

2018.11.21-22 ALMAワークショップ 円盤から太陽系へ

彗星の高分散分光観測から探る 原始太陽系円盤の化学進化

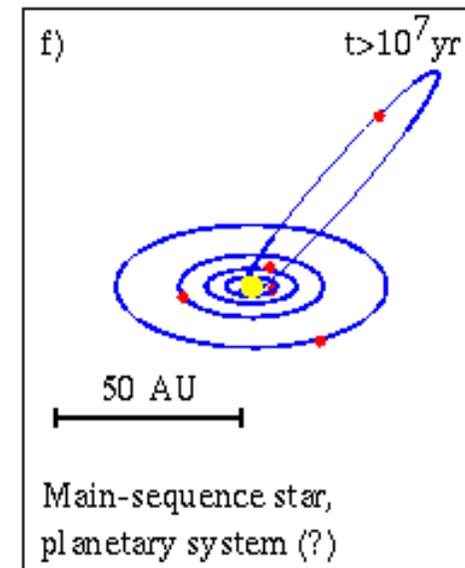
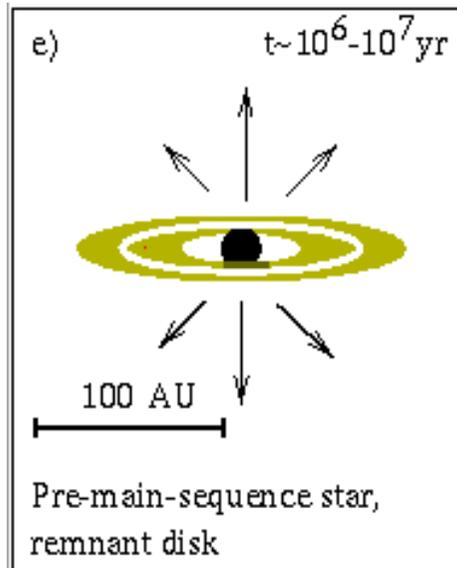
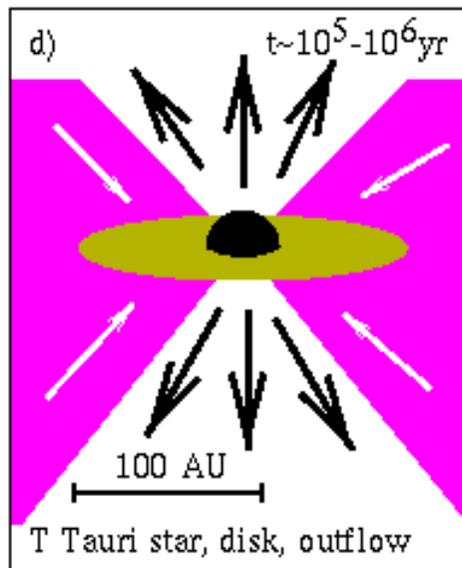
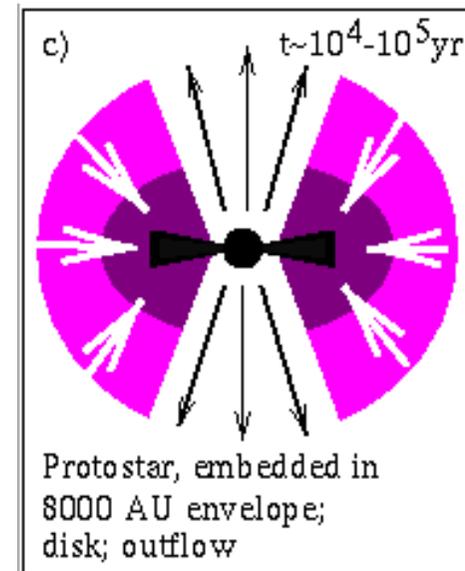
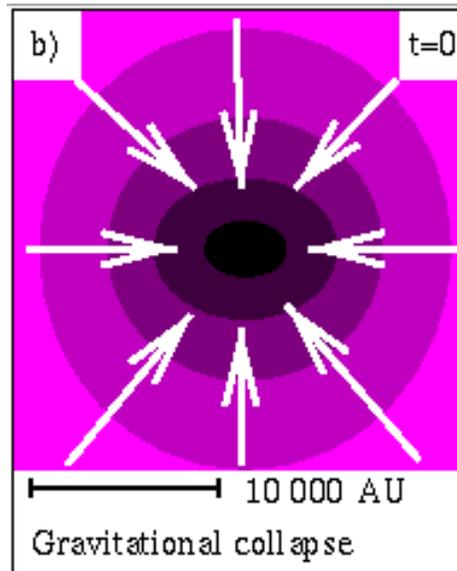
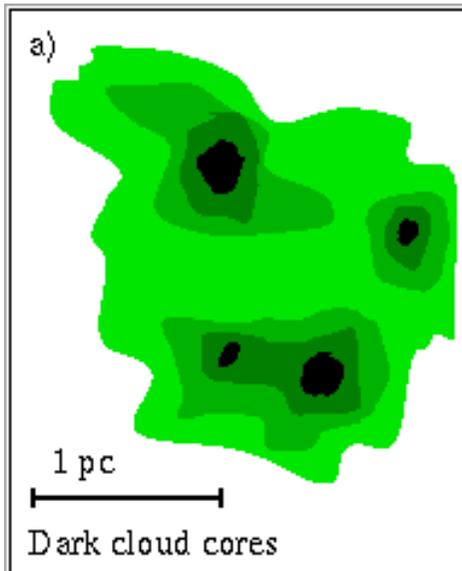
小林仁美 (LLP京都虹光房)

河北秀世、新中善晴 (京都産業大学/神山天文台)

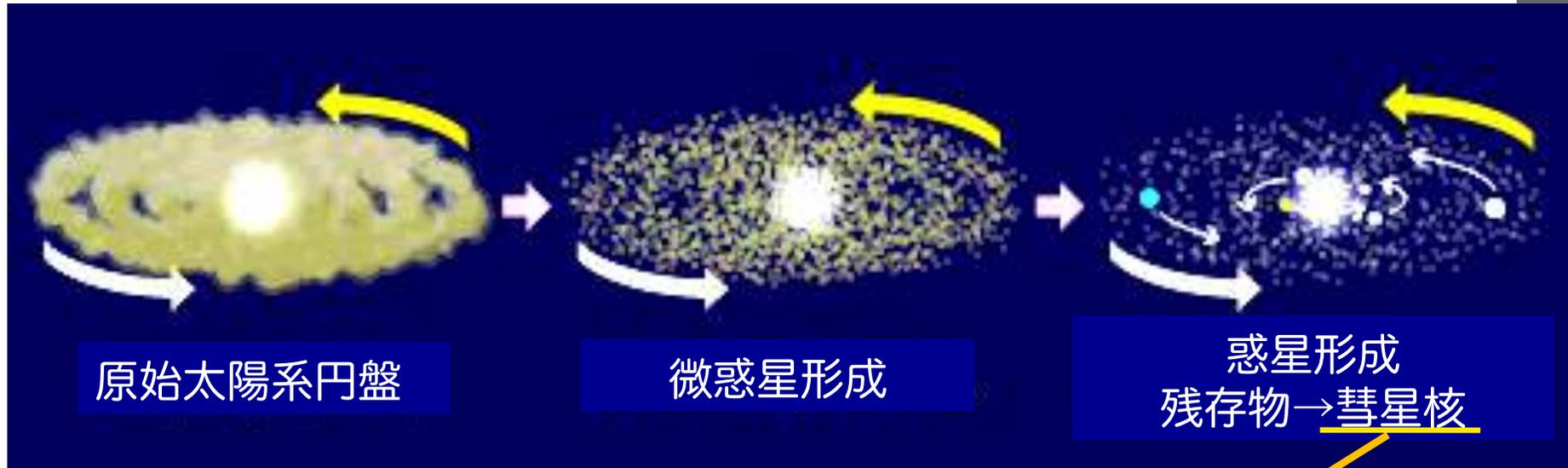
Outline

- ・ 太陽系の形成と彗星
- ・ 彗星の高分散分光観測
 - 分子の化学組成比
 - 原子核スピン異性体比と核スピン温度
 - 同位体比
- ・ 今後の観測に向けて

