species)

CH_3C_3N, $HC(O)OCH_3$, CH_3COOH, C_7H, C_6H_2, CH_2OHCHO, l-HC_6H, CH_2CHCHO (?), CH_2CCHCN, H_2NCH_2CN, CH_3CHNH

9 Atoms (10 Species)

CH_3C_4H, CH_3CH_2CN, $(CH_3)_2O$, CH_3CH_2OH, HC_7N, C_8H, $CH_3C(O)NH_2$, C_8H^-, C_3H_6, CH_3CH_2SH (?)

10 Atoms (5 Species)

CH_3C_5N, $(CH_3)_2CO$, $(CH_2OH)_2$, CH_3CH_2CHO, CH_3CHCH_2O

11 Atoms (4 Species)

HC_9N, CH_3C_6H, C_2H_5OCHO, $CH_3OC(O)CH_3$

12 Atoms (4 Species)

c-C_6H_6, n-C_3H_7CN, i-C_3H_7CN, $C_2H_5OCH_3$ (?)

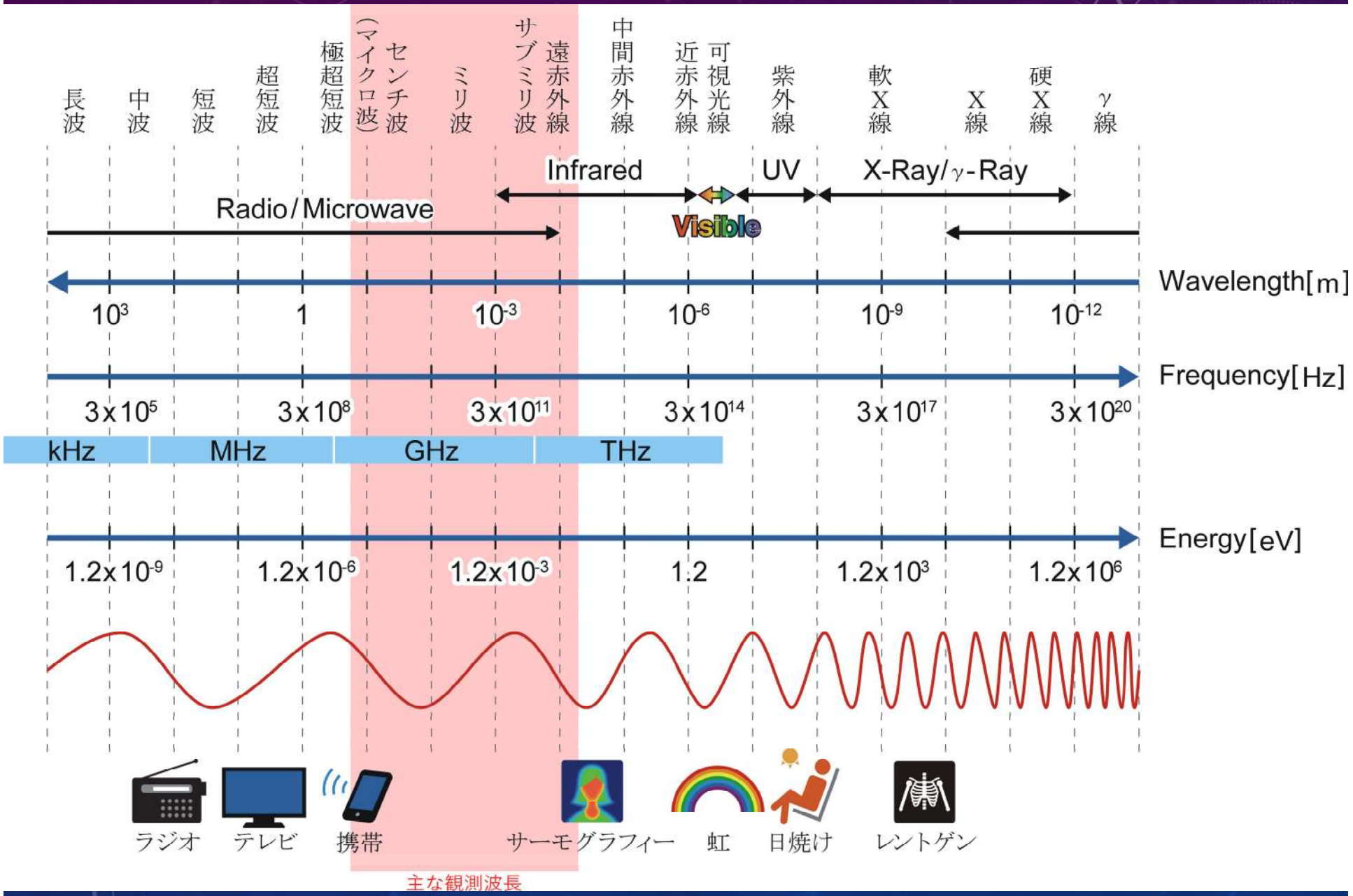
>12 Atoms (3 Species)

C_{60}, C_{70}, C_{60}^+

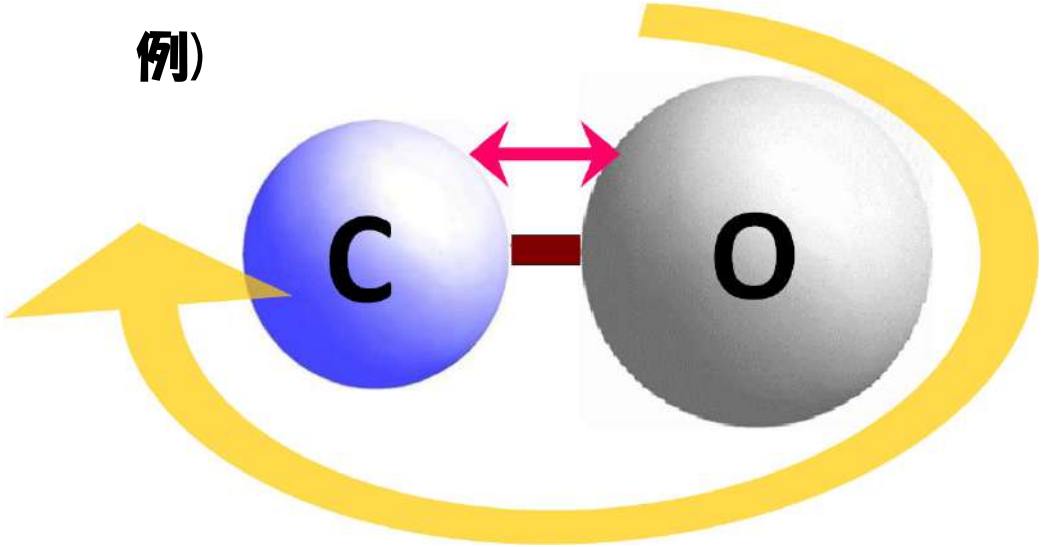
主に電波観測により発見

(グレー: 晩期型星にて検出)

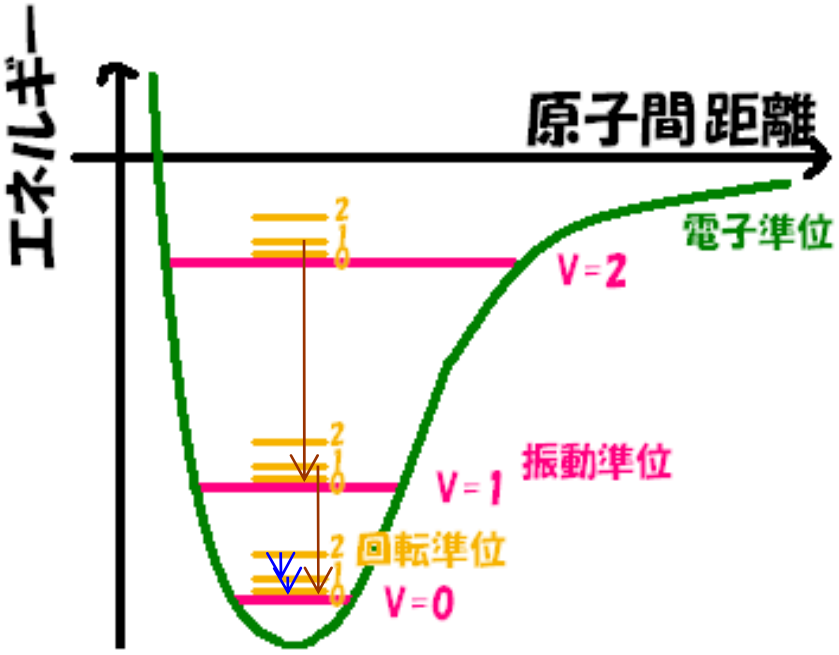
(The Cologne Database for Molecular Spectroscopy (CDMS): 2016年 11月時点.)