太陽系の形成と彗星



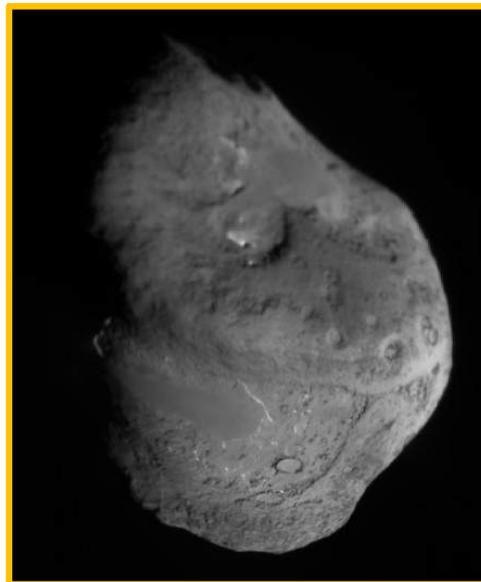
太陽系の形成と彗星



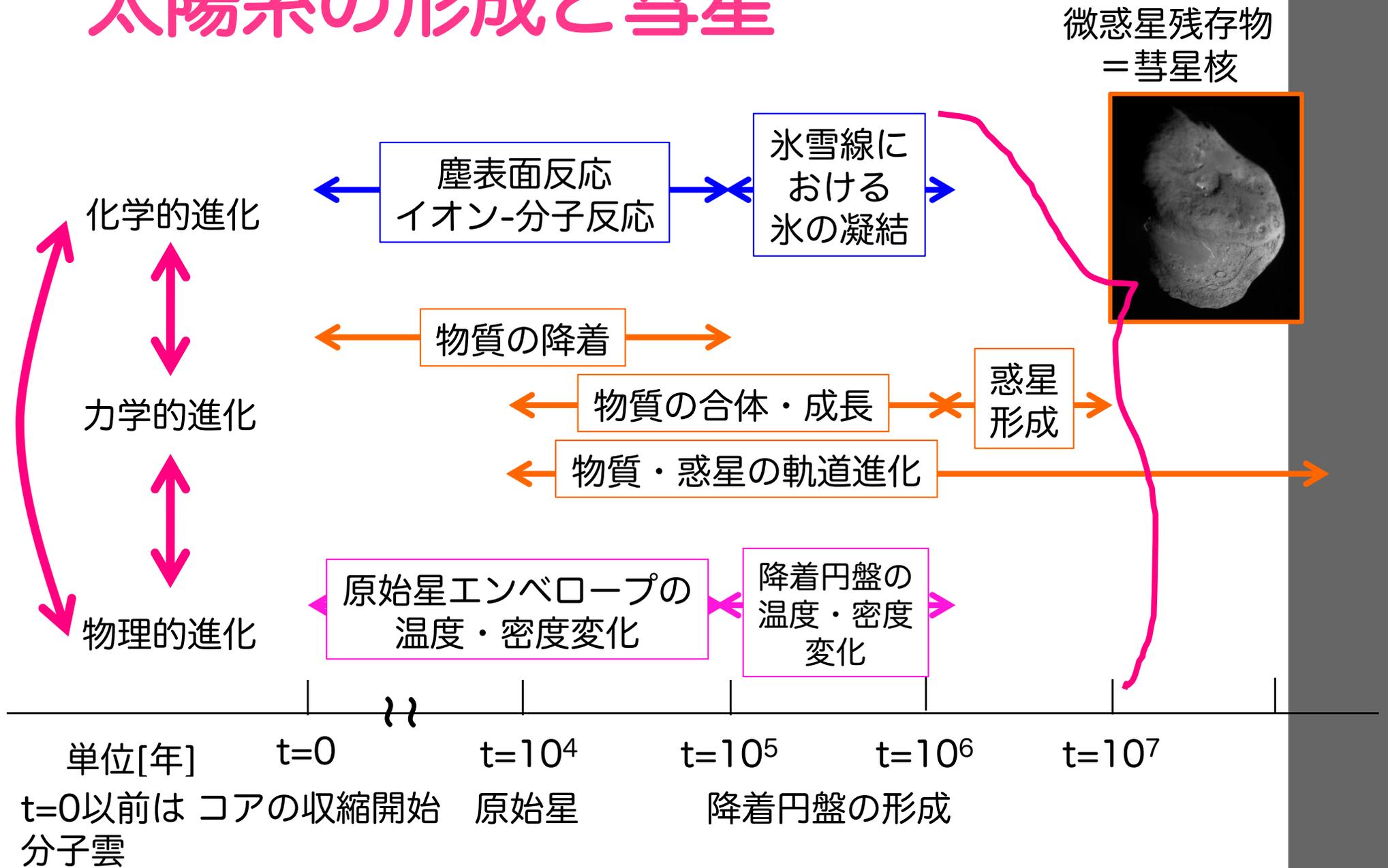
19P/Borrelly



9P/Tempel 1

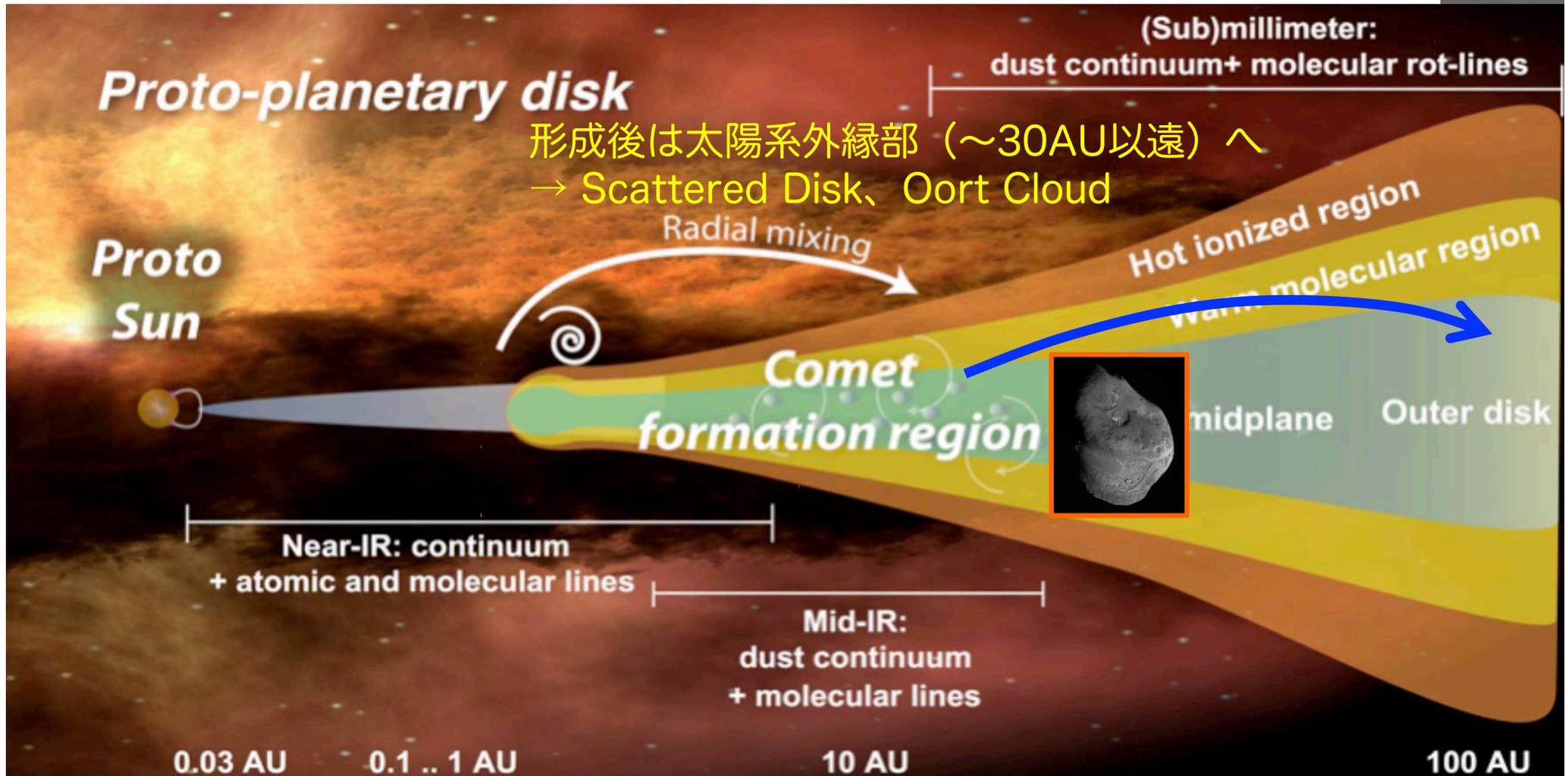


太陽系の形成と彗星



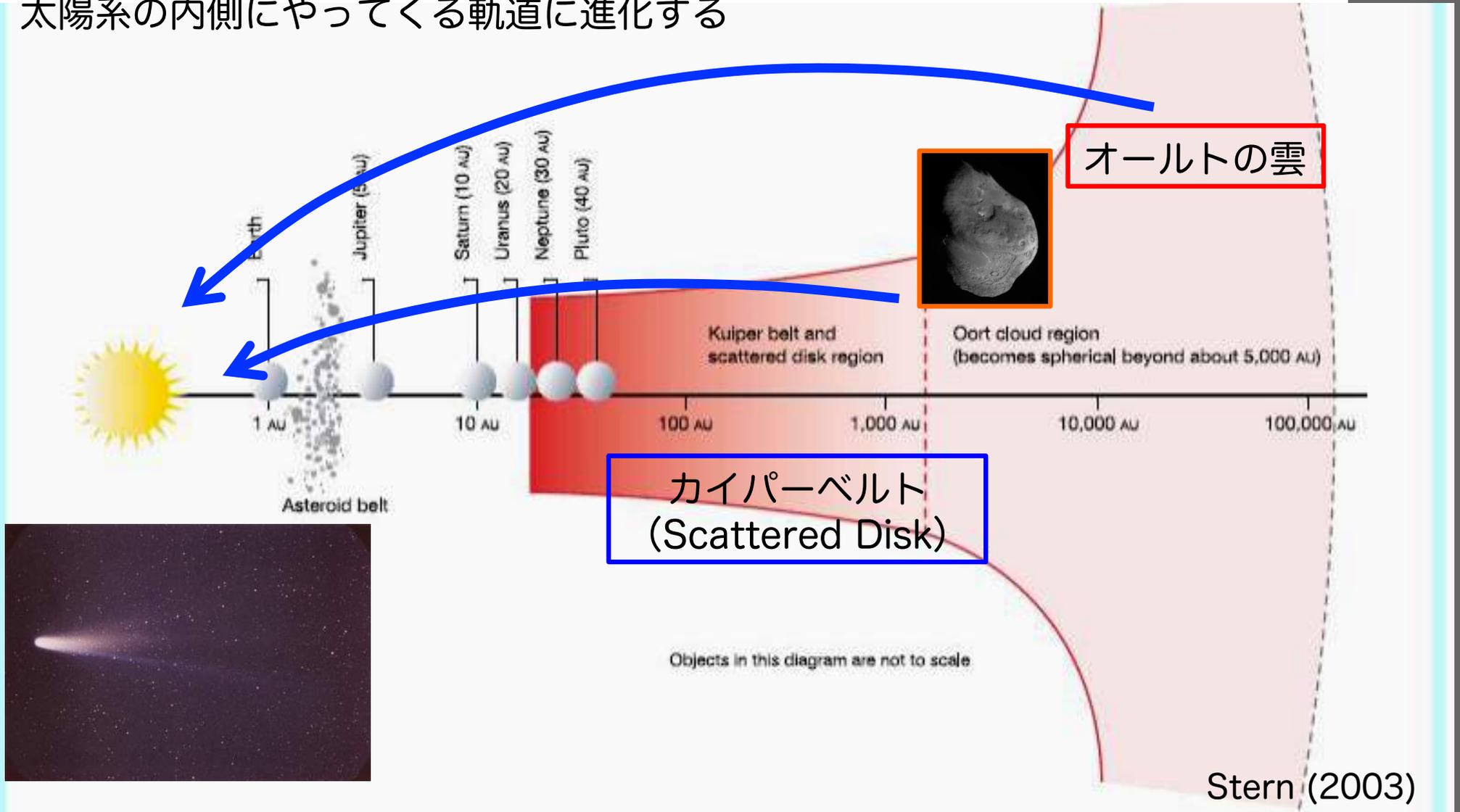
太陽系の形成と彗星

彗星の形成領域



太陽系の形成と彗星

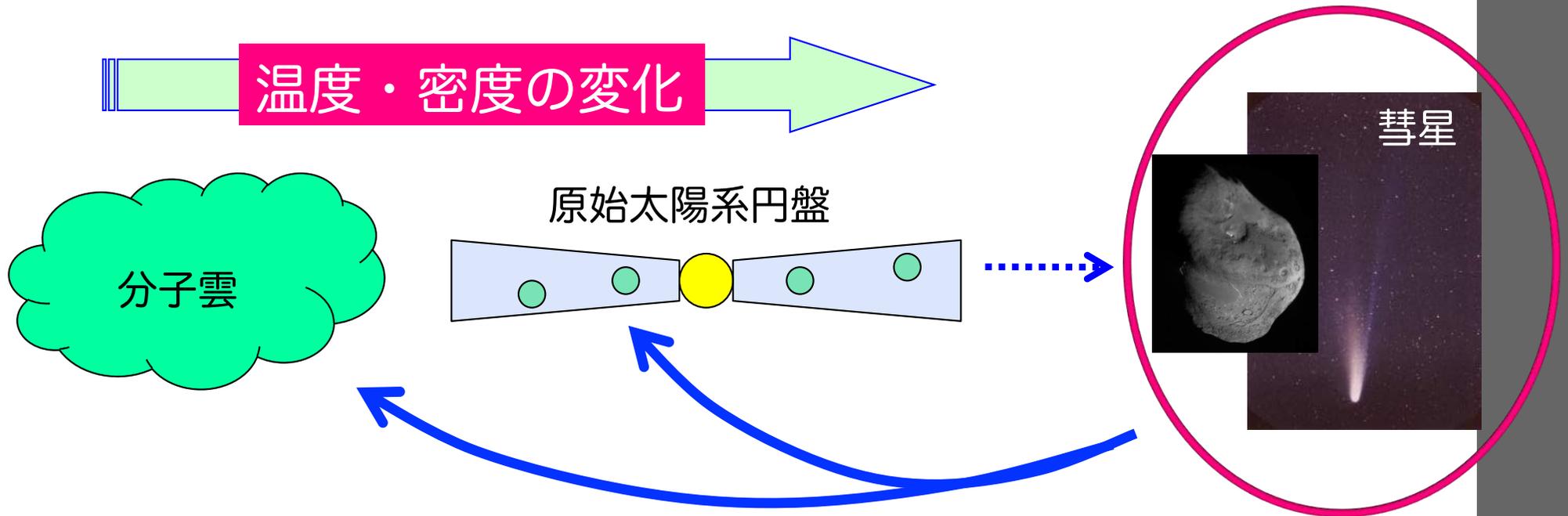
太陽系外縁部に存在する彗星核が何かのきっかけで太陽系の内側にやってくる軌道に進化する



太陽系の形成と彗星

*知りたいこと

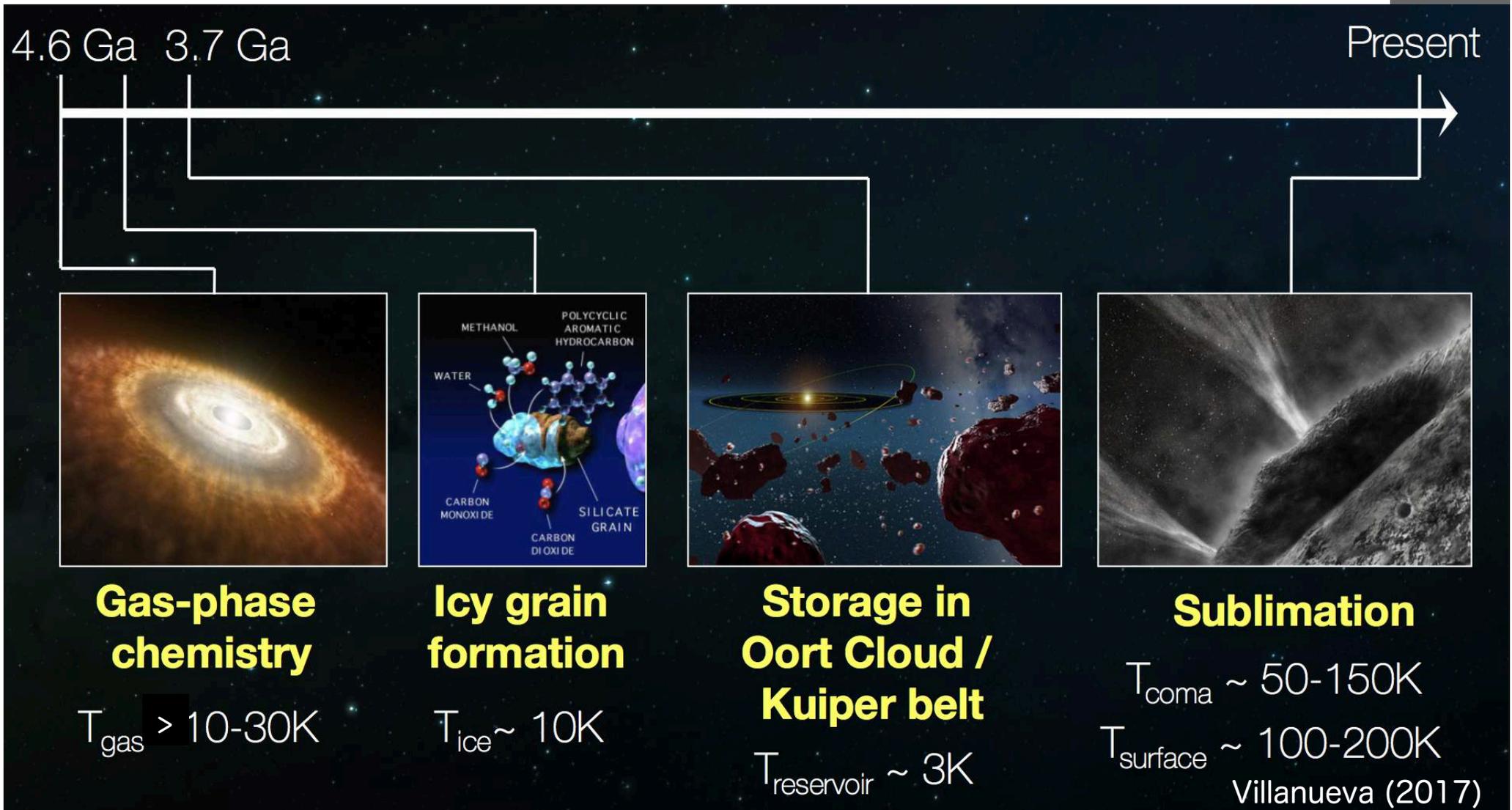
- 太陽系の元となった分子雲・原始太陽系円盤の温度
(=彗星に取り込まれている物質の形成温度)
- 分子雲/原始太陽系円盤での化学反応プロセス



彗星を手がかりに、過去の環境を探る

太陽系の形成と彗星

彗星に取り込まれている物質は、様々な温度環境を経験する…



彗星が形成される前の温度情報を反映している指標は??

Outline

- 太陽系の形成と彗星
- 彗星の高分散分光観測
 - 分子の化学組成比
 - 原子核スピン異性体比と核スピン温度
 - 同位体比
- 今後の観測に向けて

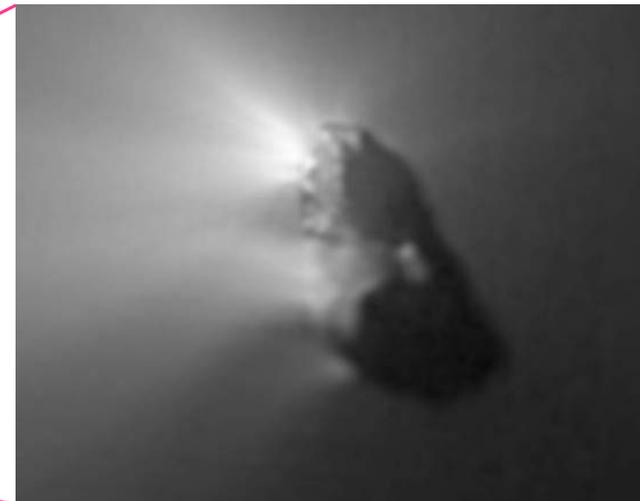
彗星の高分散分光観測

彗星の観測

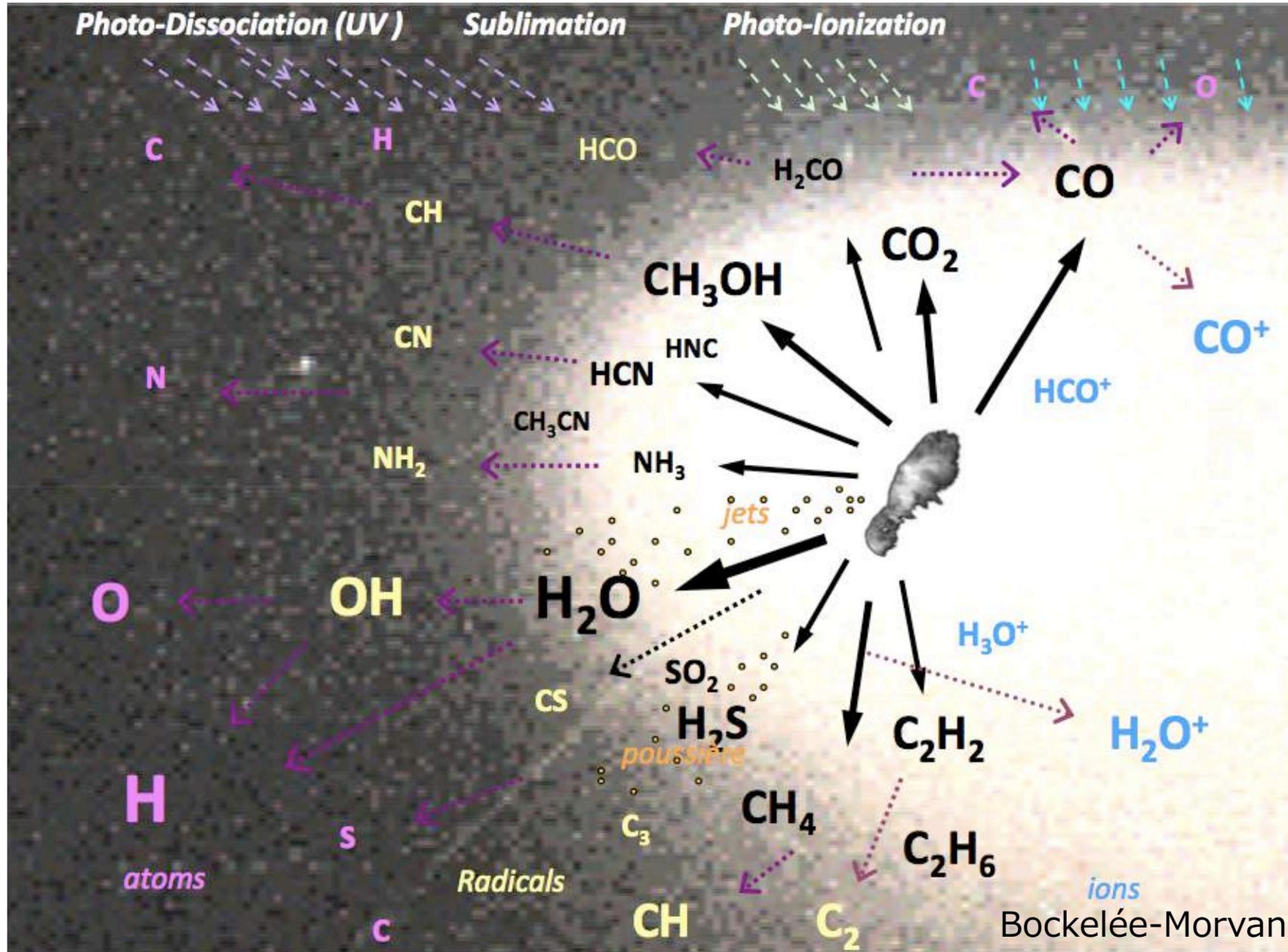


- 彗星核の観測
(ほぼ探査機による観測のみ)
- 彗星コマ中のガス (= 彗星核に含まれる氷) の観測
- 塵の観測

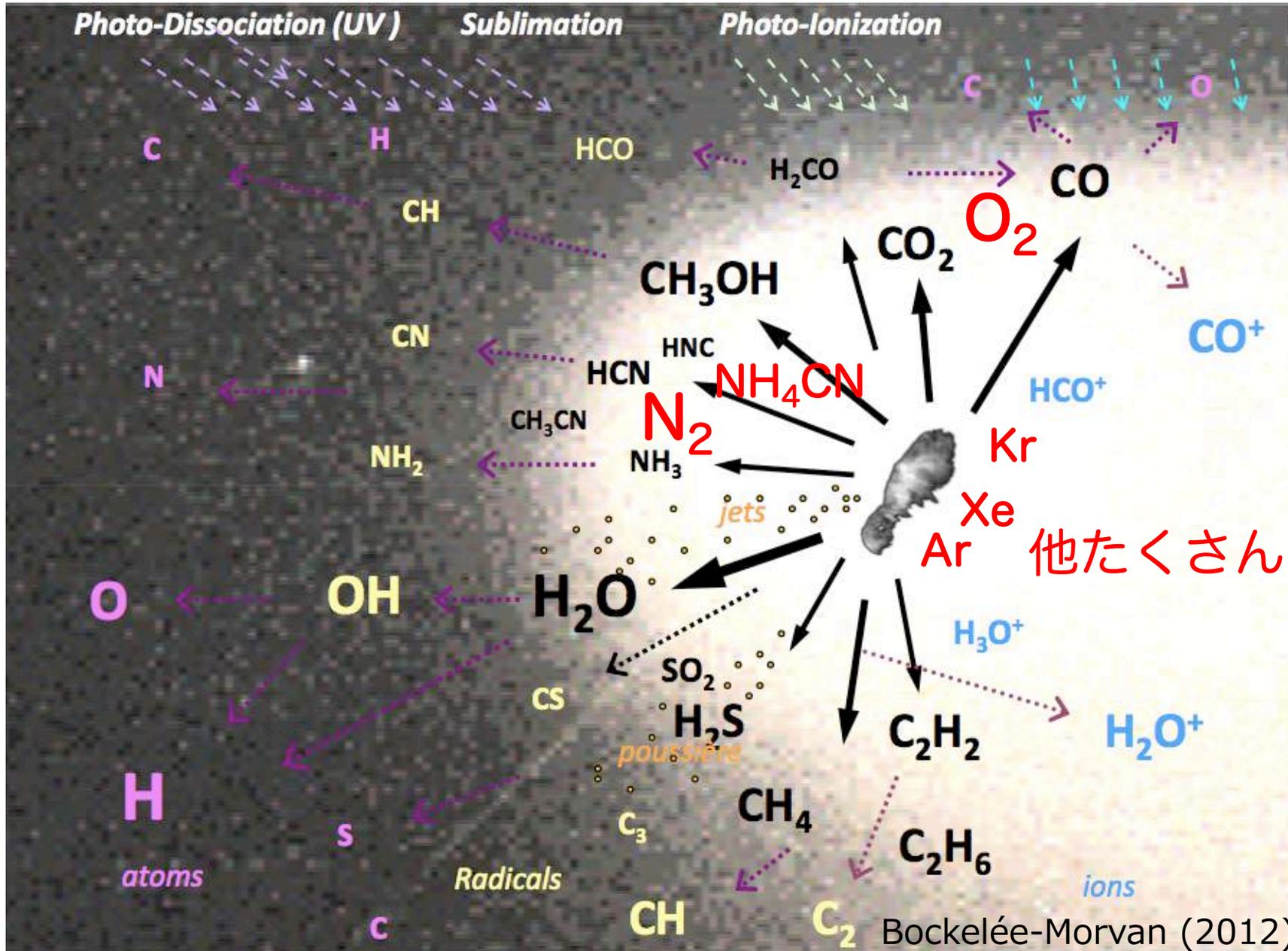
彗星核：塵 + H₂O、CO₂、COなどの氷



彗星の高分散分光観測



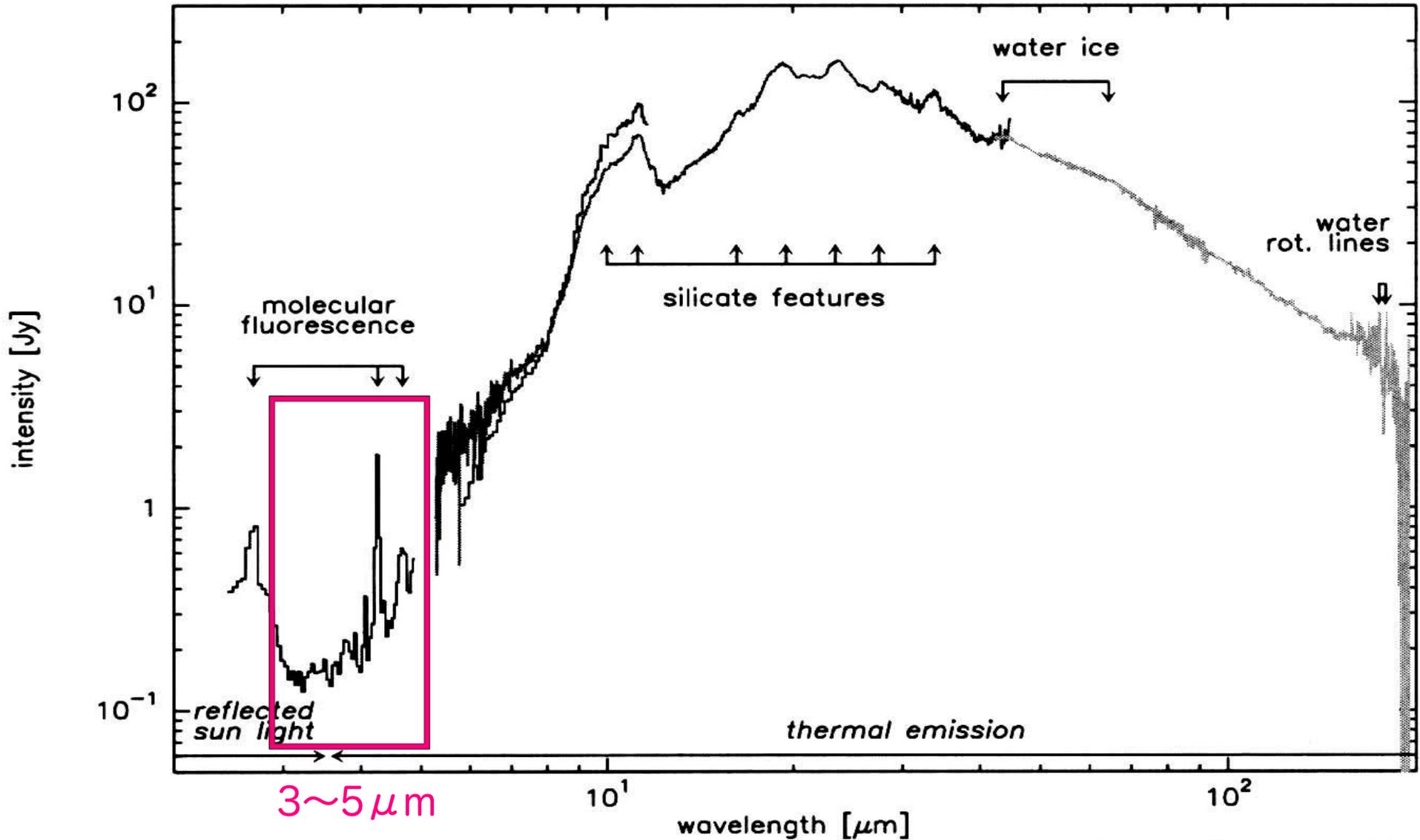
彗星の高分散分光観測



彗星の高分散分光観測

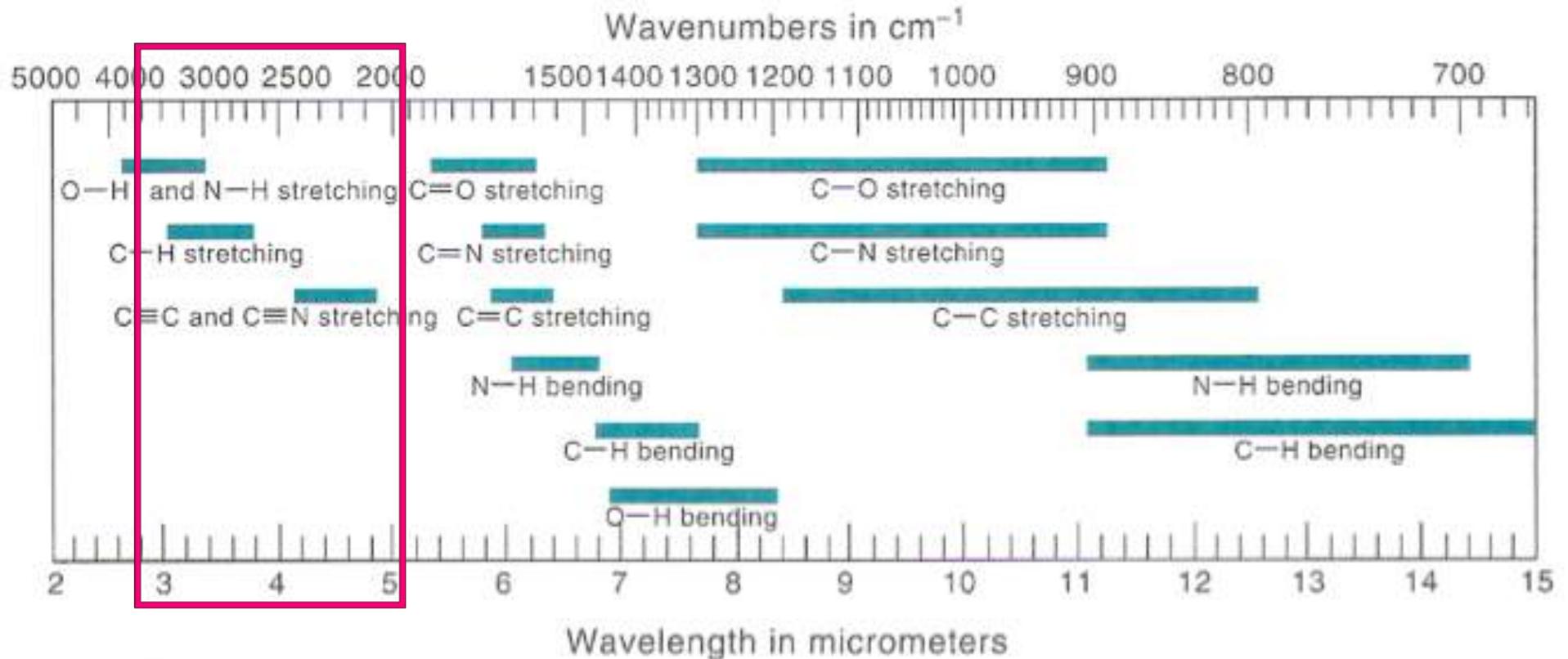
赤外線スペクトル

C/1995 O1 (Hale-Bopp) 7 Oct. 1996



彗星の高分散分光観測

近～中間赤外線

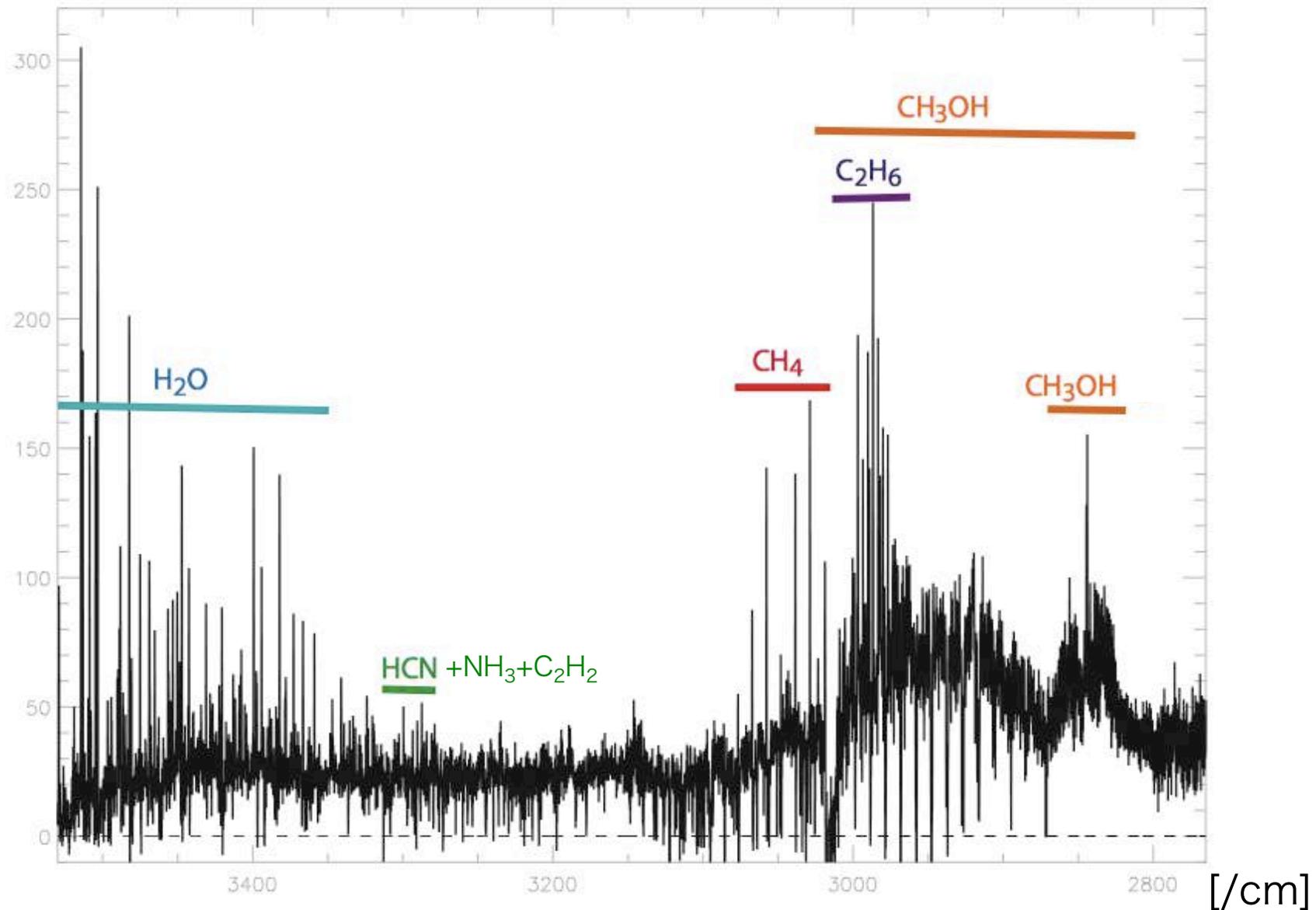


彗星ガスを観測したい場合は、波長分解能が高いほどS/Nが上がる
(ダストによる連続光成分が薄まるため)

彗星の高分散分光観測

COMET LULIN UT FEB 15, 2009 (Subaru IRCS)

$\lambda / \Delta\lambda \sim 10,000$

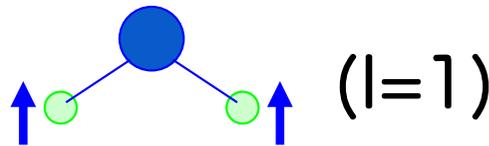


彗星の高分散分光観測

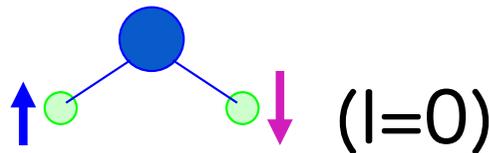
分子の生成温度（形成環境の温度＝分子の起源）の研究手法

- 分子組成比 $:[X]/[H_2O]$: $X = HCN, C_2H_2, CH_4, C_2H_6 \dots$
⇒ 彗星核の形成環境の温度および化学反応ネットワークに制限
- 原子核スピン異性体比（オルソ/パラ比） :

例) ortho- H_2O



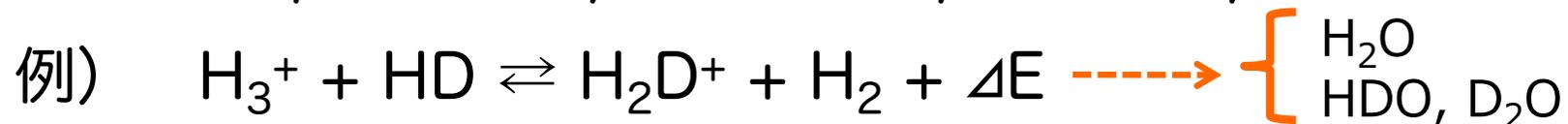
para- H_2O



相互遷移は
ほとんどない。

⇒ オルソ/パラ存在比は分子形成環境に依存？

- 同位体比（D/H比、 $^{12}C/^{13}C$ 比、 $^{14}N/^{15}N$ 、 $^{16}O/^{18}O$ 比） :



⇒ 低温度環境下 (<50K) でDが濃集。反応時の温度等に依存？

彗星の分子組成比

赤外線高分散分光観測から得られた彗星の化学組成比

Table 3
Average molecular mixing ratios in comets from IR measurements.