長波
中波
短波
超短波
極超短波
センチ波（マイクロ波）
ミリ波
サブミリ波
遠赤外線
中間赤外線
近赤外線
可視光線
紫外線
軟X線
X線
硬X線
γ線
Infrared
UV
X-Ray/γ-Ray
Radio/Microwave
Visible
Wavelength[m]
10^3
1
10^-3
10^-6
10^-9
10^-12
Frequency[Hz]
3x10^5
3x10^8
3x10^11
3x10^14
3x10^17
3x10^20
kHz
MHz
GHz
THz
Energy[eV]
1.2x10^-9
1.2x10^-6
1.2x10^-3
1.2
1.2x10^3
1.2x10^6
ラジオ
テレビ
携帯
サーモグラフィー
虹
日焼け
レントゲン
主な観測波長

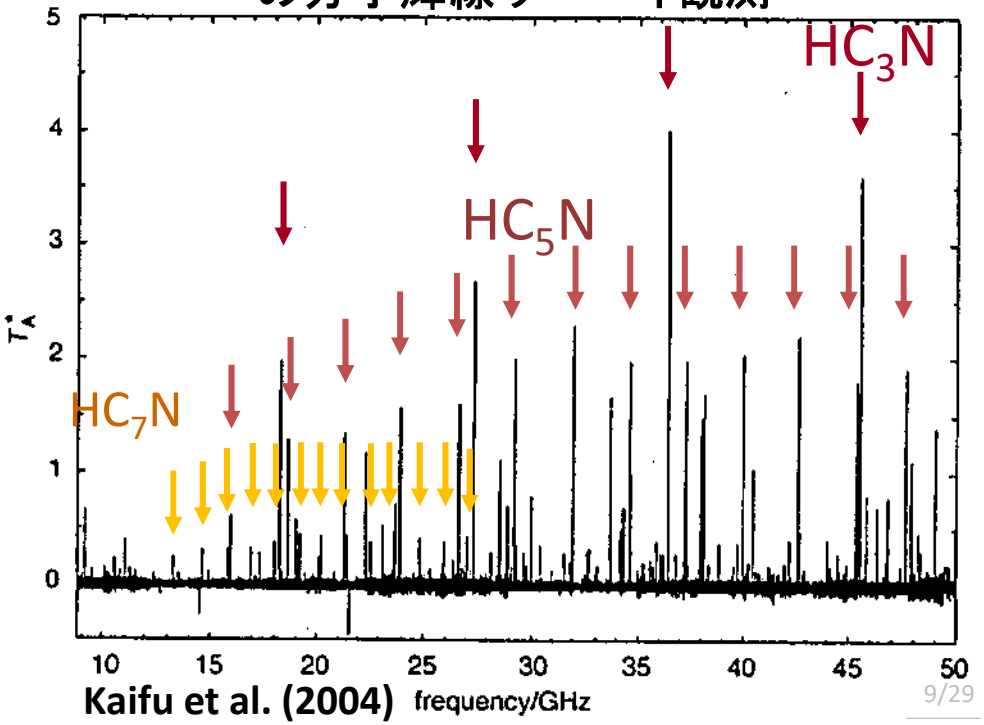
例)

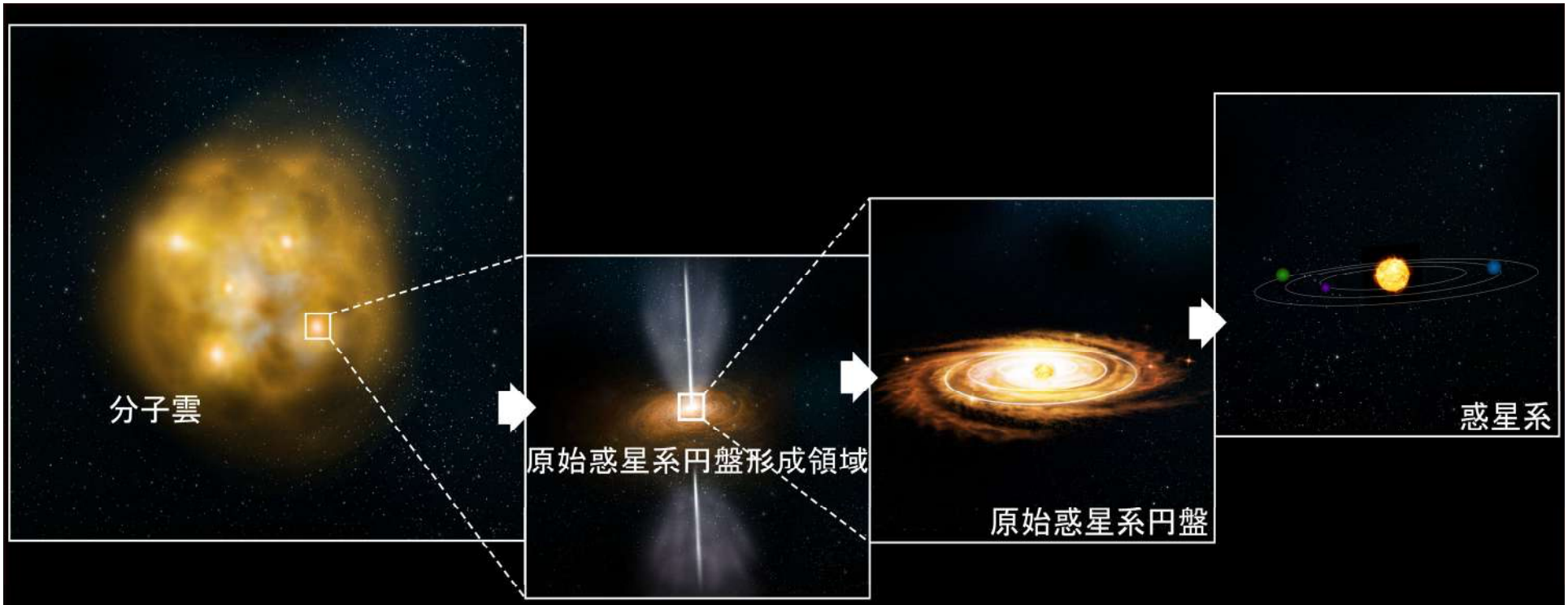


量子力学的な理由からとびとびの
エネルギーを持つ状態
→状態が変化する際、
変化前と後のエネルギーの差に
応じた波長の光(電磁波)を出す
→“スペクトル線”



おうし座分子雲1
の分子輝線サーベイ観測





星間化学 (Astrochemistry)

1940年頃　星間分子発見、1960年代　電波技術進化

1970-80年代　新分子発見ラッシュ

⇒地上には自然に存在しない分子の検出

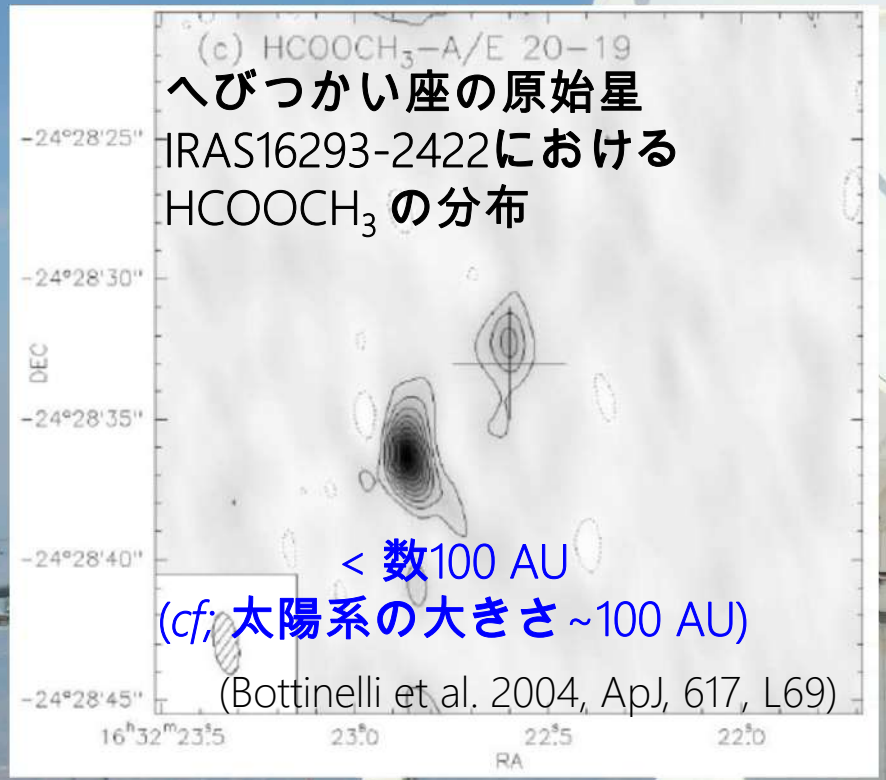
（HC_5Nなど→C_{60}フラーレンの発見→カーボンナノチューブなどの新分野開拓へ）

新分子探索・極限環境下の化学として研究が活発に。

現在　星が誕生した時、どんな分子がすでにあったのか？

宇宙における化学進化を追う学問へ（→生命の起源？）

若い原始星まわりで“大型”有機分子を発見



へびつかい座の原始星
IRAS16293-2422**における**
$HCOOCH_3$ **の分布**

< **数**100 AU
(*cf.* **太陽系の大きさ**~100 AU)

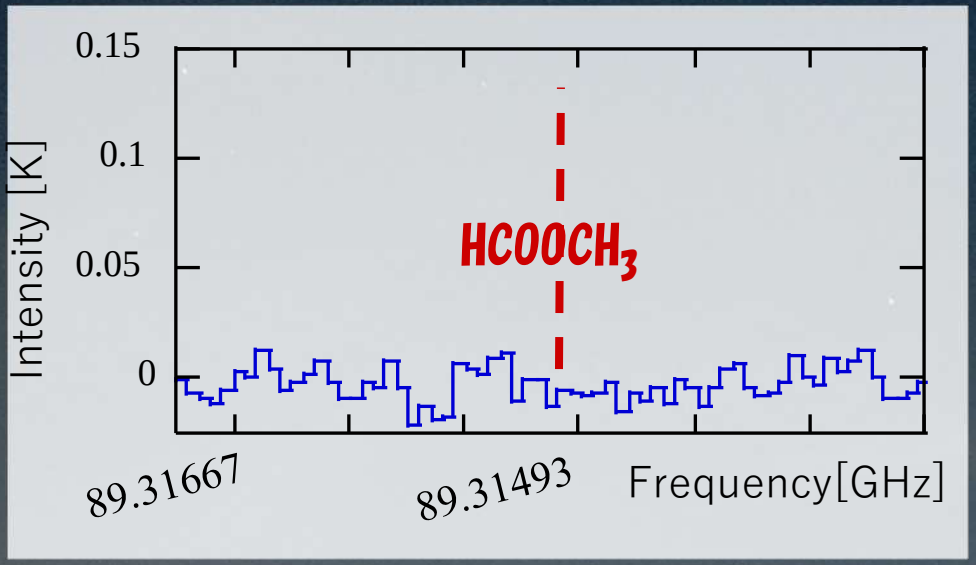
(Bottinelli et al. 2004, ApJ, 617, L69)