Sublimation temperature (K) ^b	Relative production rates (% with respect to H ₂ O) ^a								
	H ₂ O	CH ₃ OH	HCN	NH ₃	H ₂ CO	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	CH ₄	CO
	152	99	95	78	64	54	44	31	24
Jupiter-family comets									
2P/Encke	100	3.48	0.09		<0.13	<0.08	0.31	0.34	<1.77
6P/d'Arrest	100	2.8	0.03	0.52	0.36	<0.05	0.29		
9P/Tempel 1	100	1.4	0.20	0.9	0.84	0.13	0.29	0.54	4.3
10P/Tempel 2	100	1.58	0.13	0.83	<0.11	<0.07	0.39		
17P/Holmes	100	(4.1)	(0.54)	(<0.5)		(0.34)	(1.85)		
21P/G-Z	100	1.22	<0.27		(< 0.8)	<0.42	0.12		2.2
73P/SW3-B	100	0.54	0.29	<0.09	0.14	0.03	0.17	(<4.1)	(<1.9)
73P/SW3-C	100	(0.49)	(0.22)	(<0.16)	(0.12)	(0.03)	(0.11)	<0.25	0.53
81P/Wild 2	100	0.9	0.27	0.6	0.22	0.15	0.45		
103P/Hartley 2	100	1.95	0.24	0.66	0.13	0.10	0.75	<0.47	0.3
OORT cloud comets									
8P/Tuttle	100	2.00	0.07		<0.04	0.04	0.26	0.37	0.40
153P/I-Z	100	2.9	0.21		0.83	0.21	0.57	0.50	5.7
C/1995 O1	100		0.36			0.28	0.62	1.22	26.2
C/1996 B2	100		0.19			0.20	0.61	0.95	18.2
C/1999 H1	100	1.9	0.22	0.70	0.7	0.25	0.63	1.22	1.6
C/1999 S4	100	<0.2	0.09			<0.13	0.09	0.15	0.58
C/1999 T1	100	1.7	0.37				0.65	1.4	17
C/2000 WM ₁	100	0.95	0.14		0.20	<0.05	0.47	0.35	0.48
C/2001 A2	100	2.97	0.47		0.15	0.37	1.60	1.48	3.9
C/2002 T7	100	3.4			0.79				1.9
C/2003 K4	100	1.83	0.07	<0.55	<0.07	<0.04	0.41	0.86	
C/2004 Q2	100	1.52	0.15	0.31	0.16	0.07	0.54	1.37	5.07
C/2006 M4	100	3.28					0.49	0.82	0.50
C/2006 P1	100		0.24	1.5	0.49	0.45	0.47	0.42	1.8
C/2007 N3	100	3.72	0.14	0.24	0.12	0.07	0.68	1.19	2.18
C/2007 W1	100	3.69	0.50	1.74	<0.12	0.29	1.97	1.57	4.50
C/2009 P1	100	2.74	0.25	0.48	0.09	0.07	0.82	0.95	8.9
C/2010 G2	100	(18)	(1.3)				(3.8)	(9)	(91)
C/2012 F6 ^c	100	1.48	0.19	0.52	<0.12	<0.05	0.29		
C/2012 F6 ^d	100				0.54			0.67	4.03
C/2012 S1 ^e	100	1.13	0.07	<0.95	0.16	0.11	0.27	0.32	1.37
C/2012 S1 ^f	100		0.28	3.63	1.1	0.24			
C/2013 R1	100	2.29	0.25	0.10	<0.06	<0.07	0.59	0.92	11.3

^a Values in parentheses were not considered when determining averages for Table 4.

^b Species listed by decreasing sublimation temperature.

^c C/2012 F6 Lemmon measurements at $R_h \geq 1.20$ AU.

^d C/2012 F6 Lemmon measurements at $R_h = 0.75$ AU.

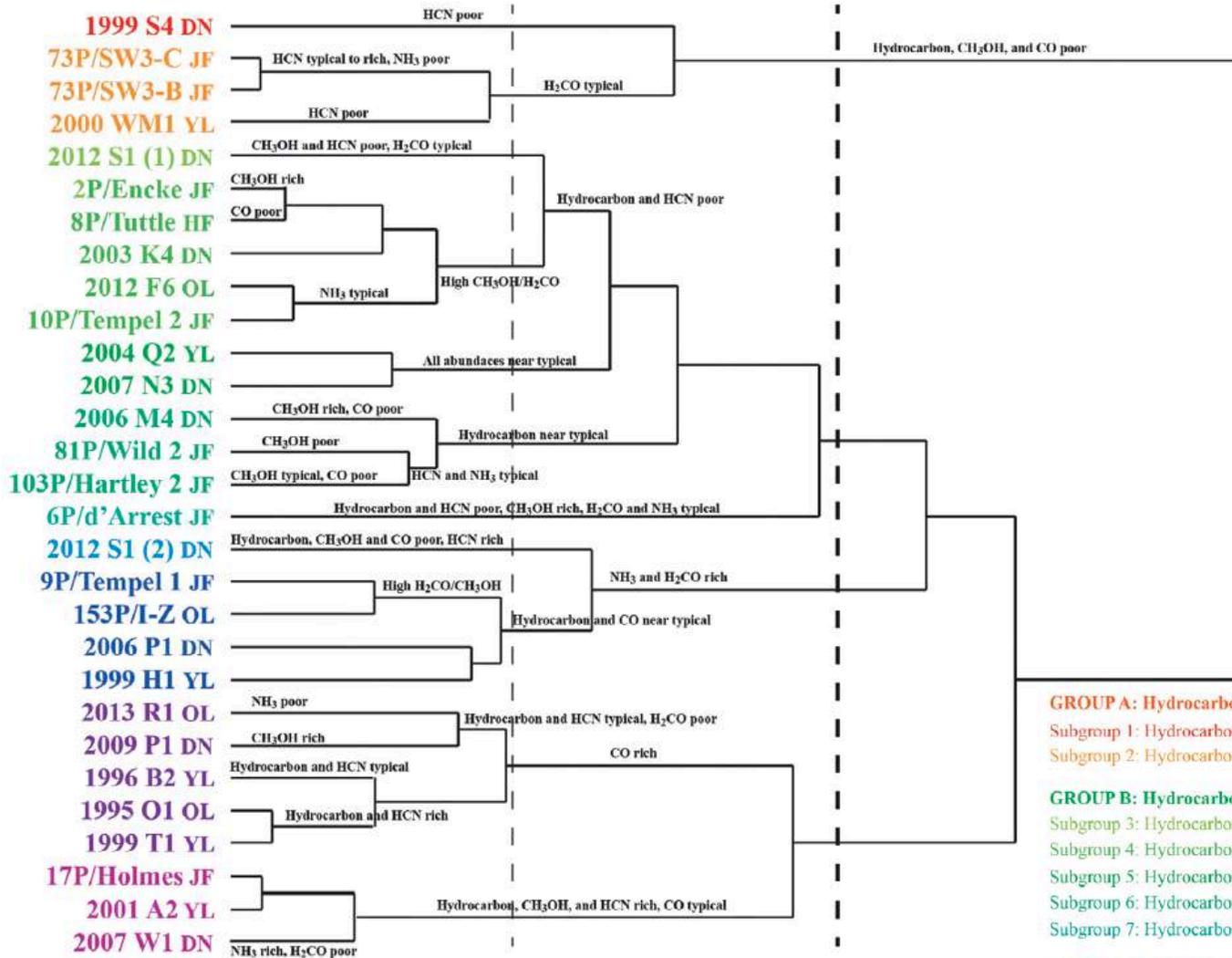
^e C/2012 S1 ISON measurements at $R_h \geq 0.83$ AU.

^f C/2012 S1 ISON measurements at $R_h \leq 0.59$ AU.

~30個程度

Dello Russo et al. (2016)

彗星の分子組成比



Dello Russo et al. (2016)

GROUP A: Hydrocarbon, CH₃OH, and CO poor

Subgroup 1: Hydrocarbon, CH₃OH, HCN and CO poor

Subgroup 2: Hydrocarbon, CH₃OH, and CO poor, H₂CO and HCN typical

GROUP B: Hydrocarbon, HCN, H₂CO, and CO poor to typical, NH₃ typical

Subgroup 3: Hydrocarbon, CH₃OH, and HCN poor, H₂CO typical

Subgroup 4: Hydrocarbon, HCN and H₂CO poor, CH₃OH typical

Subgroup 5: Hydrocarbon, CH₃OH, HCN, NH₃, H₂CO, and CO near typical

Subgroup 6: Hydrocarbon, HCN, NH₃, and H₂CO typical, CO poor

Subgroup 7: Hydrocarbon and HCN poor, CH₃OH rich, NH₃ and H₂CO typical

GROUP C: NH₃ and H₂CO rich, Hydrocarbon and CO poor to typical, CH₃OH and HCN typical

Subgroup 8: Hydrocarbon, CH₃OH, and CO poor, HCN, NH₃, and H₂CO rich

Subgroup 9: Hydrocarbon and CO typical, NH₃ and H₂CO rich

GROUP D: Hydrocarbon, CH₃OH, HCN, and CO typical to rich

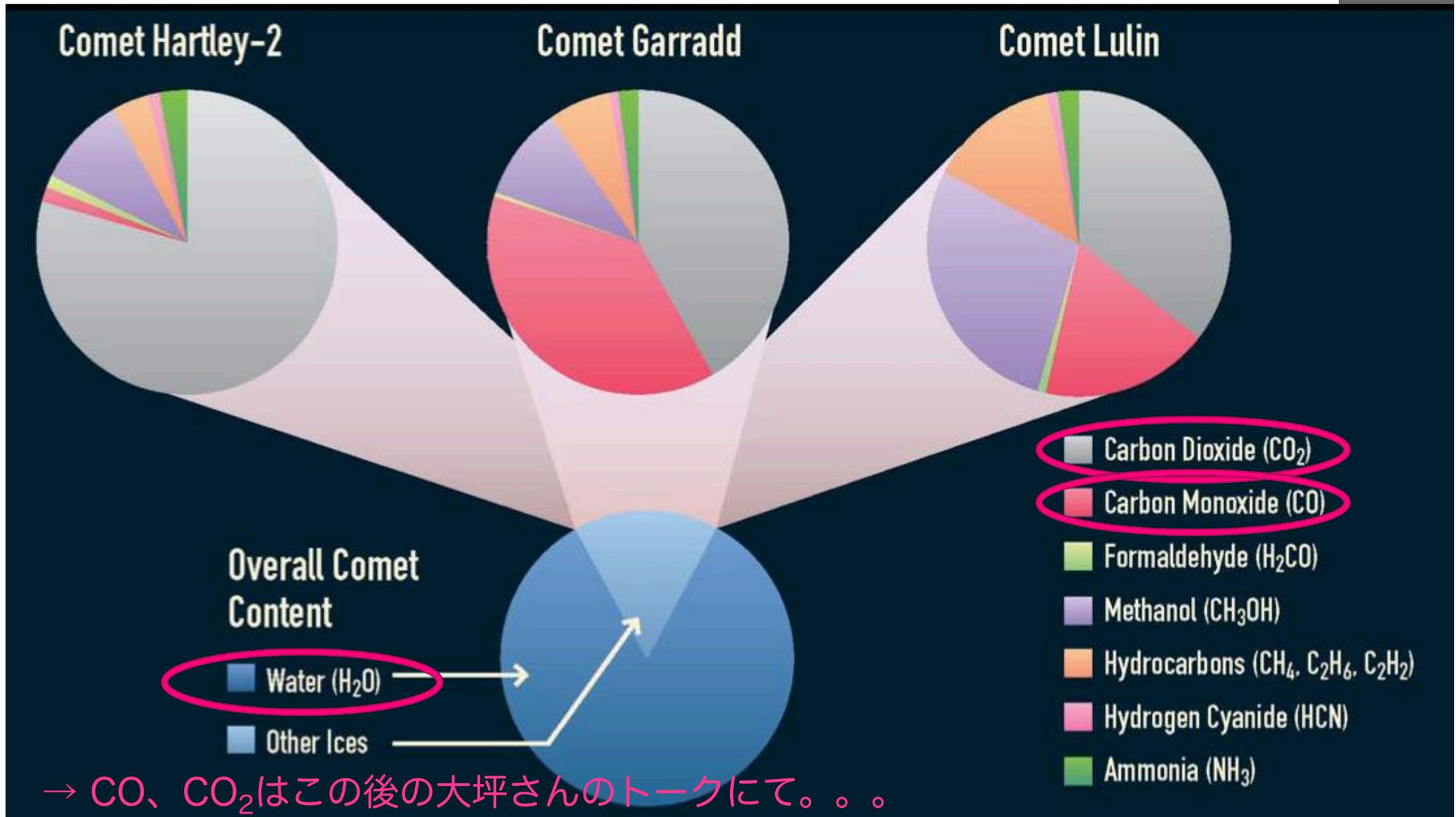
Subgroup 10: Hydrocarbon, CH₃OH, and HCN typical to rich, CO rich

Subgroup 11: Hydrocarbon, CH₃OH, and HCN rich, CO typical

4つのグループに大別できそうだが
サブグループも多い

→ 個々の彗星が経験した化学進化を反映？

彗星の分子組成比



Mumma (private comm.)

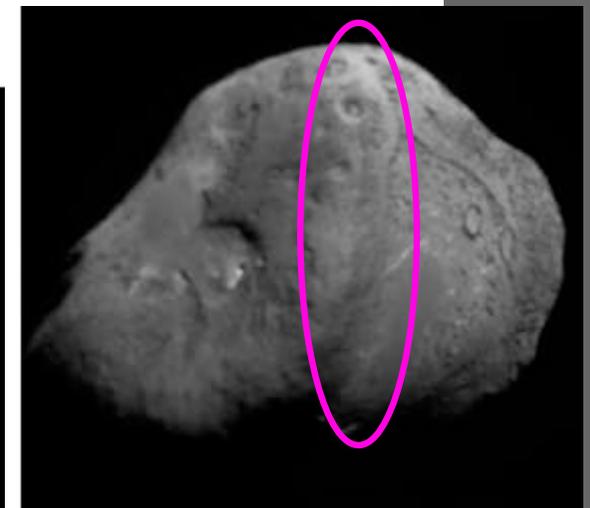
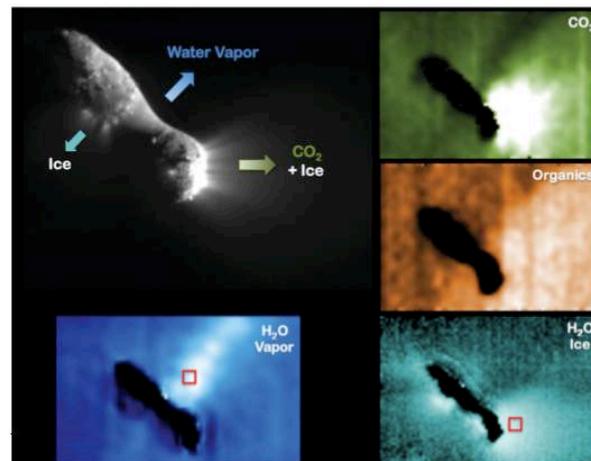
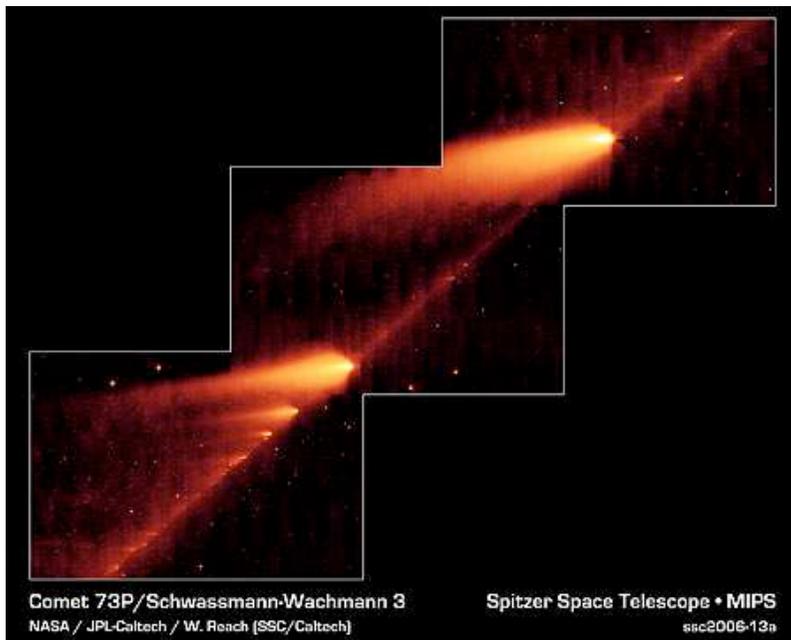
彗星の分子組成比

COとCO₂の組成と原始太陽系円盤内の彗星核形成場所？

73P/SW3-B、C ;
Dello Russo et al. (2007)
CO <2%
分裂彗星

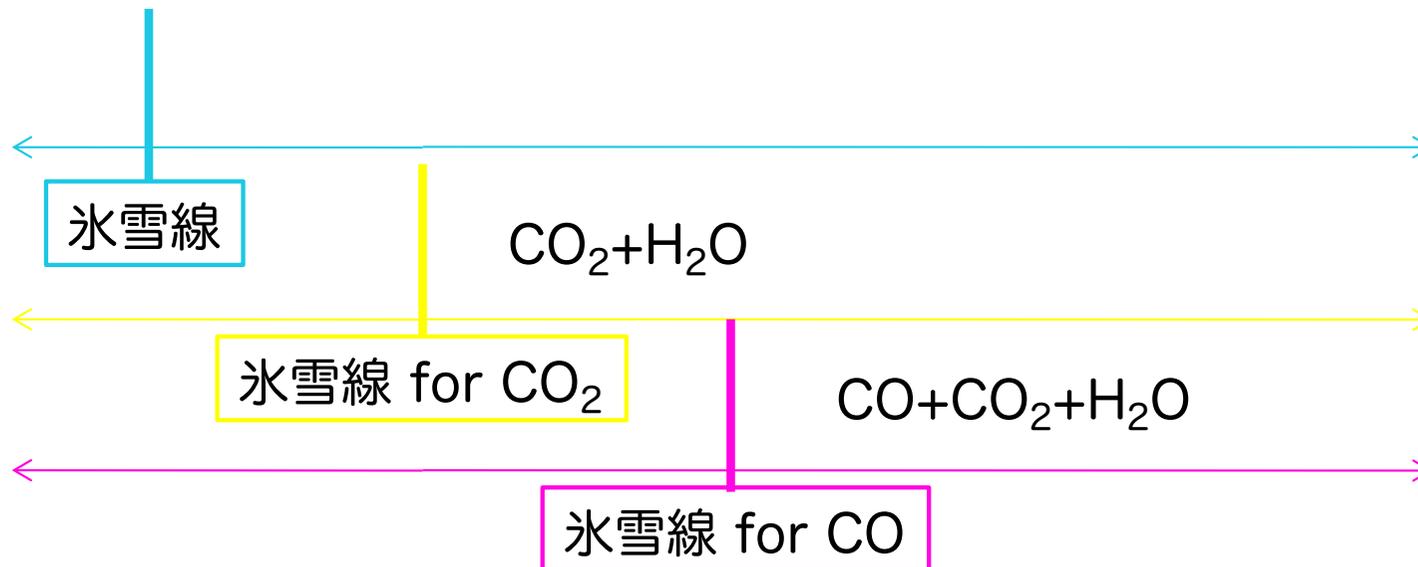
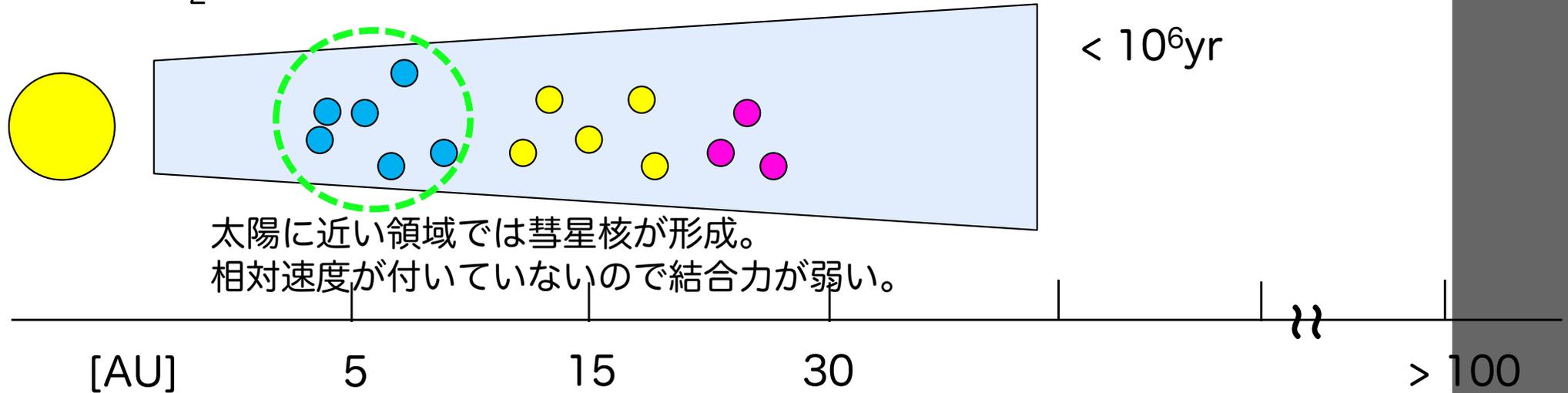
103P/Hartley 2; A'Hearn et al. (2011)
CO₂ ~20 – 10%, CO ~0.5%
2つのcometesimalが結合？

9P/Tempel 1; Feaga et al. (2007)
Belton et al. (2007)
CO₂ ~7%, CO 4~7%
相対速度が大きい状態で結合

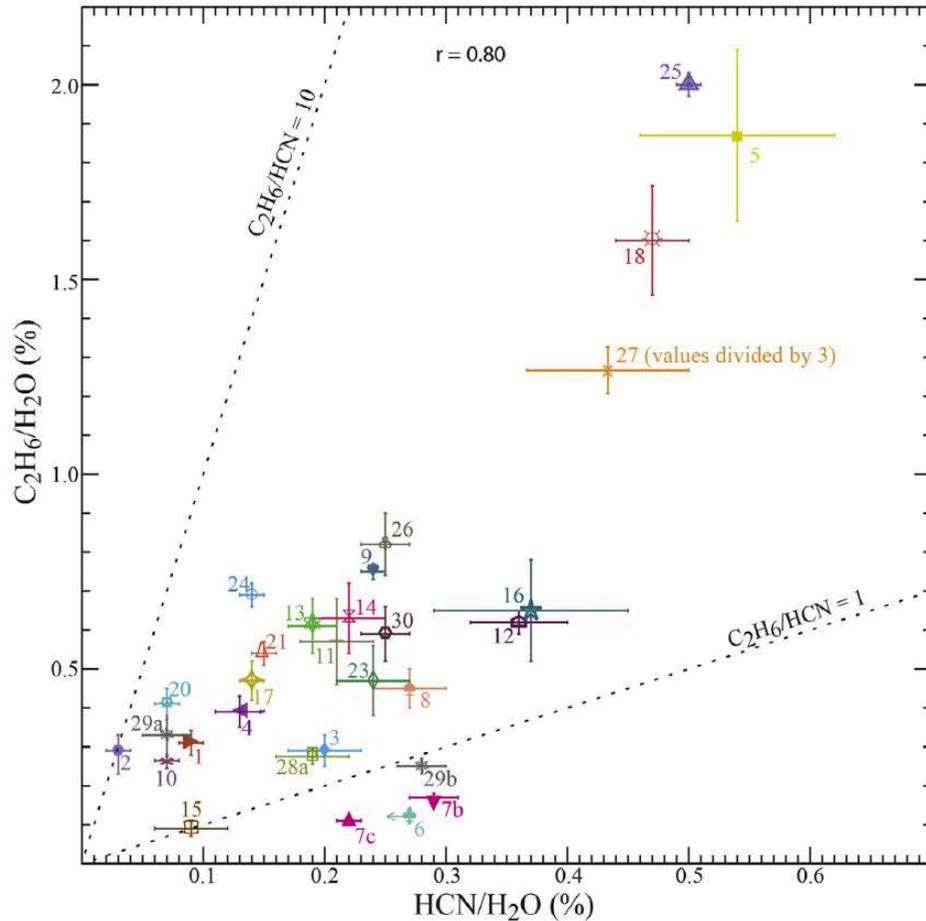


彗星の分子組成比

COとCO₂の組成と原始太陽系円盤内の彗星核形成場所？



彗星の分子組成比



- | | | |
|---------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1. ▶ 2P/Encke | 10. × 8P/Tuttle | 20. ⚙ C/2003 K4 LINEAR |
| 2. ● 6P/d'Arrest | 11. + 153P/Ikeya-Zhang | 21. △ C/2004 Q2 Machholz |
| 3. ◆ 9P/Tempel 1 | 12. □ C/1995 O1 Hale-Bopp | 22. □ C/2006 M4 SWAN |
| 4. ◀ 10P/Tempel 2 | 13. ⚙ C/1996 B2 Hyakutake | 23. ◇ C/2006 P1 McNaught |
| 5. ■ 17P/Holmes | 14. × C/1999 H1 Lee | 24. ○ C/2007 N3 Lulin |
| 6. ♣ 21P/G-Z | 15. □ C/1999 S4 LINEAR | 25. ▲ C/2007 W1 Boattini |
| 7b. ▼ 73P/SW3-B | 16. ☆ C/1999 T1 Mc-N-Hartley | 26. & C/2009 P1 Garrard |
| 7c. ▲ 73P/SW3-C | 17. ⚙ C/2000 WM1 LINEAR | 27. × C/2010 G2 Hill |
| 8. ♠ 81P/Wild 2 | 18. ⚙ C/2001 A2 LINEAR | 28. ⚙ C/2012 F6 Lemmon |
| 9. ♥ 103P/Hartley 2 | 19. ⚙ C/2002 T7 LINEAR | 29. ⚙ C/2012 S1 ISON |
| | | 30. ⚙ C/2013 R1 Lovejoy |

- HCNとC₂H₆、CH₄などの炭化水素の組成には相関が見られる

- CH₃OHとH₂COの組成にも相関あり
(→ 固体表面反応のefficiency?)

<問題点>

- そもそも46億年もの間、変性を受けずに化学組成が保持されるものなのか?

- 彗星コマ内での化学反応の存在や核から放出されたダスト・氷微粒子から2次的に放出される分子も存在する

(C₂H₂、H₂CO、HCN、NH₃などで顕著)

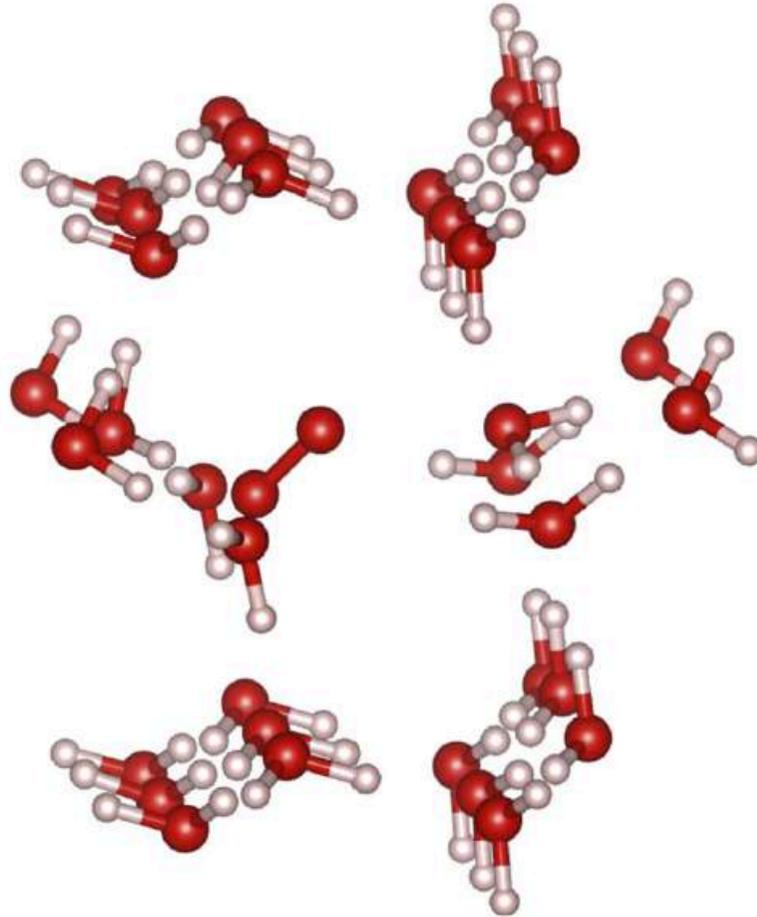
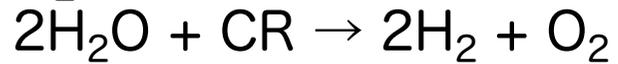
- ISM由来・disk chemistry由来の分離ができないことが多い

→ 過去環境を探る指標としては▲

彗星の分子組成比

Cometary ice in O₂ ?

H₂Oクラスター内に保持されている？ (Mousis et al. 2016)



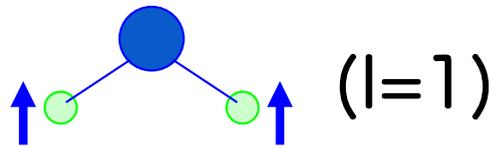
彗星の高分散分光観測

分子の生成温度（形成環境の温度＝分子の起源）の研究手法

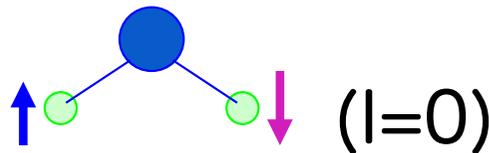
- 分子組成比 $:[X]/[H_2O] : X = HCN, C_2H_2, CH_4, C_2H_6 \dots$
⇒ 彗星核の形成環境の温度および化学反応ネットワークに制限

- 原子核スピン異性体比（オルソ/パラ比）：

例) ortho-H₂O



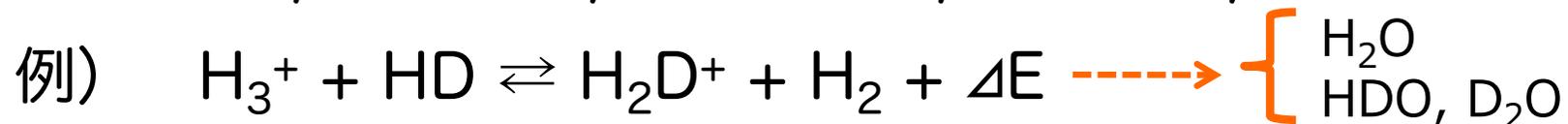
para-H₂O



相互遷移は
ほとんどない。

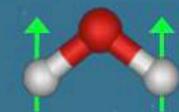
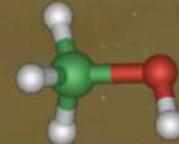
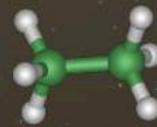
⇒ オルソ/パラ存在比は分子形成環境に依存？

- 同位体比（D/H比、¹²C/¹³C比、¹⁴N/¹⁵N、¹⁶O/¹⁸O比）：

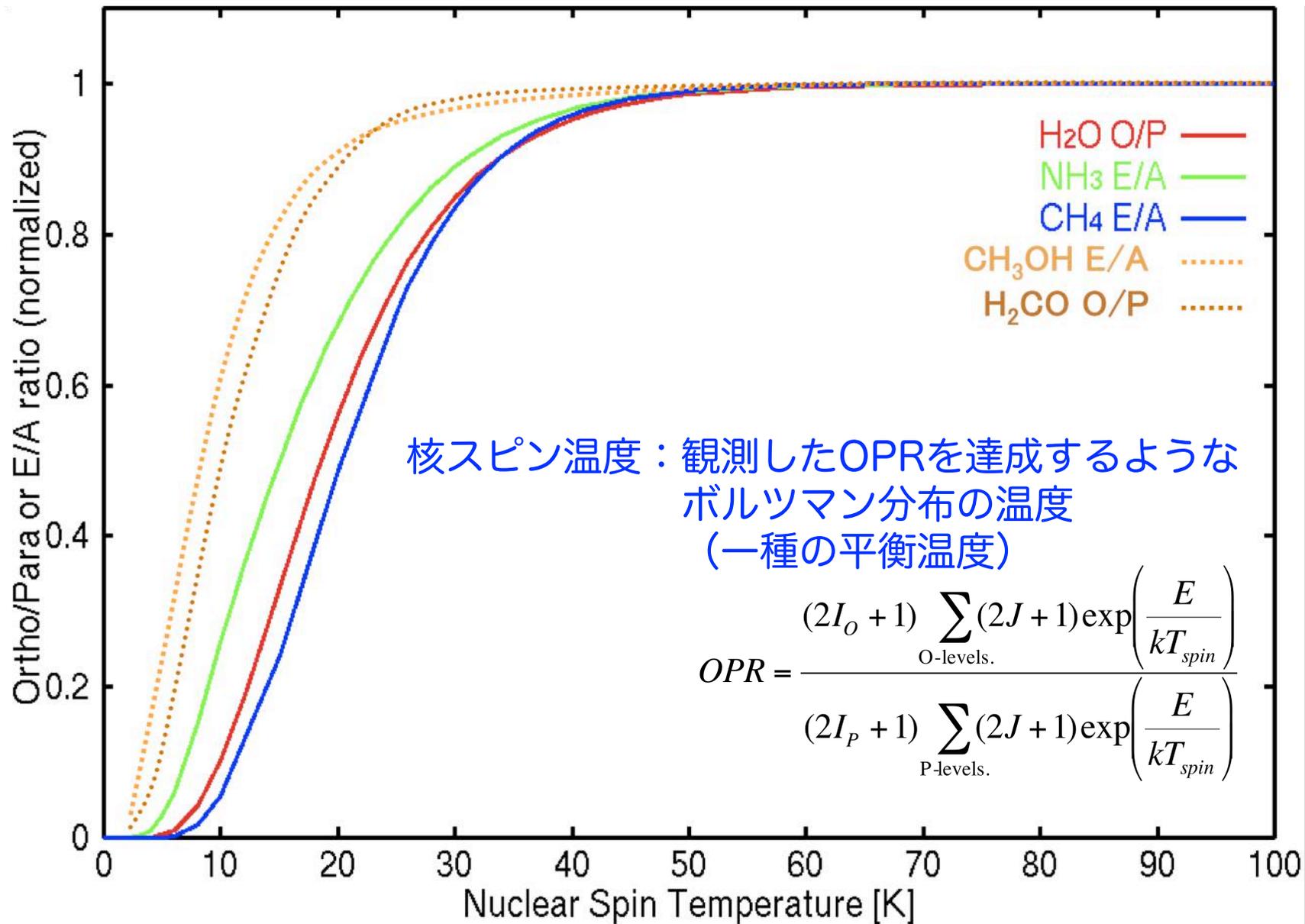


⇒ 低温度環境下 (<50K) でDが濃集。反応時の温度等に依存？

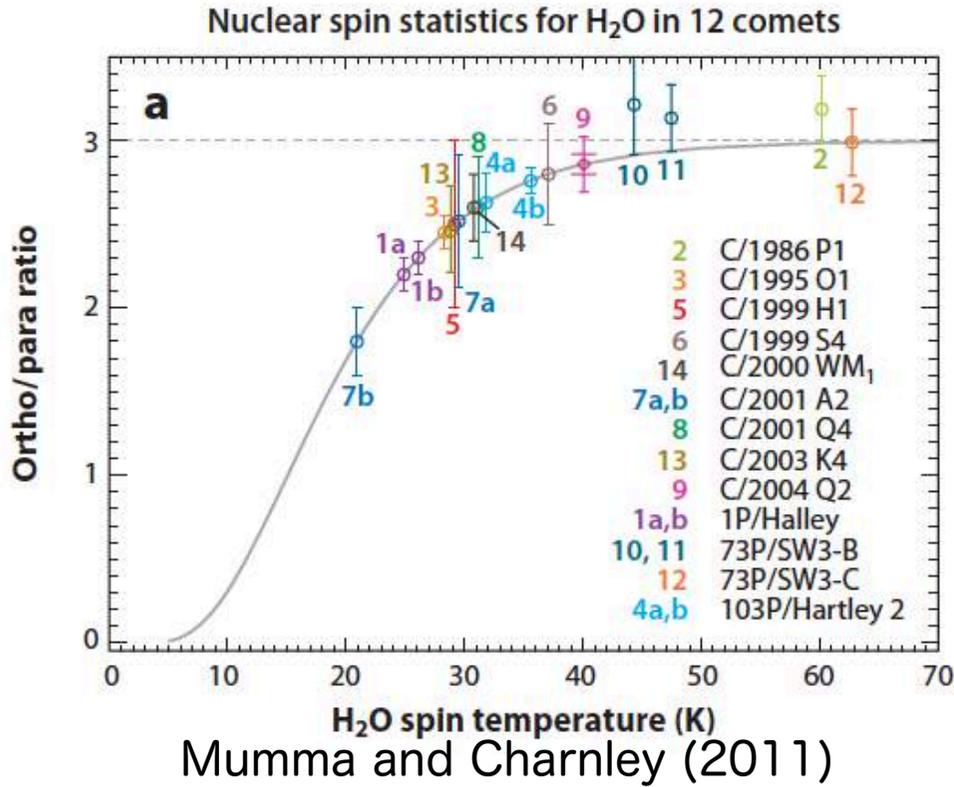
核スピン異性対比と核スピン温度

List of spin species		Nuclear Spin Isomers	Point Group
 <p>Water (H₂O)</p>	 <p>Ortho (A)</p>	C _{2v}	
	 <p>Para (B)</p>		
 <p>Ammonia (NH₃)</p>	Ortho (A ₂)	C _{3v}	
	Para (E)		
 <p>Methanol (CH₃OH)</p>	A symmetries	C _{3v}	
	E symmetries		
 <p>Ethane (C₂H₆)</p>	E _g symmetry	D _{3d}	
	A _g symmetry		
 <p>Methane (CH₄)</p>	A symmetries	T _d	
	F symmetries		
	E symmetries		