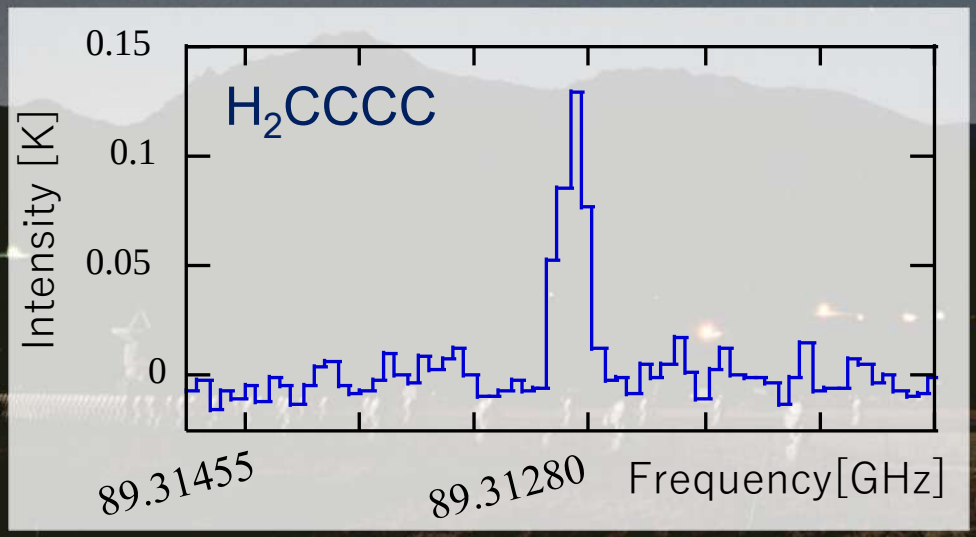
$HCOOCH_3$, CH_3OCH_3, C_2H_5CN, etc.
ホットコリノ化学
(Cazaux et al. 2003, A&A, 593, L51)

似た進化段階の
NGC1333IRAS4A,
NGC1333IRAS4B,
& NGC1333IRAS2A.
でも検出
(e.g. Sakai et al. 2006, PASJ, 58, L15)

Photo: IRAM 30 m (Spain)

おうし座L1527にはない？





C_2H, c-C_3H, l-C_3H, c-C_3H_2, l-C_3H_2, C_4H, C_4H^-, C_4H_2, C_5H, C_6H, C_6H_2, C_6H^-, HC_3N, HC_5N, HC_7N, HC_9N, C_2O, C_3O, etc.

星間塵からのメタンCH_4の蒸発で再生成 (> 25 K)

$CH_4 + C^+ \rightarrow C_2H_3^+ + H$

$C_2H_3^+ + e$

$\rightarrow C_2H + H + H$

$\rightarrow$ - - - -

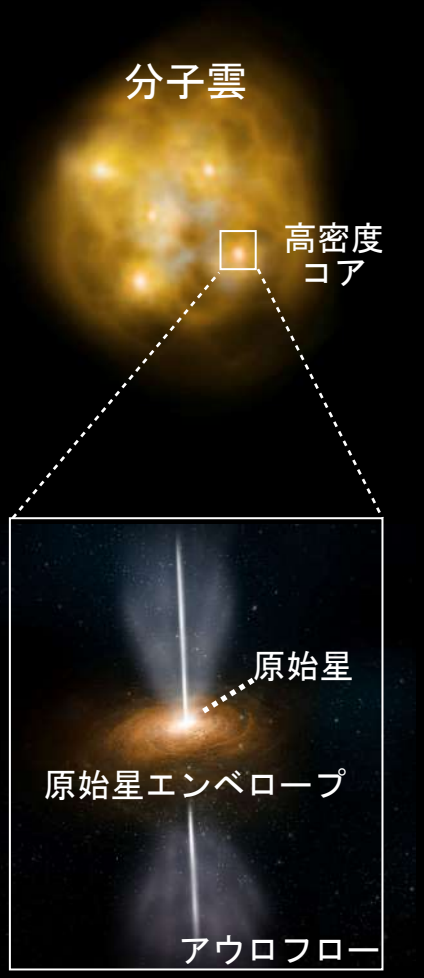
Warm Carbon-Chain Chemistry (WCCC)

Photo: NRO 45 m (Japan)

(e.g. Sakai et al. 2008, ApJ, 672, 372; Sakai et al. 2010, ApJ, 722, 1633)

Sakai & Yamamoto (2013) Chem. Rev., 113, 8981

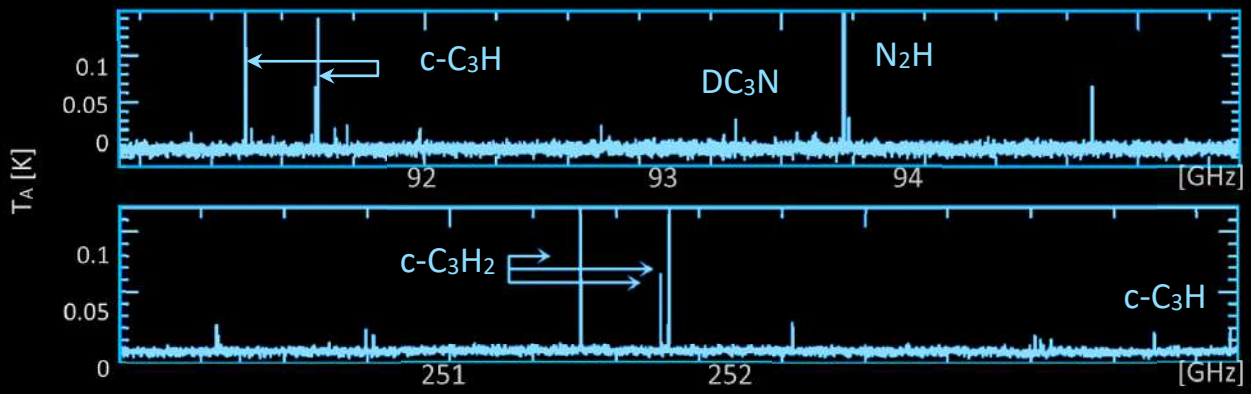
化学的多様性――― 太陽系はどちらだったのか？



原始星エンベロープの化学組成

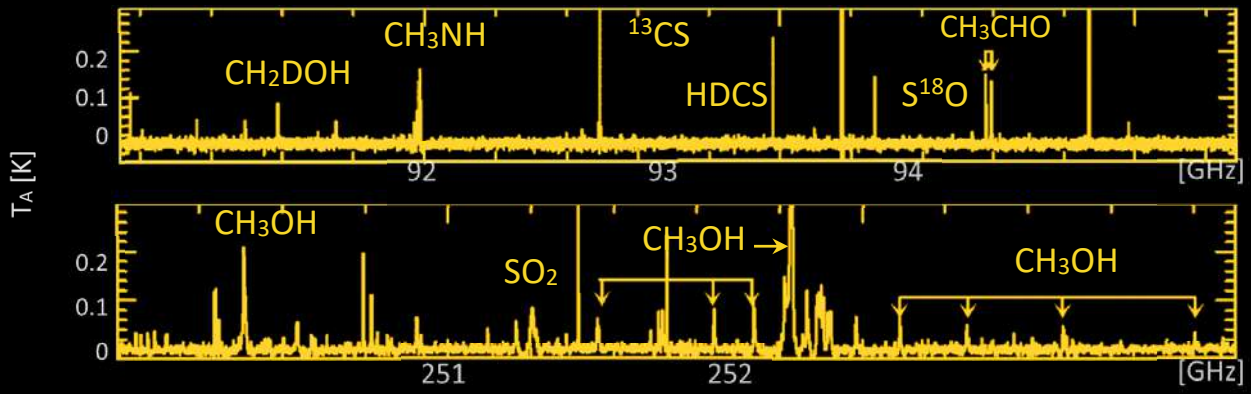
炭素鎖分子が豊富な天体

Yoshida, Sakai+ (2019) Pub. Astron. Soc. Japan



飽和有機分子が豊富な天体

Lefloch, Sakai+ (2018) Mon. Not. Astron. Soc.



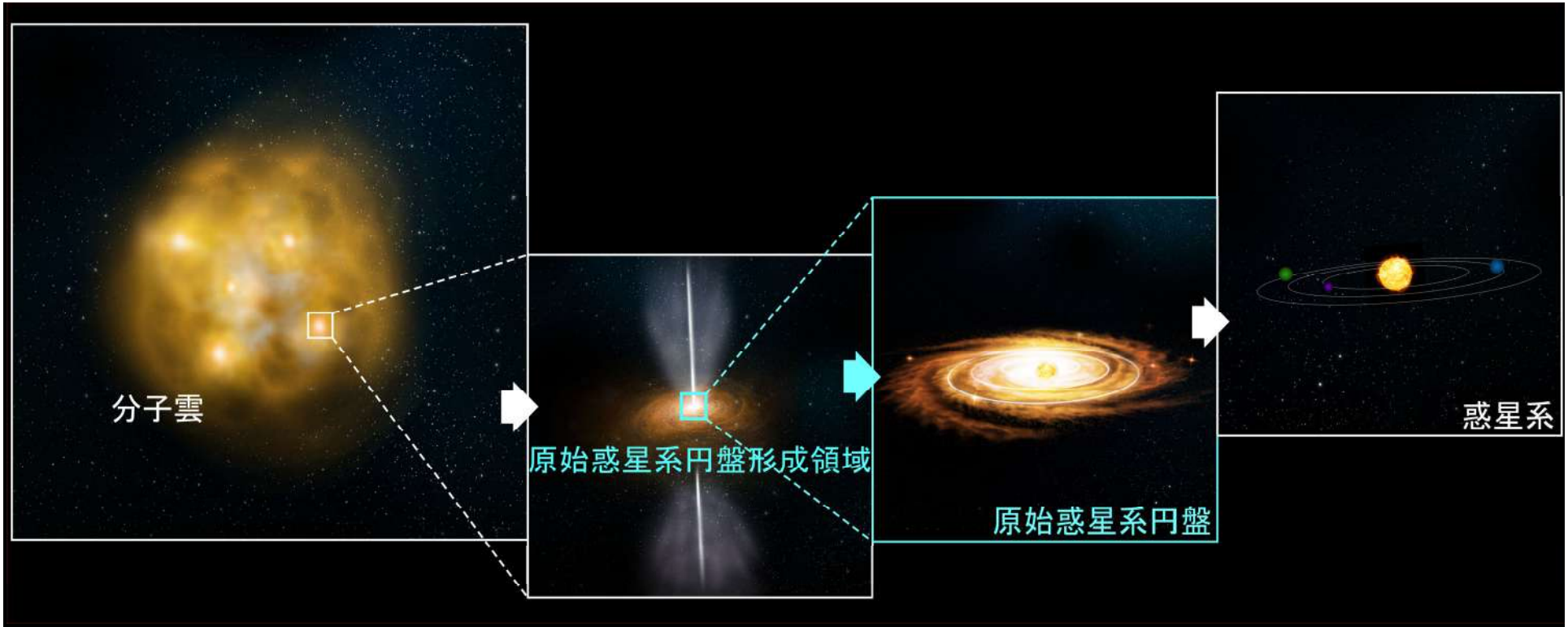
アルマ望遠鏡(アタカマ 大型ミリ波/サブミリ波 干渉計)

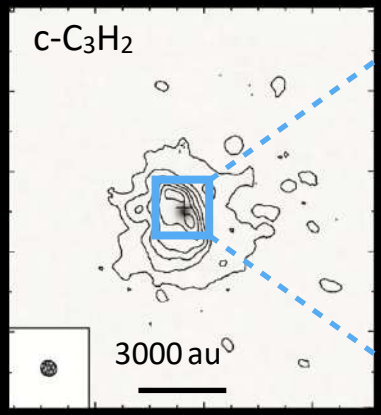
(ALMA: Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)

日・米・欧の国際プロジェクト

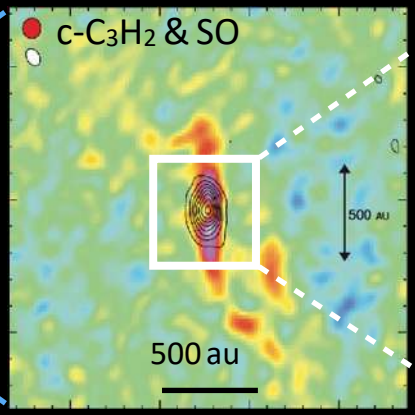
メインアンテナ : 12 m 50台
ACA アンテナ: 12 m 4台7 m 12台
合計66台

観測可能波長
3 mm – 0.4 mm
(84 – 940 GHz)