核スピン異性対比と核スピン温度

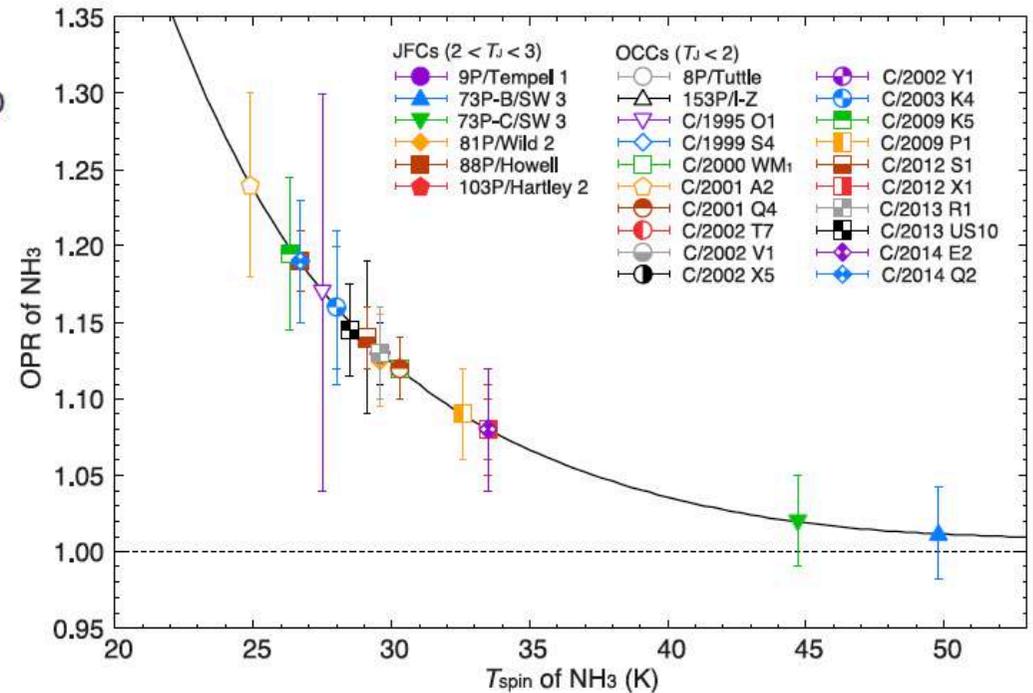


核スピン異性対比と核スピン温度



どの彗星でも $T_{\text{spin}} \sim 30\text{K}$

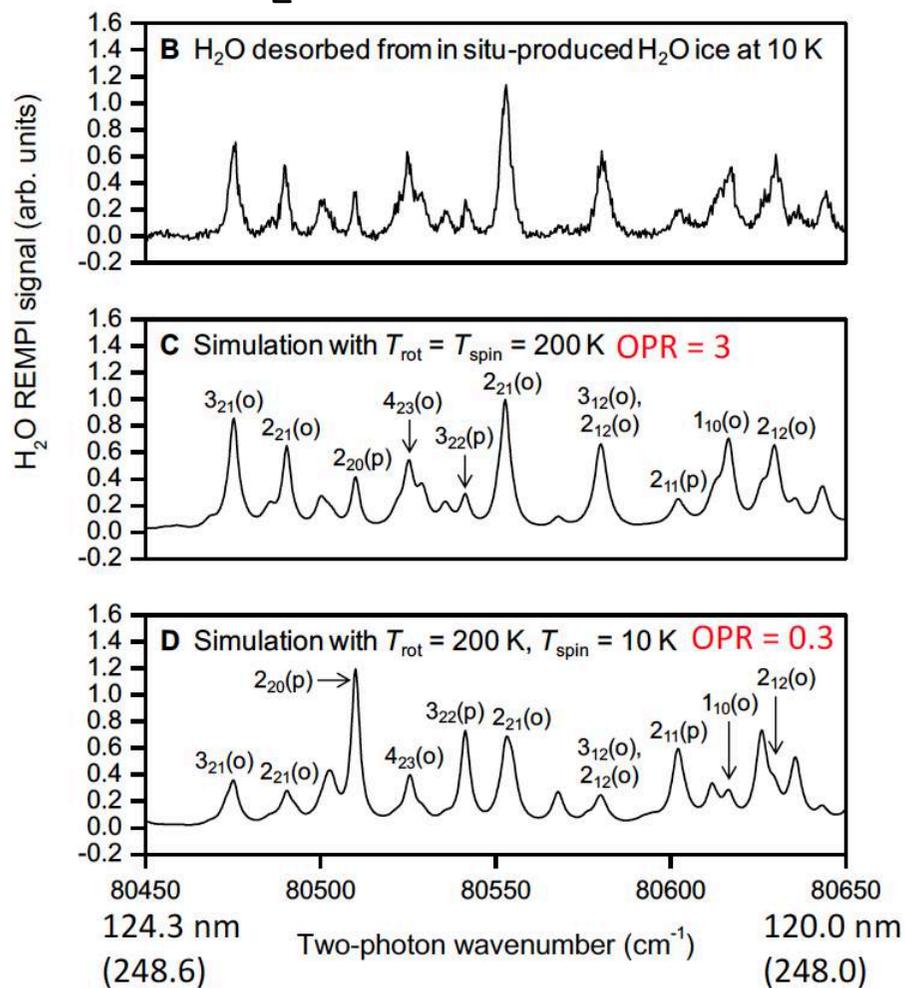
Shinnaka et al. (2016)
NH₂の観測より



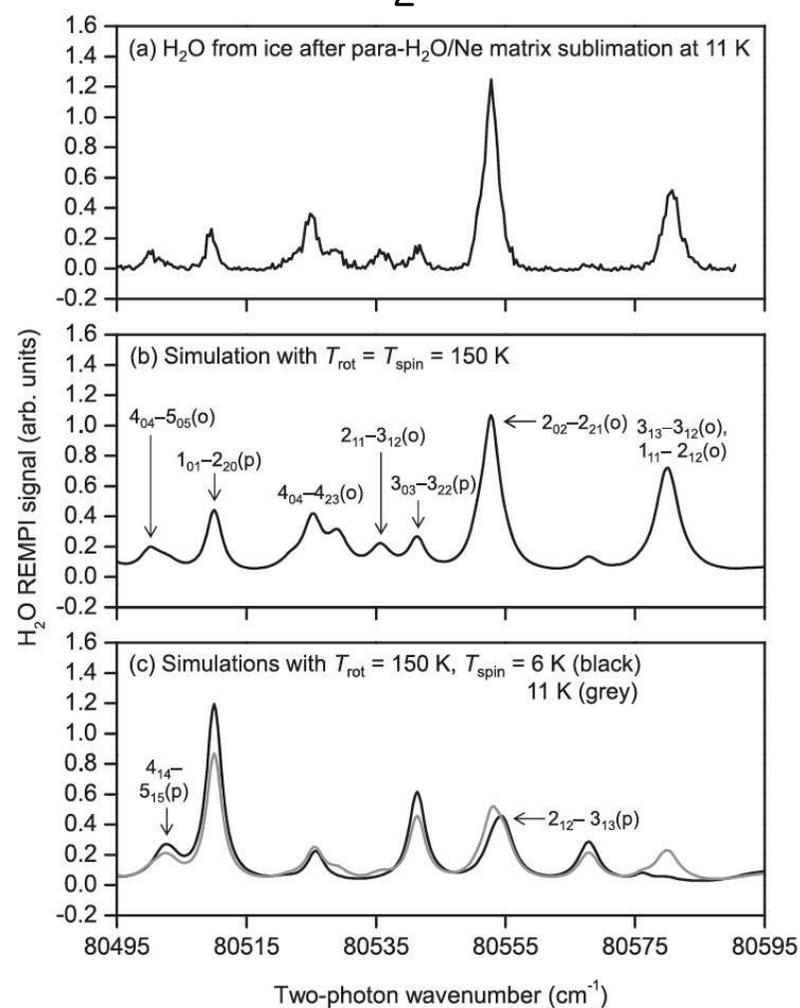
核スピン異性対比と核スピン温度

H₂Oのオルソ/パラ比は分子生成温度と関係がない
(Hama et al., 2016; 2018)

H₂O formation @10K

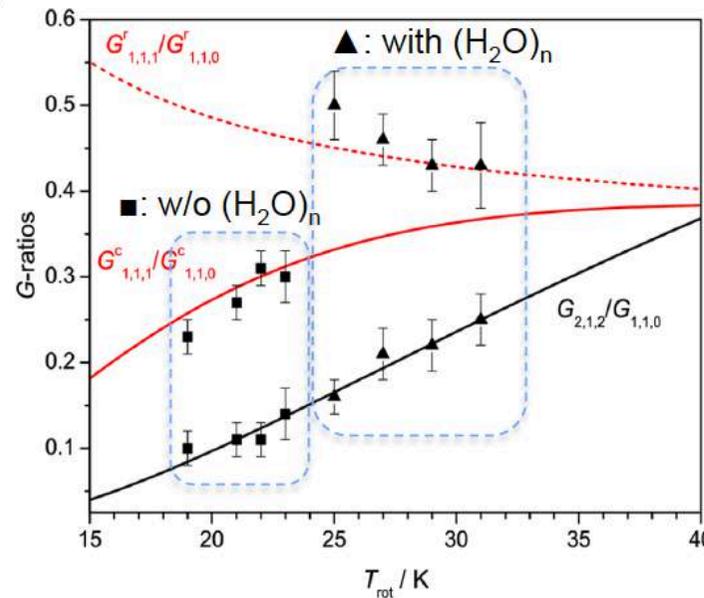
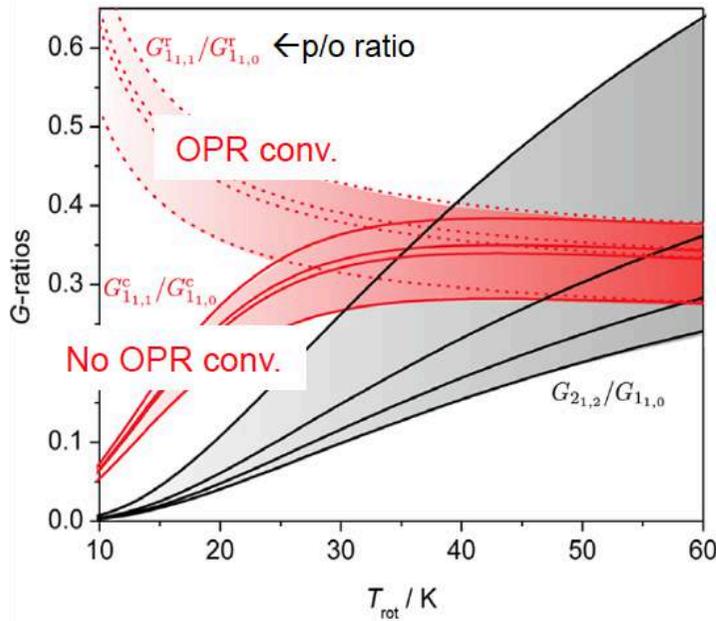


Para-H₂O @11K

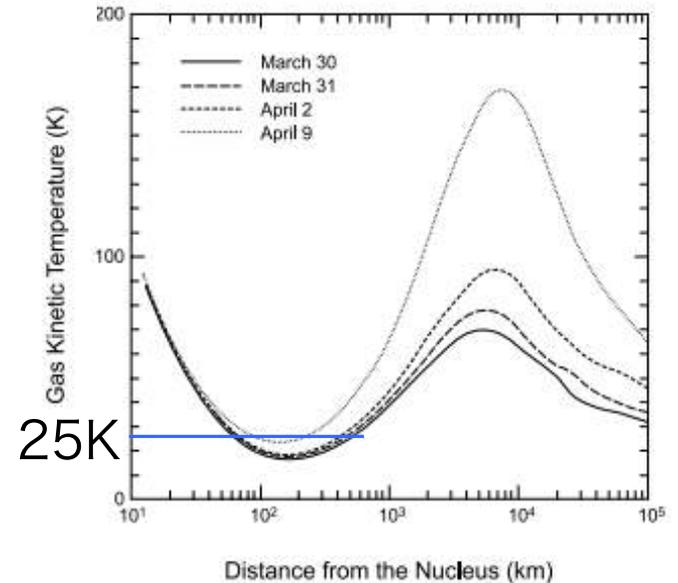
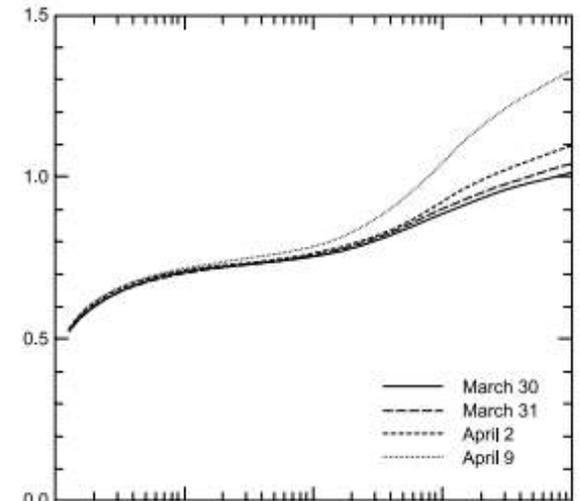


核スピン異性対比と核スピン温度

その他にも、、、



Combi et al. (2005)による理論計算↓



- クラスタやラジカルなどの衝突
→ ガスの膨張速度が超音速 ($T_{gas} \sim 25K$) になると水分子がクラスタ化して、O/P変換を起こす (Manca Tanner et al., 2011、2013)
- 常磁性体との相互作用 (Hama and Watanabe, 2013) などによって、核スピン変換が起こる

核スピン異性対比・核スピン温度は過去環境を探る指標にならない

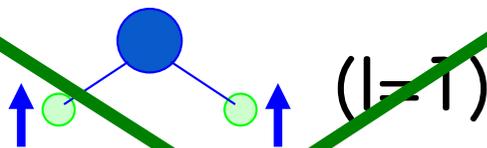
彗星の高分散分光観測

分子の生成温度（形成環境の温度＝分子の起源）の研究手法

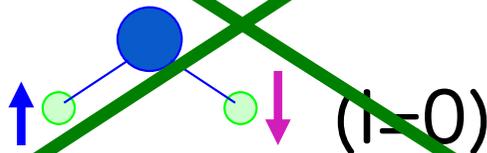
- 分子組成比 $:[X]/[H_2O]$: $X = HCN, C_2H_2, CH_4, C_2H_6 \dots$
⇒ 彗星核の形成環境の温度および化学反応ネットワークに制限

- 原子核スピン異性体比（オルソ/パラ比） :