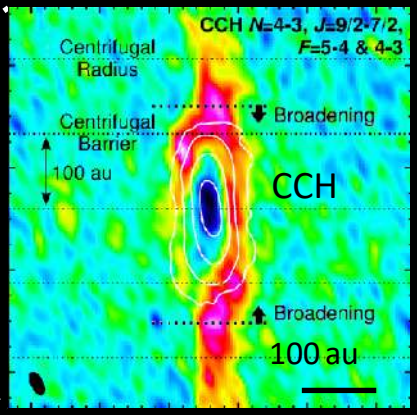




Sakai+ (2010)
Astrophys. J.
722, 1633



Sakai+ (2014)
Nature
507, 58

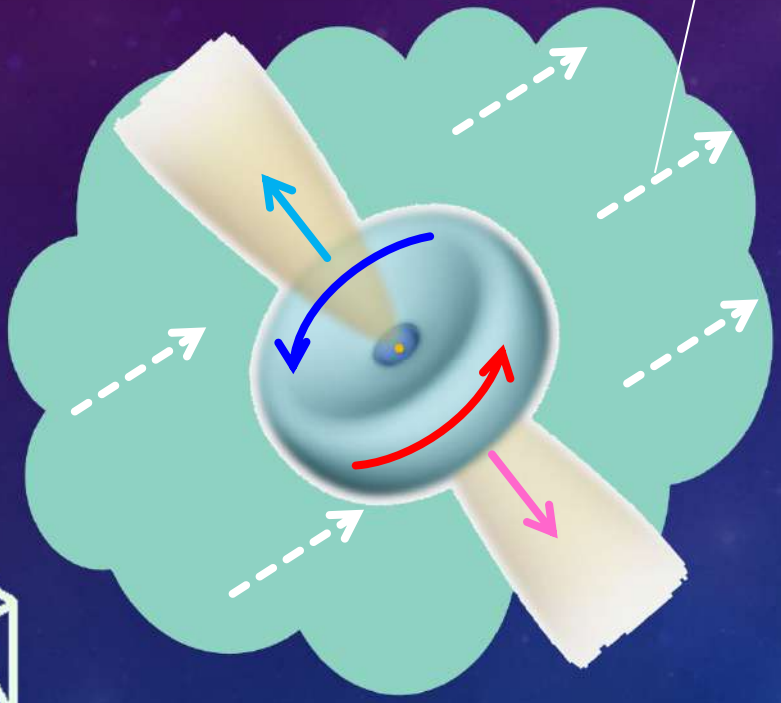


Sakai+ (2017)
Mon. Not. R. Astron. Soc.
467, L76

惑星系の大きさを
分解して化学組成
が見えてきた！

電波観測の利点:速度解析

私たちに対する分子雲の相対運動



電波の波長を測定→
ドップラー効果： ガスの運動状態

真上から見た回転円盤

視線に垂直な方向の運動
→電波(スペクトル線)の
波長には変化なし

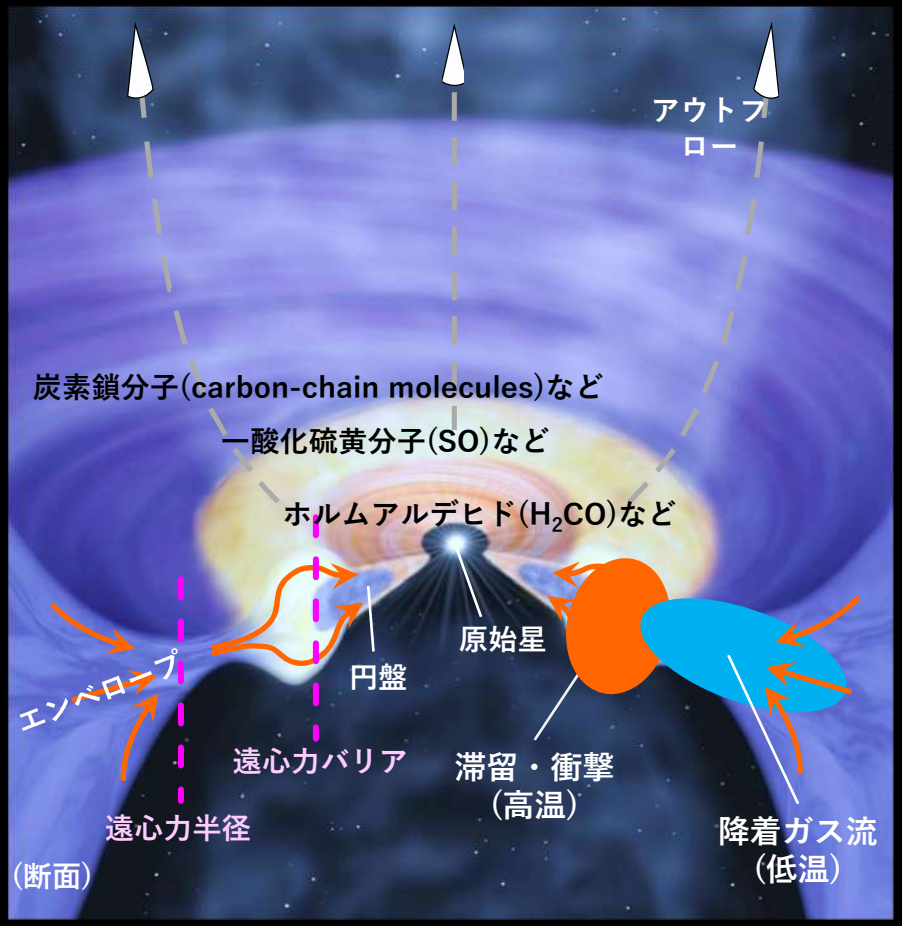
横から見た回転円盤

<u>ドップラー効果</u>
遠ざかる運動
→波長が伸びる
近づく運動
→波長が縮む

ALMA望遠鏡による2つの発見

-化学の眼で見えた“円盤の端” と 円盤ごとの化学組成の違い(化学的多様性)-

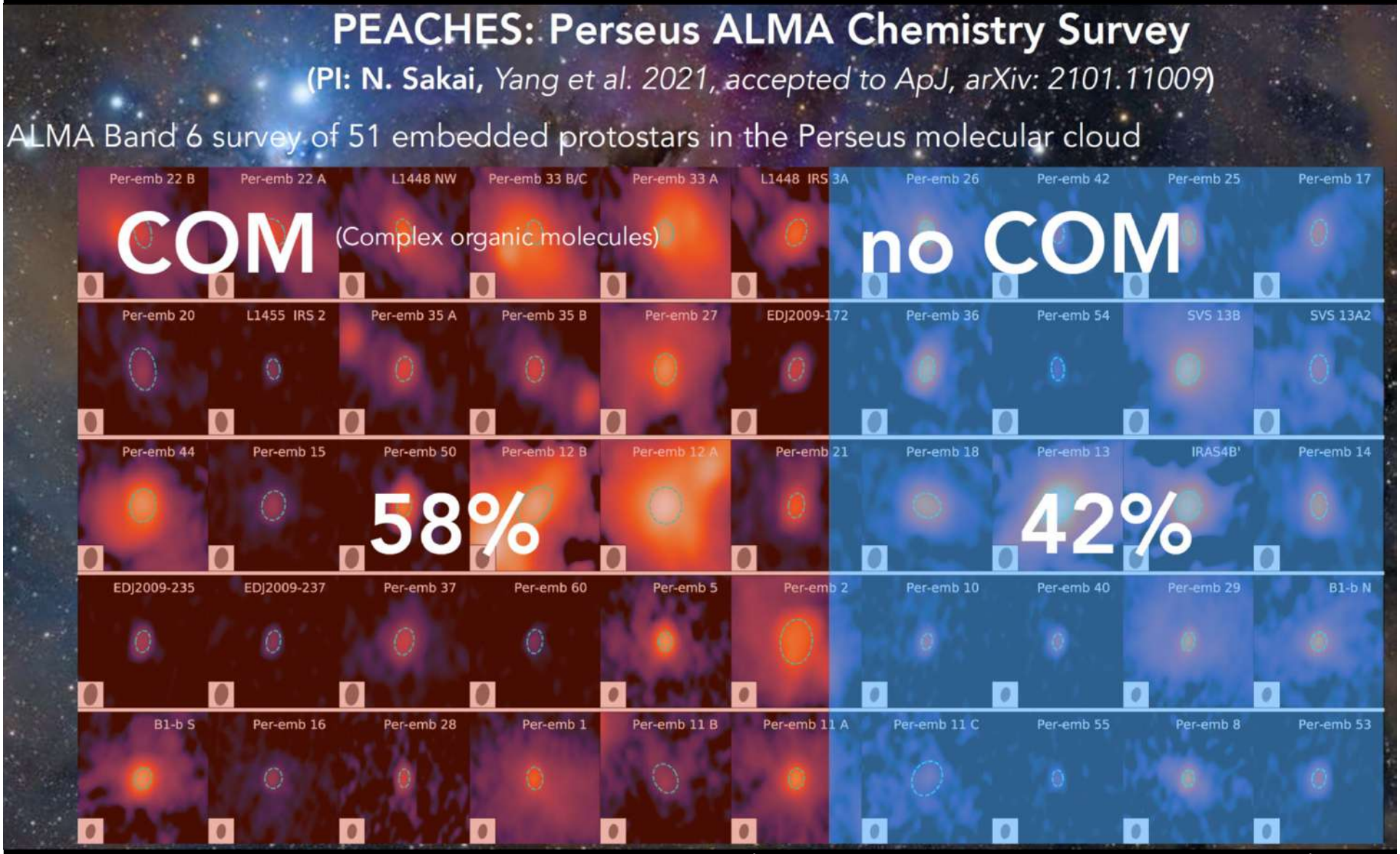
炭素鎖分子が豊富な天体
(ex: L1527)



飽和有機分子が豊富な天体
(ex: IRAS16293-2422)

(e.g. Sakai et al. 2014, Nature 507, 78; Sakai et al. 2014, ApJ, 791, L38; Sakai et al. 2017, MNRAS, 467, L76; Oya, Sakai, et al. 2016, ApJ, 824, 88)

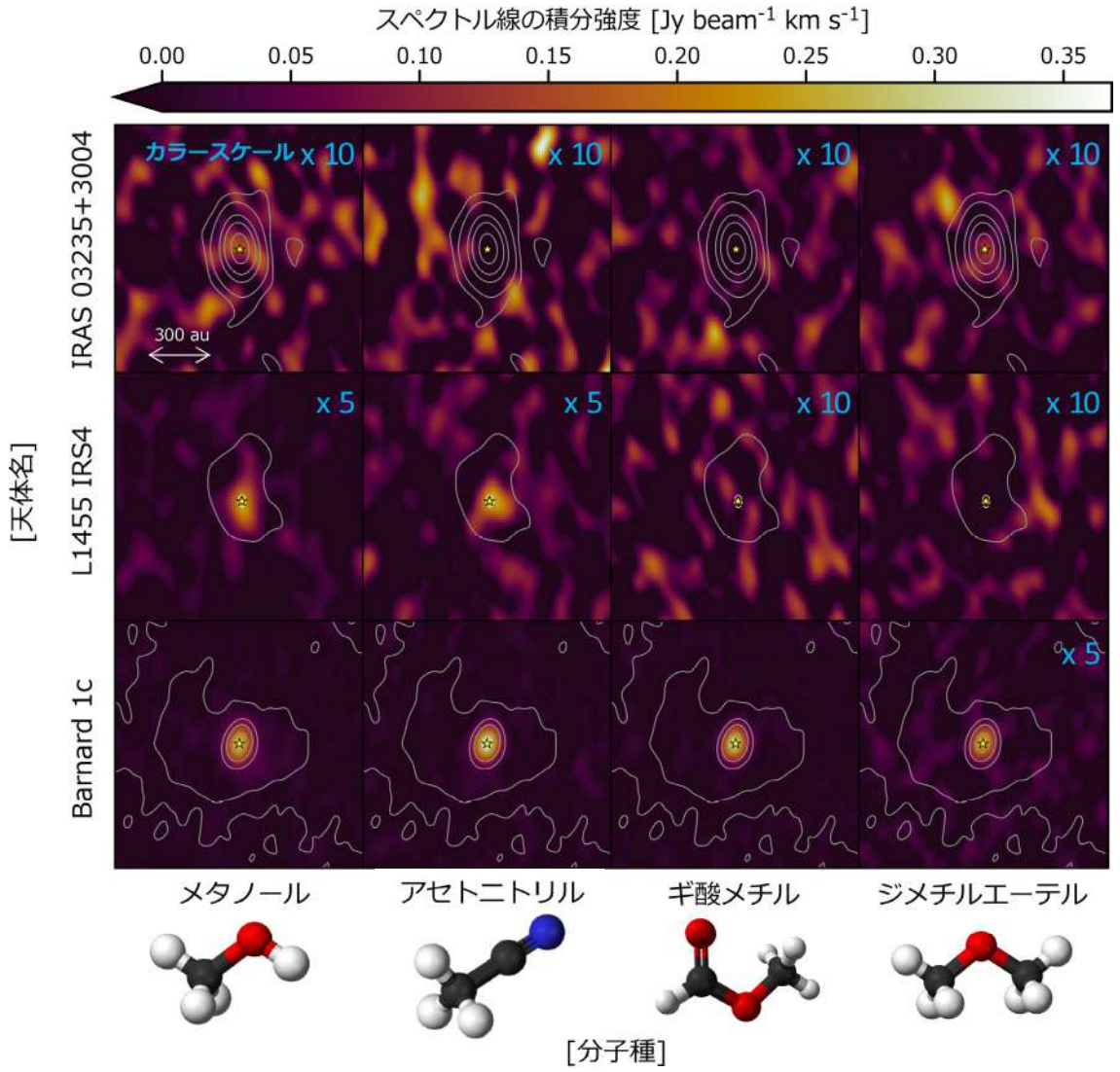
ALMA国際共同研究プロジェクト：PEACHES

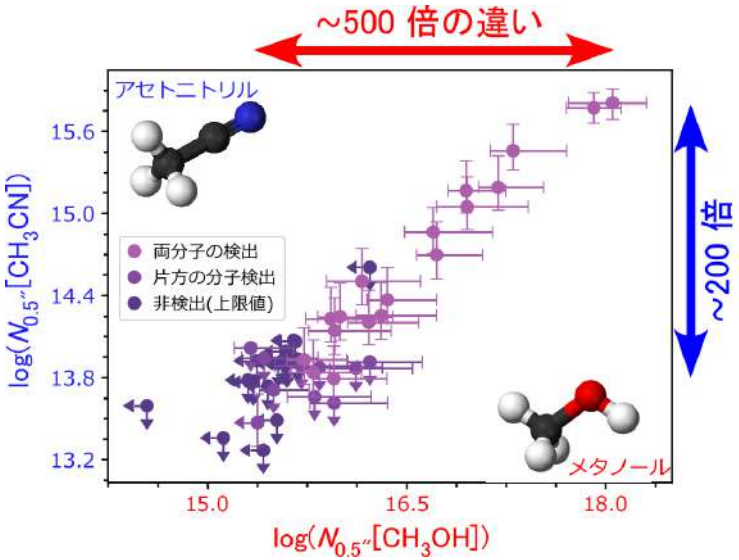


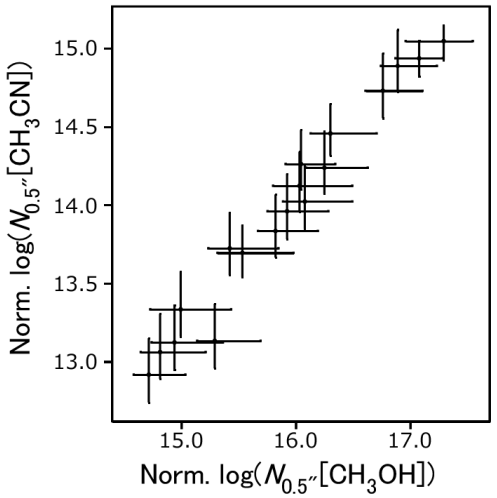
(Yang, Y.-L., Sakai, N. et al. 2021, ApJ, 910, 20)

(Yang, Y.-L., Sakai, N. et al. 2021, ApJ, in press)

ALMA国際共同研究プロジェクト：PEACHES







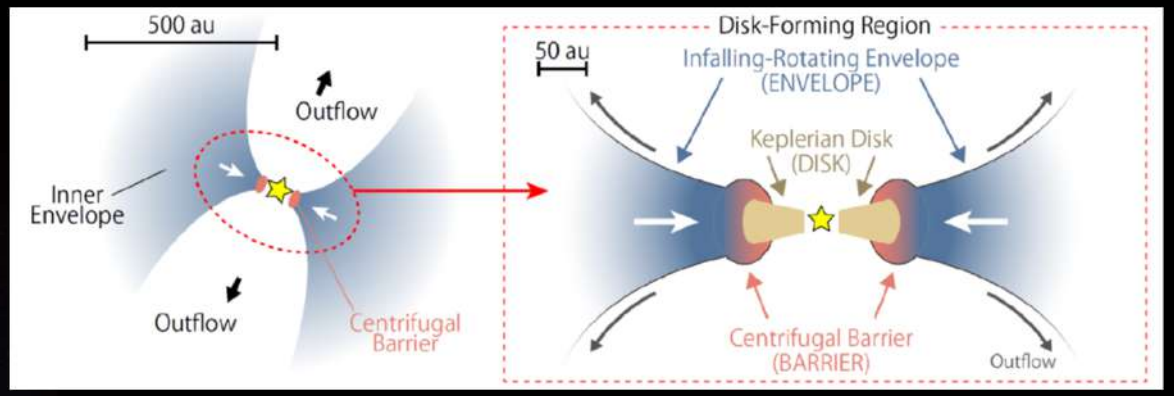
ALMA大型プロジェクト

Fifty AU Study of the chemistry in the disk/envelope system of Solar-like protostars: FAUST