例) ortho- H_2O



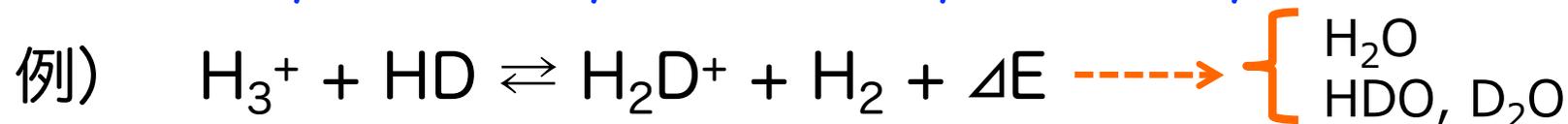
para- H_2O



相互遷移は
ほとんどない。

⇒ オルソ/パラ存在比は分子形成環境に依存？

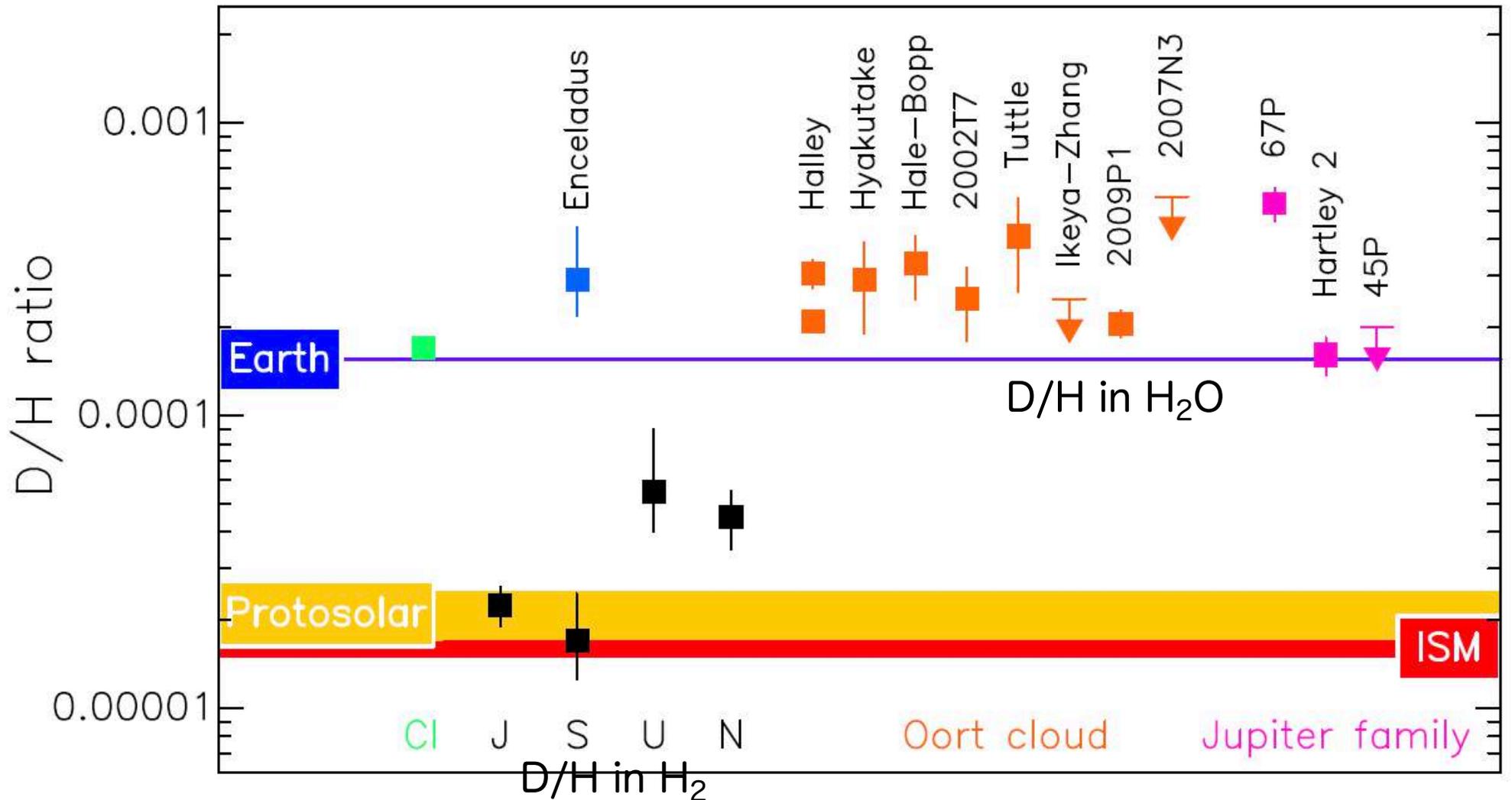
- 同位体比（D/H比、 $^{12}C/^{13}C$ 比、 $^{14}N/^{15}N$ 、 $^{16}O/^{18}O$ 比） :



⇒ 低温環境下 (<50K) でDが濃集。反応時の温度等に依存？

同位体比

長周期彗星と短周期彗星とで差がない
短周期彗星はバラエティがありそう？



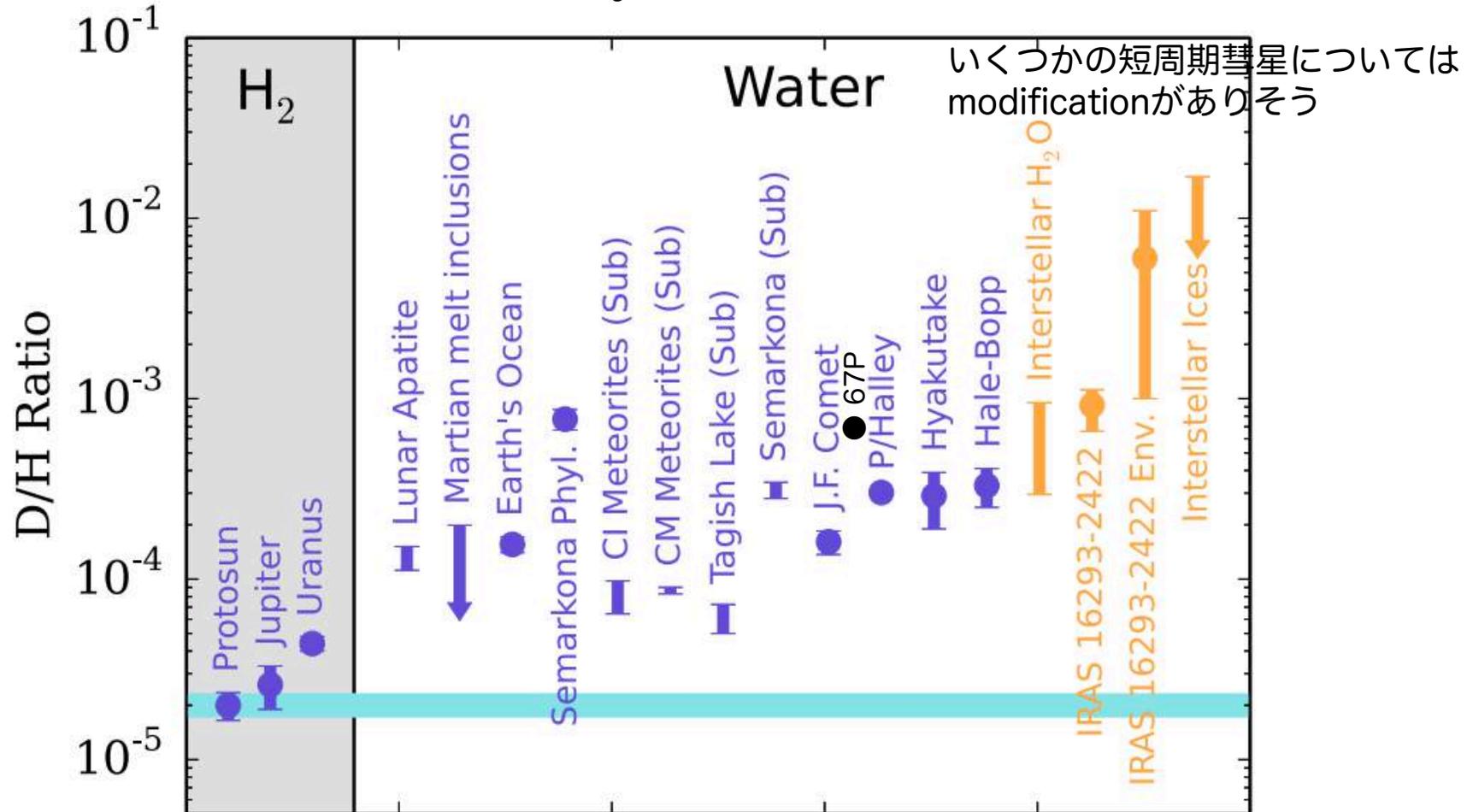
Bockelée-Morvan et al. (2015)

同位体比

近年の化学進化モデルによると、中心星からのUVの影響や円盤内の mixing のによっては、disk chemistryでのD/H比変化がほとんどないことも。

⇒ 彗星のD/Hは円盤にとりこまれる前の物質の情報を反映？

(Cleeves et al. 2014、Furuya et al. 2017)



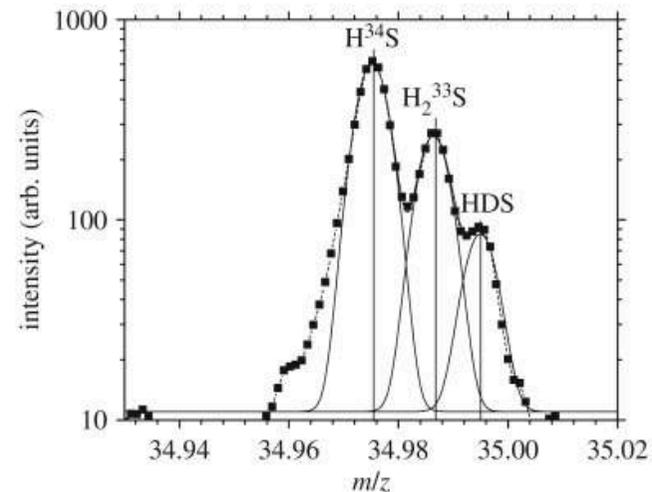
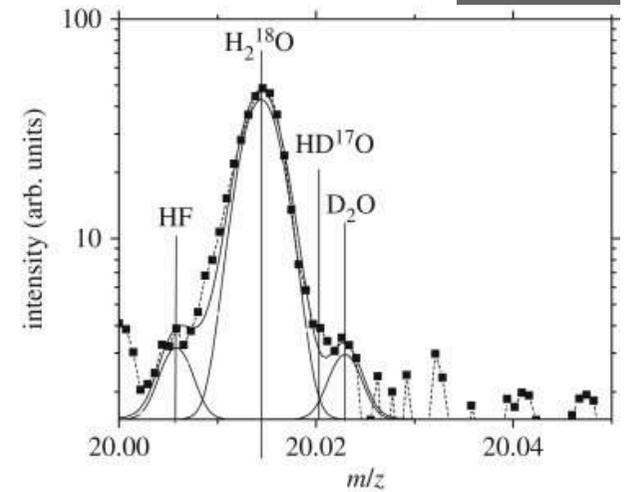
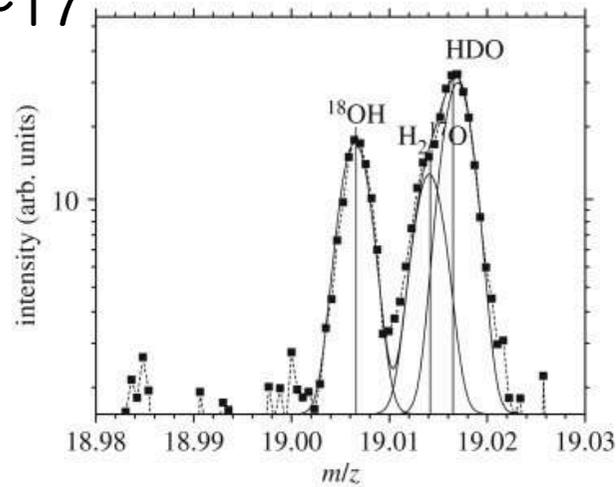
Cleeves et al. (2014)、Altwegg et al. (2015)

同位体比

$$[\text{HDO}]/[\text{H}_2\text{O}] \sim (1.05 \pm 0.14) \times 10^{-3}$$
$$[\text{D}_2\text{O}]/[\text{HDO}] \sim (1.8 \pm 0.9) \times 10^{-2}$$

Altwegg et al. (2017)

$$[\text{D}_2\text{O}]/[\text{HDO}] / [\text{HDO}]/[\text{H}_2\text{O}] \sim 17$$

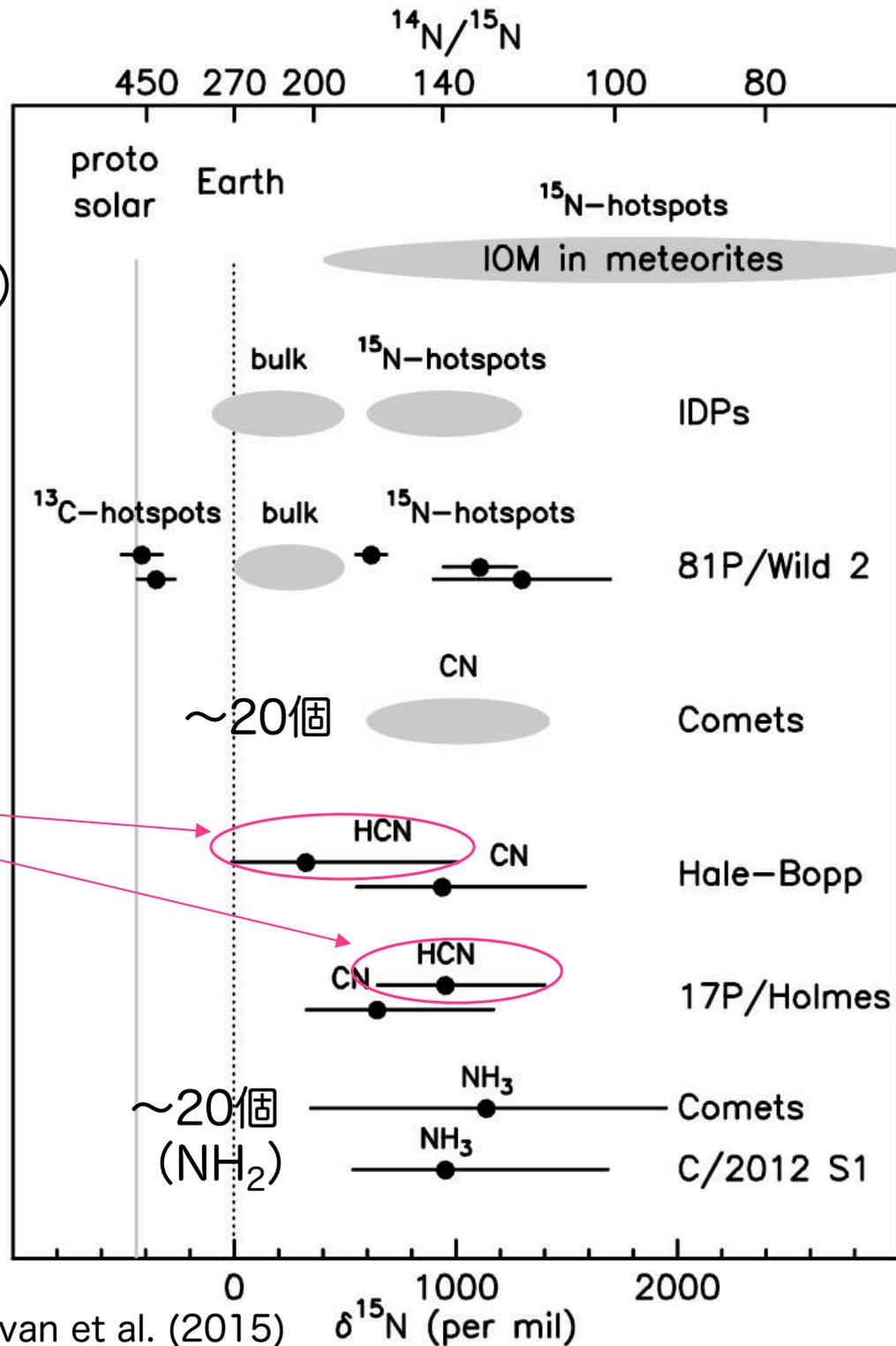


同位体比

$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ in CN (HCN)、 NH_2 (NH_3)