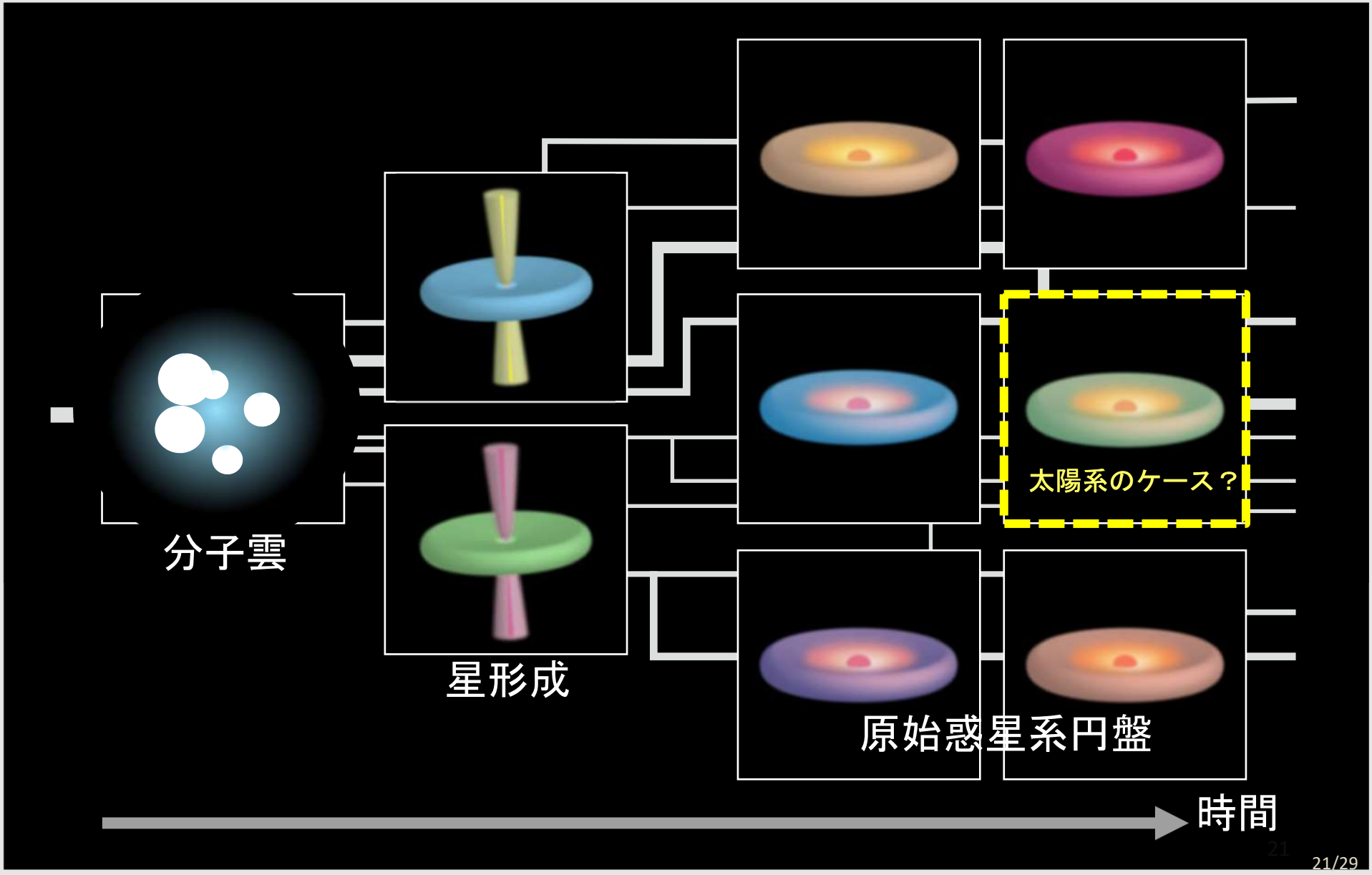
- 約70名の研究者・大学院生からなる国際チーム

共同代表: *Satoshi Yamamoto, Cecilia Ceccarelli, Claire Chandler, Claudio Codella, and Sakai Nami*

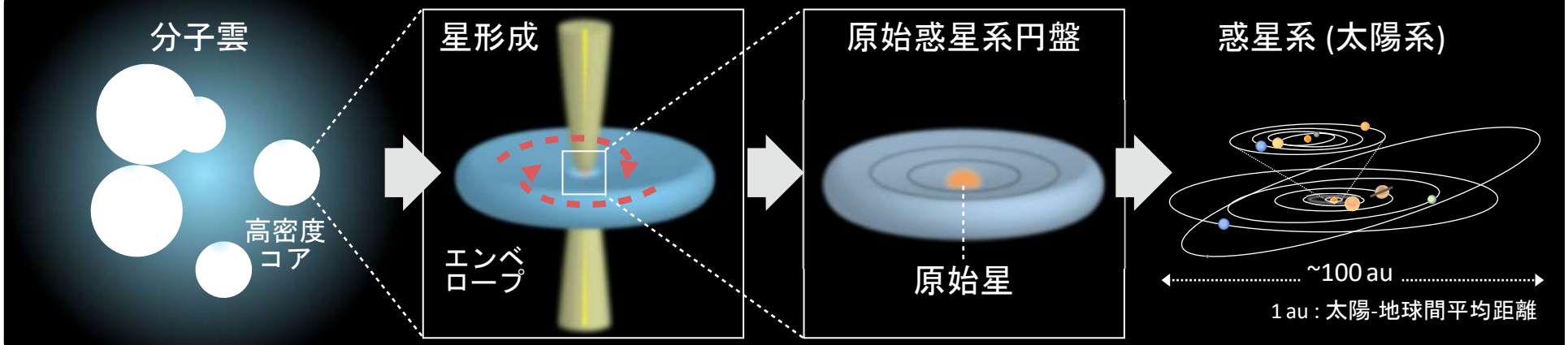
化学的多様性の詳細と円盤形成にともなう化学進化を明らかにする



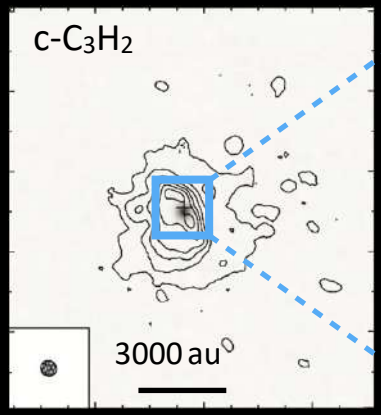
多様性の中に太陽系を位置づけたい



わたしたちは化学進化をどこまで追えるのか？

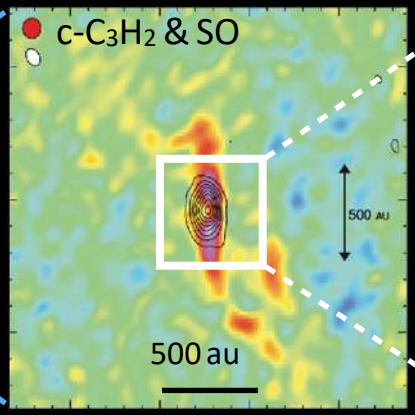


高密度コア



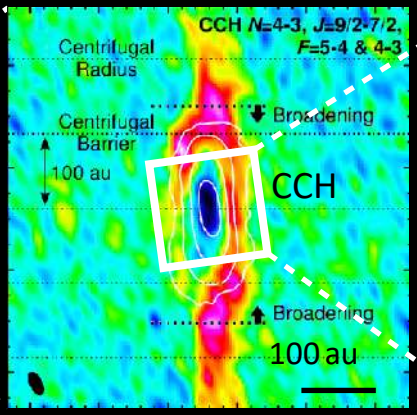
Sakai+ (2010)
Astrophys. J.
722, 1633

エンベロープ



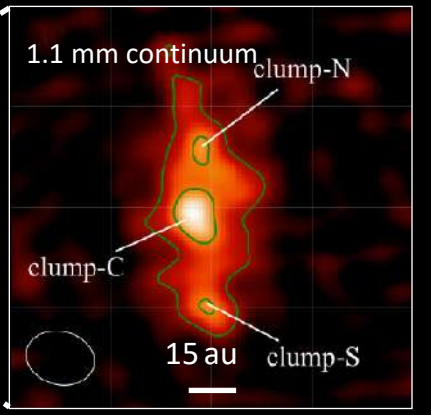
Sakai+ (2014)
Nature
507, 58

円盤形成



Sakai+ (2017)
Mon. Not. R. Astron. Soc.
467, L76

円盤内構造形成



ギャップ構造 : Nakatani, Sakai+ (2020)
Astrophys. J., 895. L2
ワープ構造 : Sakai+ (2019) Nature,565, 206

ALMA(アタカマ ミリ波サブミリ波干渉計)

＋

ngVLA(次世代大型センチ波干渉計)

Credit: NRAO/AUI/NSF

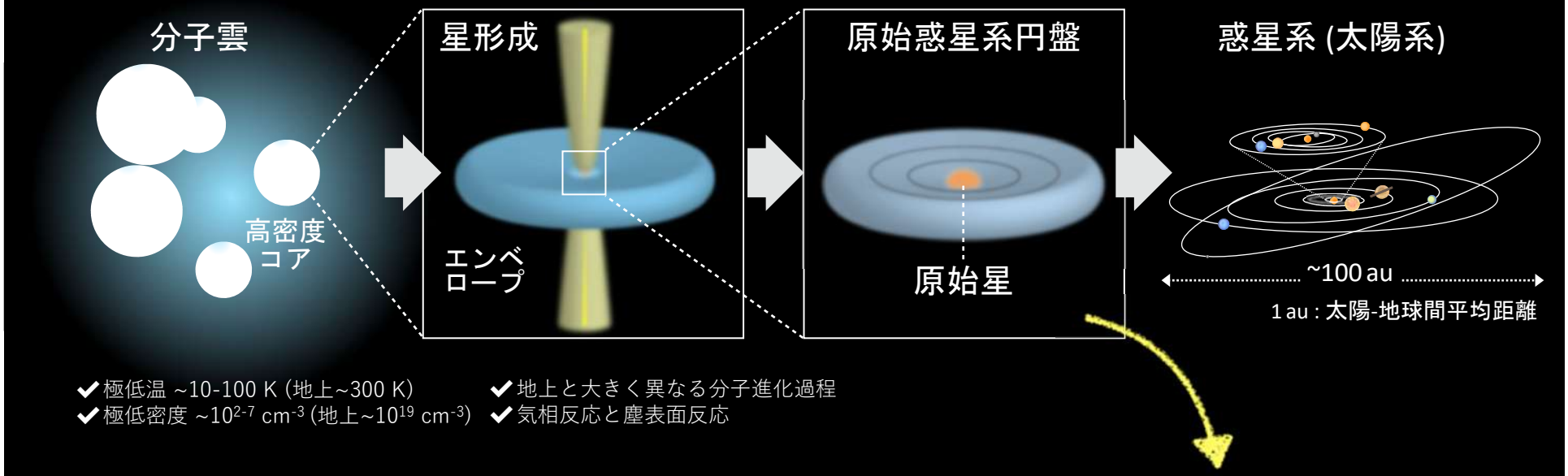
ngvla
Next Generation Very Large Array

センチ波でなければ
観えない世界がある。

SCROLL

ngVLAとは　サイエンス　観測装置　国際協力　ギャラリー　ニュース&イベント　For Researchers　検索

太陽系の化学的起源と宇宙の中での存在価値



✔極低温 ~10-100 K (地上~300 K)
✔極低密度 ~$10^{2\text{-}7}$ cm^{-3} (地上~10^{19} cm^{-3})
✔地上と大きく異なる分子進化過程
✔気相反応と塵表面反応

？ 星・惑星はどのようにできるのか

太陽系の起源　--私たちの起源--

？ 星・惑星の組成はどのように作られるのか

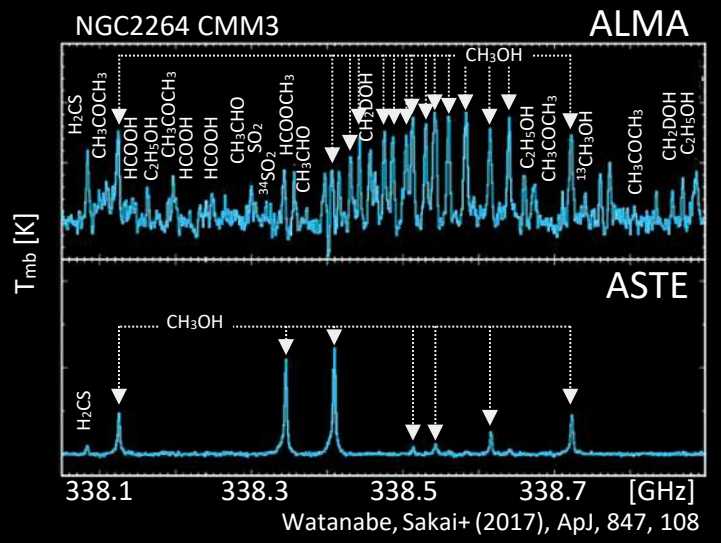
原子→単純な分子→複雑な分子→高分子→・・・生命？

？ どこでもおなじ組成か → 否

私たちは宇宙の中でありふれた存在か？

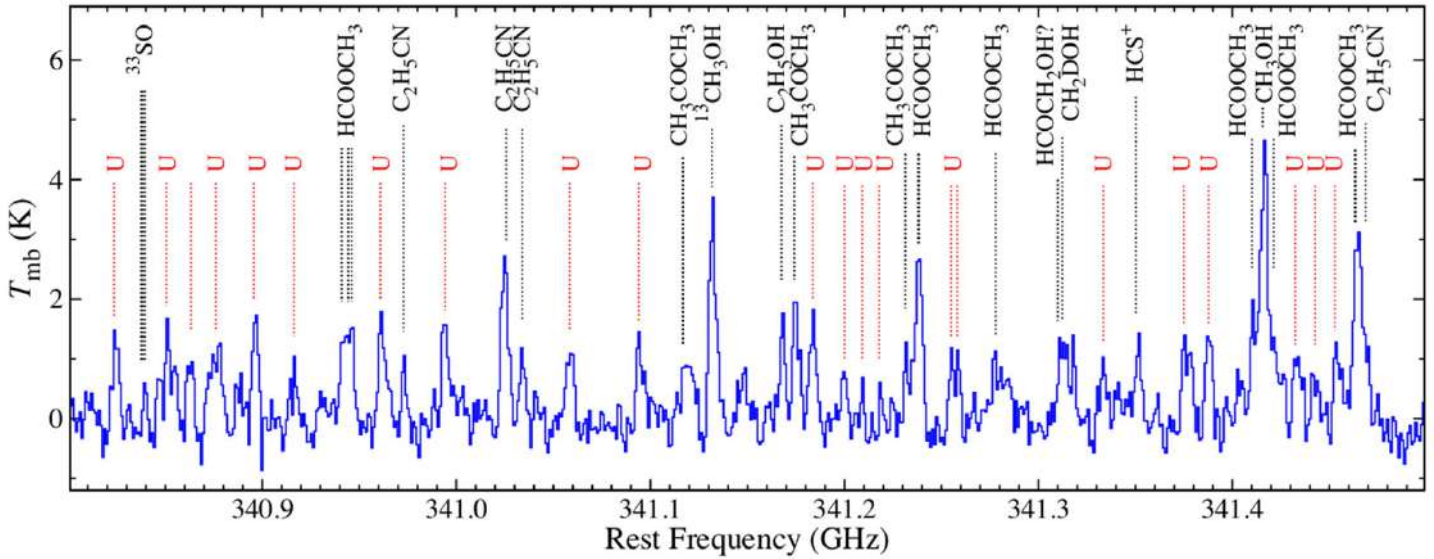
？ なぜ異なるのか

星の誕生過程に起因・私たちの宇宙の中での希少性

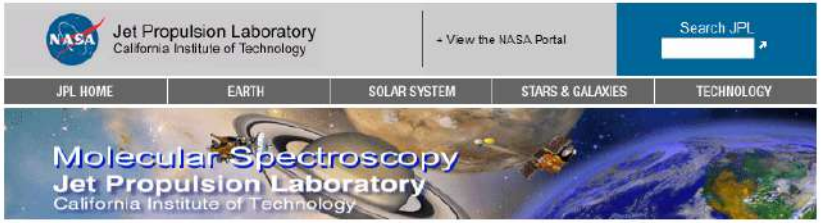


Watanabe, Sakai+ (2017), ApJ, 847, 108

原始星NGC2264CMM3AをとりまくガスをALMAで観測：たくさんの未同定線

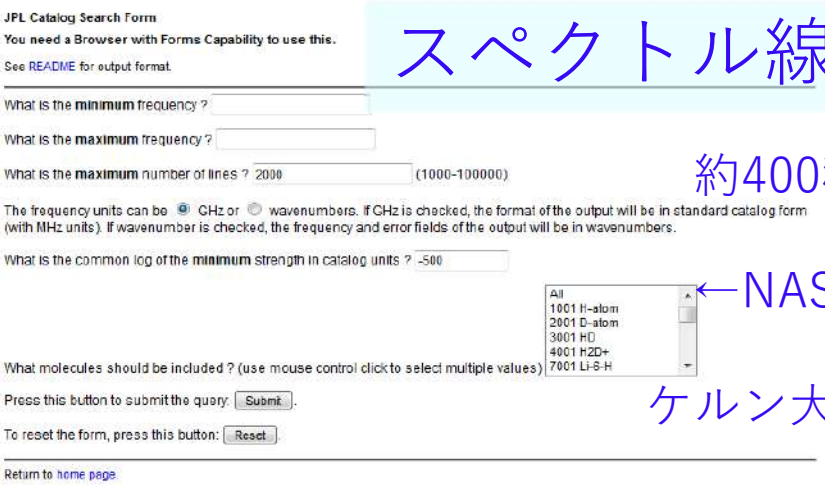


(Watanabe, Y., Sakai, N. et al. 2017, ApJ, 847, 108)



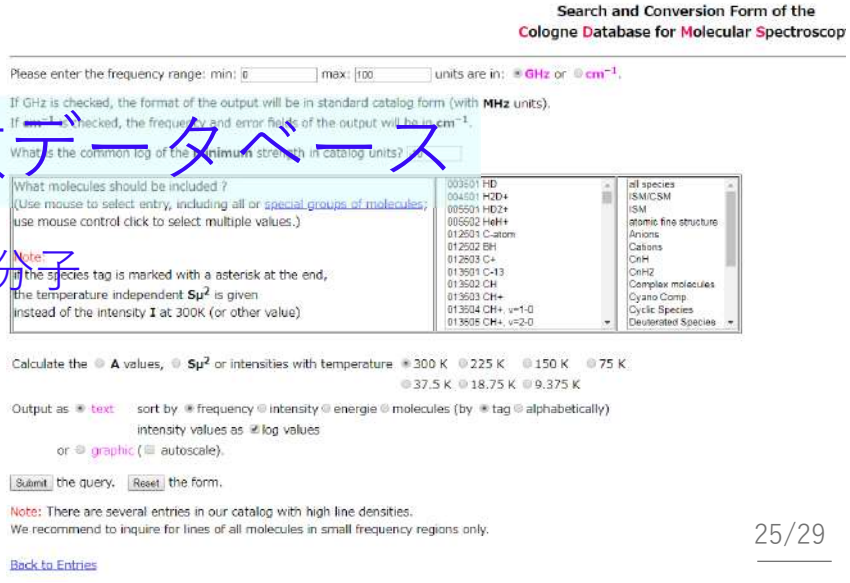
スペクトル線 周波数データベース

約400種の原子・分子



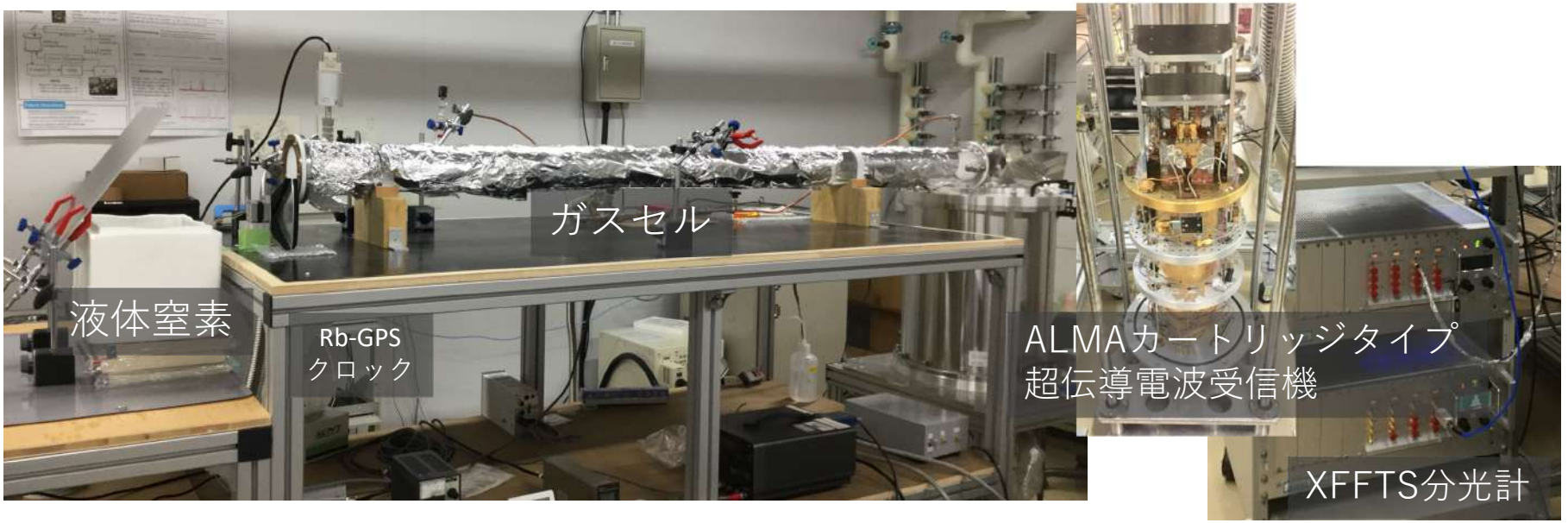
←NASA JPL

ケルン大学CDMS→

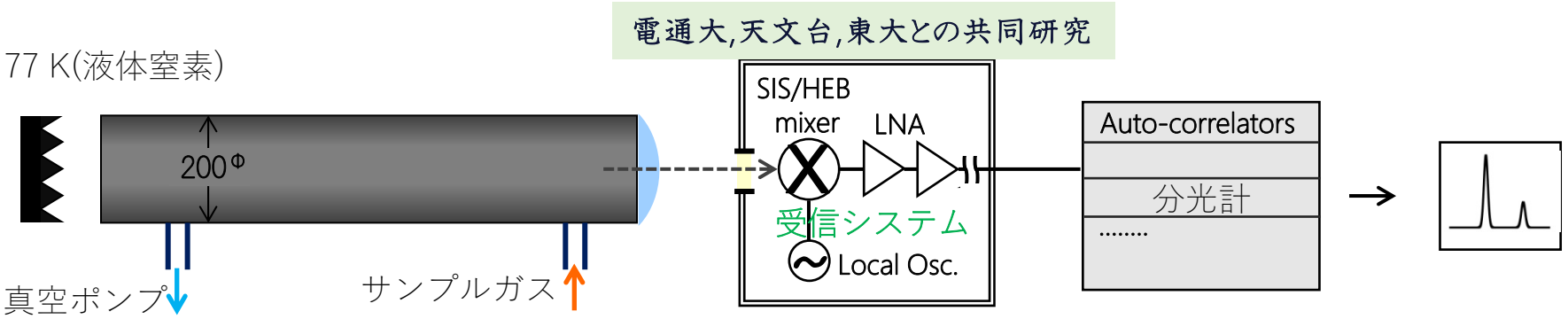


(T)SUMIRE@理研

(THz) Spectrometer Using superconductor MIxer Receiver ((T)SUMIRE)



放射型分光計(天体の代わりにガスセルを“ALMA受信機で観測”)



利点：広周波数帯域同時測定、強度の信頼性、細いスペクトル線幅、直接比較

(Watanabe, Y.,, Sakai, N. et al. 2021, PASJ, in press)

研究ネットワーク構築

Next Generation Astrochemistry

計算科学
(物理シミュレーション・化学反応・量子化学・解析自動化)

物質史の全貌理解
原子
原子核
素粒子

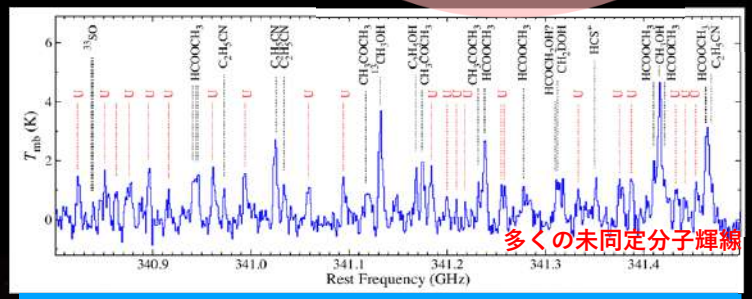
極限計測・測定技
テラヘルツ分光

分子分光

分子同定に必要なスペクトル線の波長測定、
分子の温度・存在量

天文観測

惑星科学
はやぶさ2・OSIRIS－RExなど



ALMA・ngVLA時代の天文学：宇宙の物質史

CO(一酸化炭素)
CCH(炭素鎖分子)
などの生成

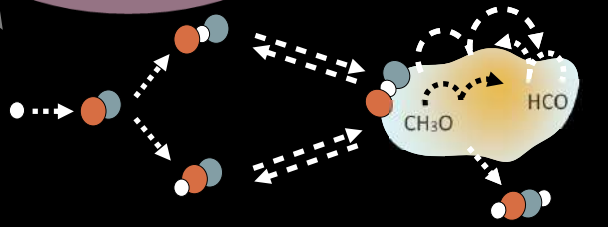
H_2O(水)
CH_4(メタン)
などの生成

新たな分子科学の発展も
(例：炭素鎖分子の発見→フラーレン科学)

気相反応化学

固相(表面)反応

物性物理

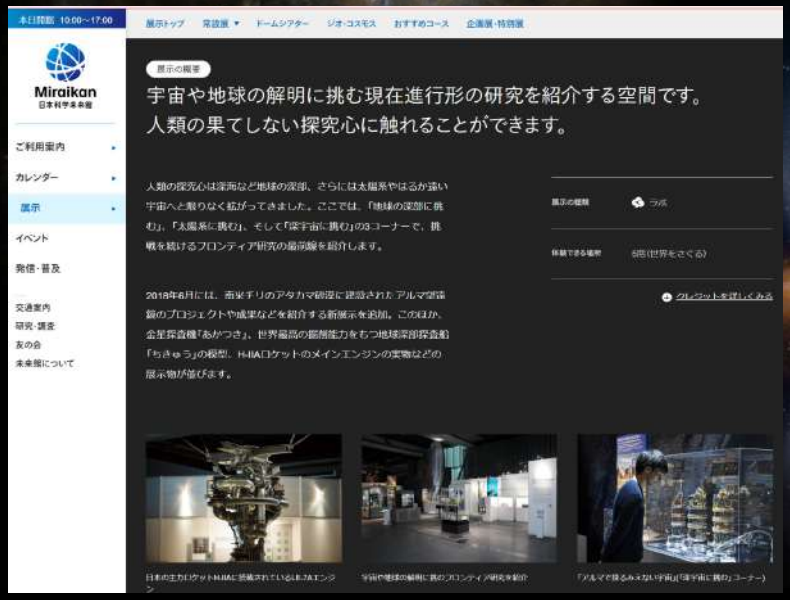


高分子化学
(どこまで複雑な分子が「宇宙」で出来るのか？→生命？？)

学術変革領域(A)「次世代星間化学」2020-2024, 採択(代表)

社会貢献・学術貢献活動

・一般向け講演会/一般向け雑誌記事協力・執筆等
・地元の小中学生に講演会(毎年)など
・宇宙電波懇談会(電波天文学のコミュニティ団体)（2016-2020; 2018-2020会長）
・ALMA国際科学諮問委員会(ASAC)　（2018-現在）
・国立天文台/東アジア アルマ科学諮問委員会(JSAC/EASAC)　（副議長：2014-現在）
・ngVLA国際科学検討委員会(ngVLA-SAC)　（2017-現在）
・国立天文台科学戦略委員会（外部委員2018-2020）
・国立天文台運営委員会（外部委員2020-現在）
・日本学術会議連携会員（2020-現在）



(科学未来館HPより)

(ナショナルジオグラフィックHPより)

教育・職歴
1993.03 国立学園小学校卒業
1996.03 桜蔭学園中学校卒業
1999.03 桜蔭学園高校卒業
2004.03 早稲田大学理工学部物理学科卒業
2006.03 東京大学大学院理学系研究科・物理学専攻・修士課程修了
2007.04 日本学術振興会特別研究員(DC2)
2008.09 東京大学大学院理学系研究科・物理学専攻・博士課程修了(早期終業年限特例)
2008.10 同機関助教
(2012.10 第一子出産)
2015.04 理化学研究所・准主任研究員
(2015.11 第二子出産)
2017.04 理化学研究所・主任研究員

ありがとうございます