どの分子でも~100-300

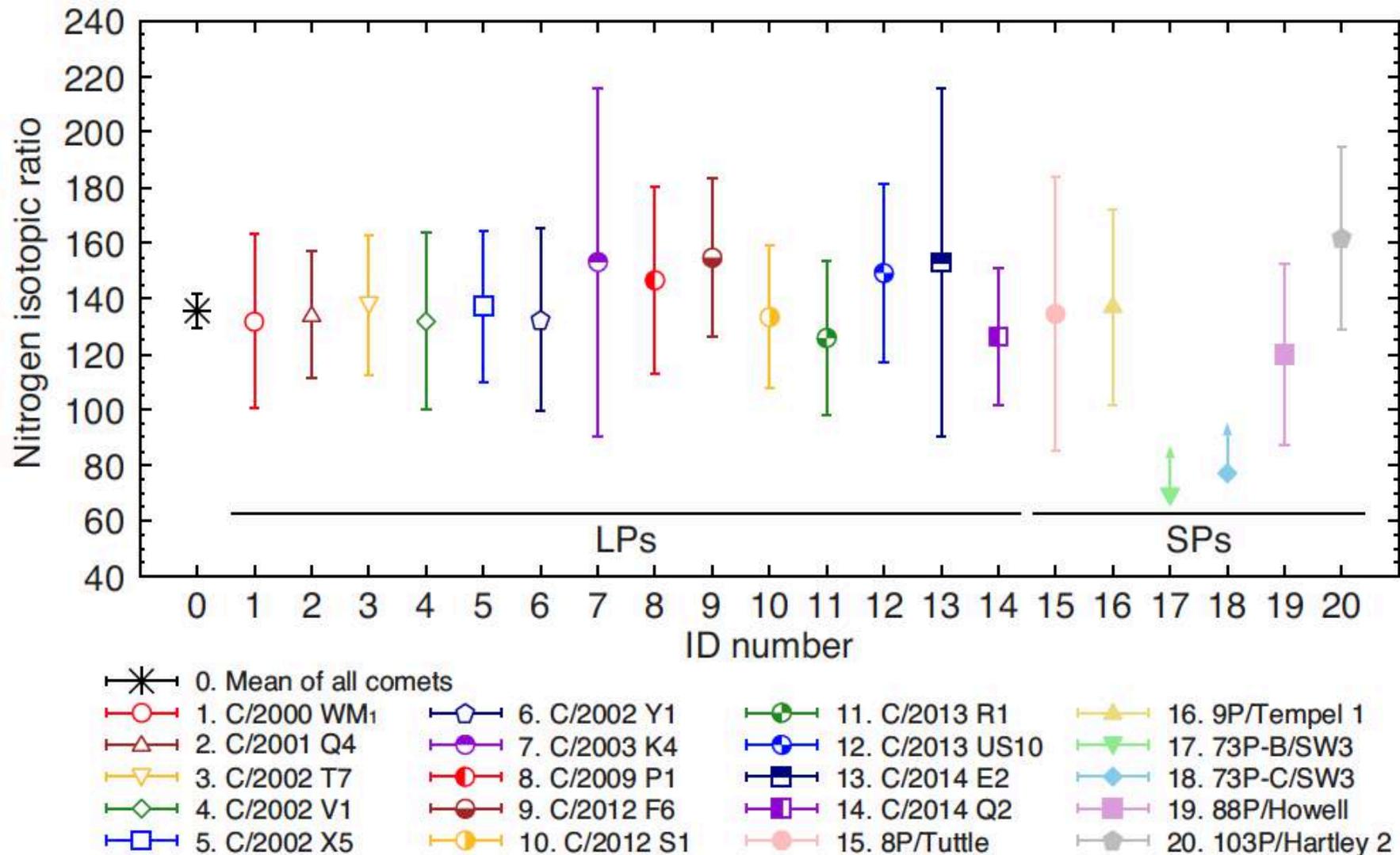
2観測：205±70 (Hale-Bopp)
139±26 (17P/Holmes)



Bockelee-Morvan et al. (2015) $\delta^{15}\text{N}$ (per mil)

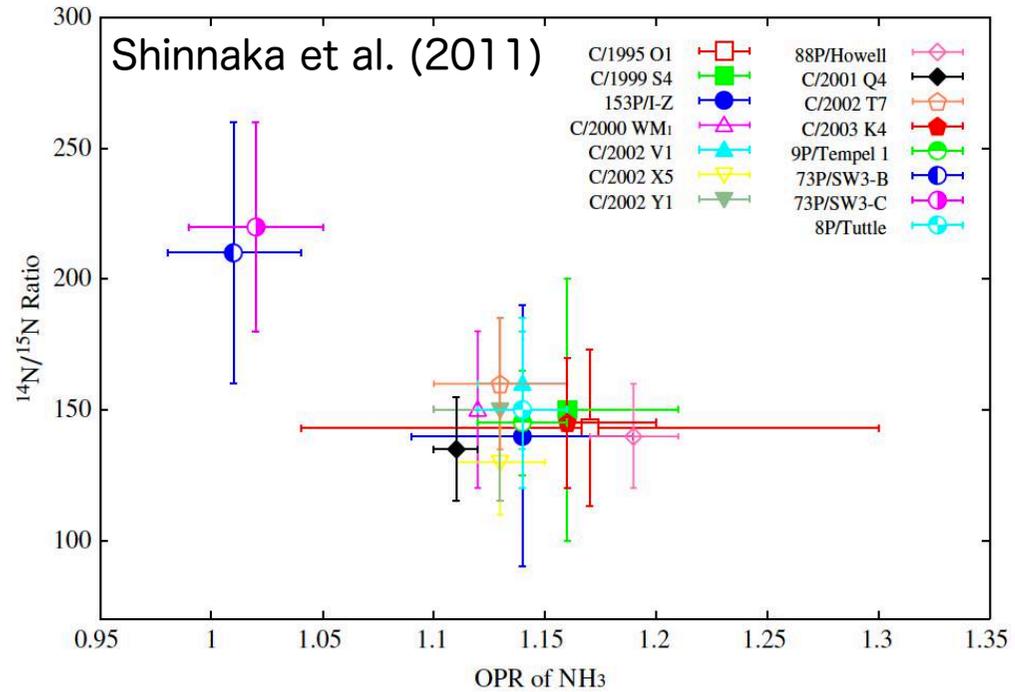
同位体比

$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ in NH_2 ($\Rightarrow \text{NH}_3$) 短周期・長周期に関わらずほぼ一定値 ~ 130

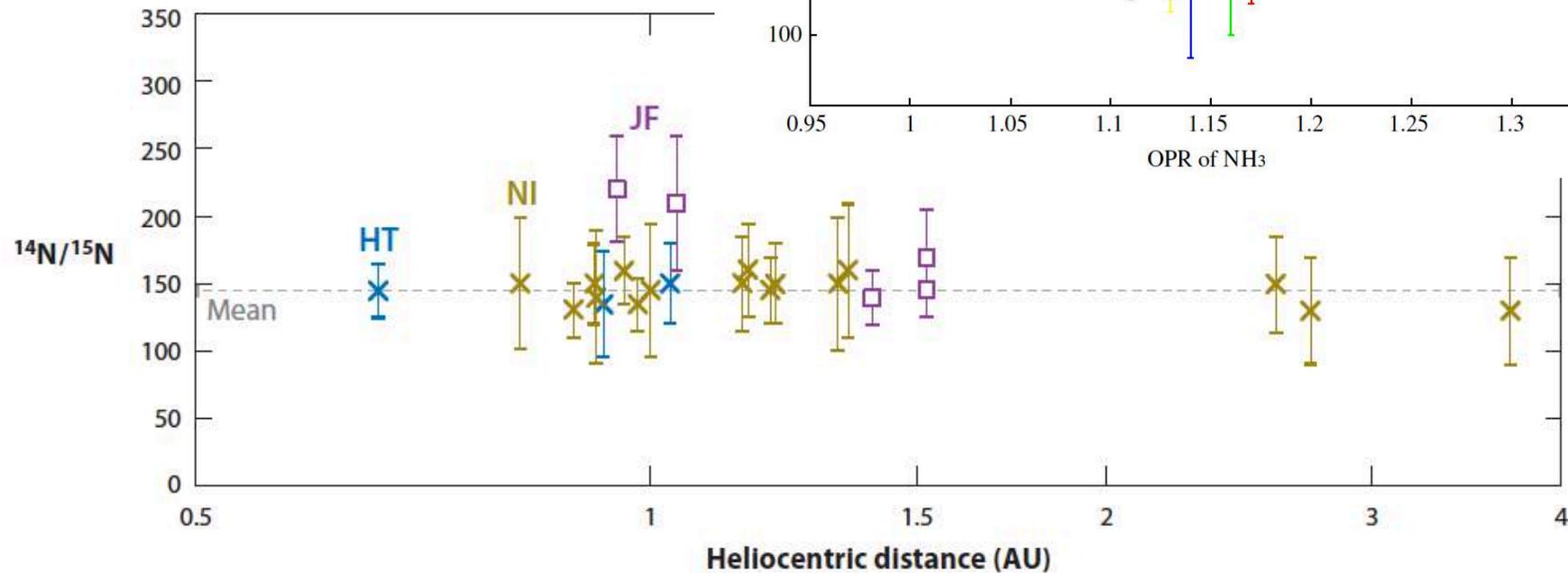


同位体比

$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ in CN (\Rightarrow HCN) 短周期・長周期に関わらずほぼ一定値 ~ 150

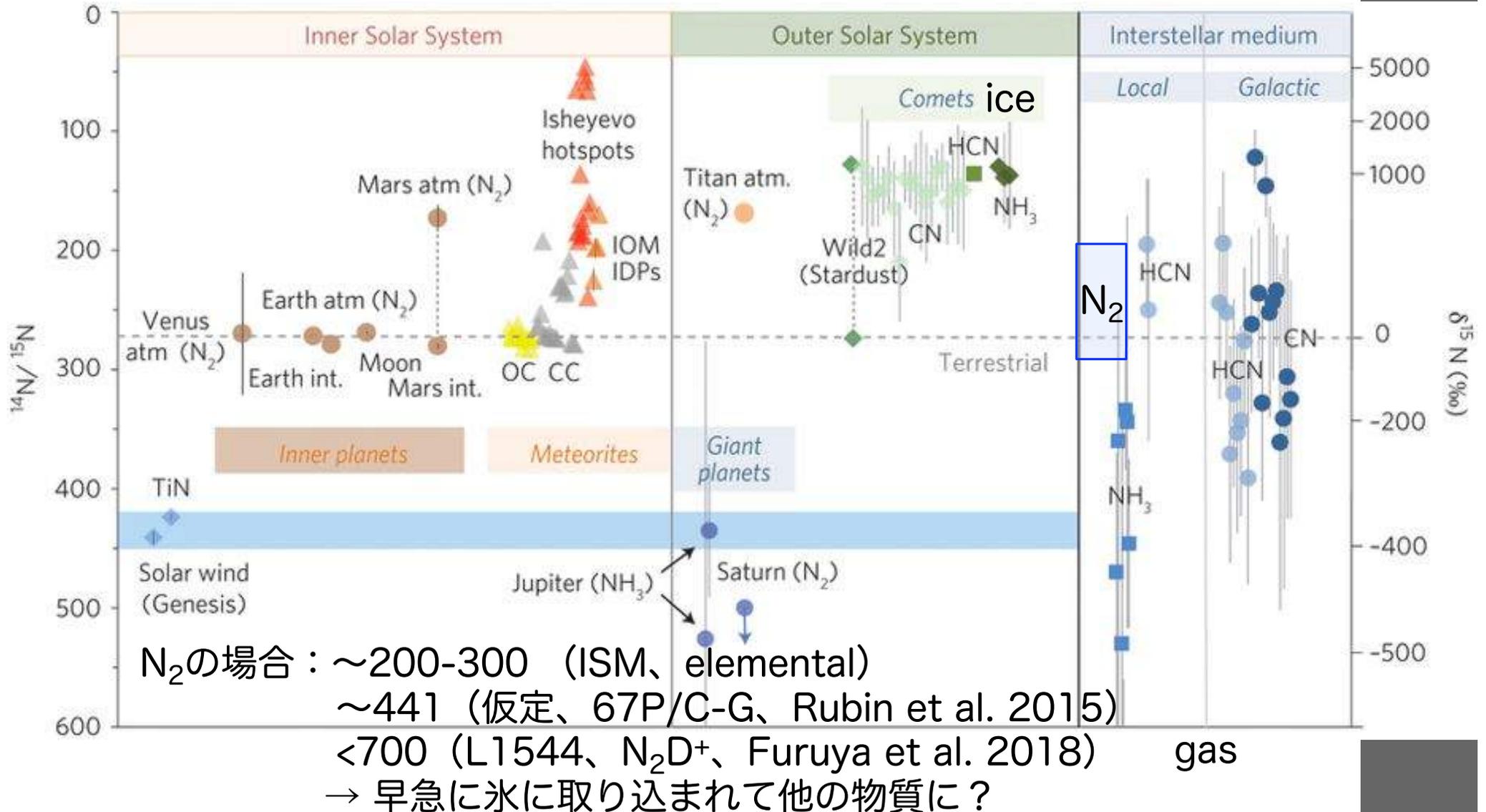


Manfroid et al. (2009)



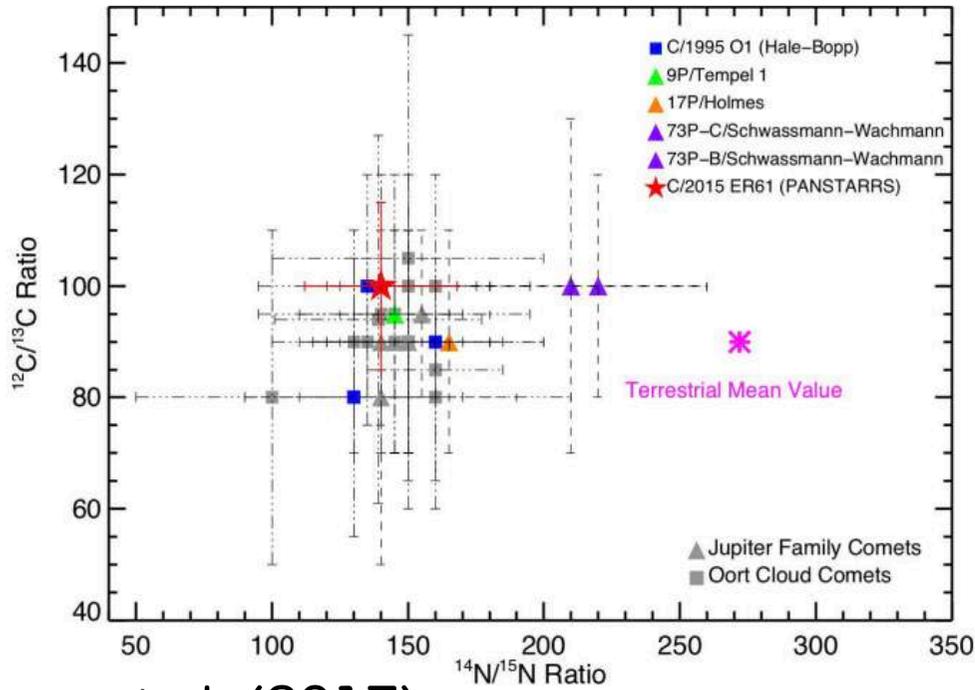
同位体比

ISMでの値に比べると¹⁵N-rich ⇒ disk chemistryの結果？ (Füri and Marty, 2015)



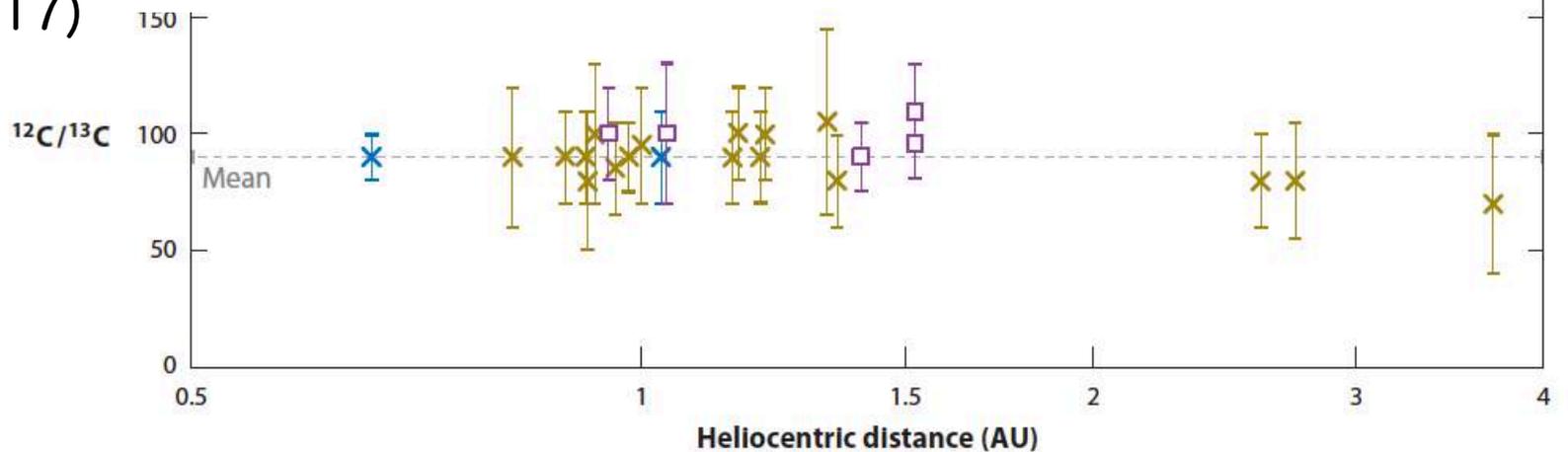
同位体比

$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ in CN (\Rightarrow HCN) 短周期・長周期に関わらずほぼ一定値 ~ 90



地球での値とほぼ同程度
(C_2 でもほぼ同じ結果になっている)

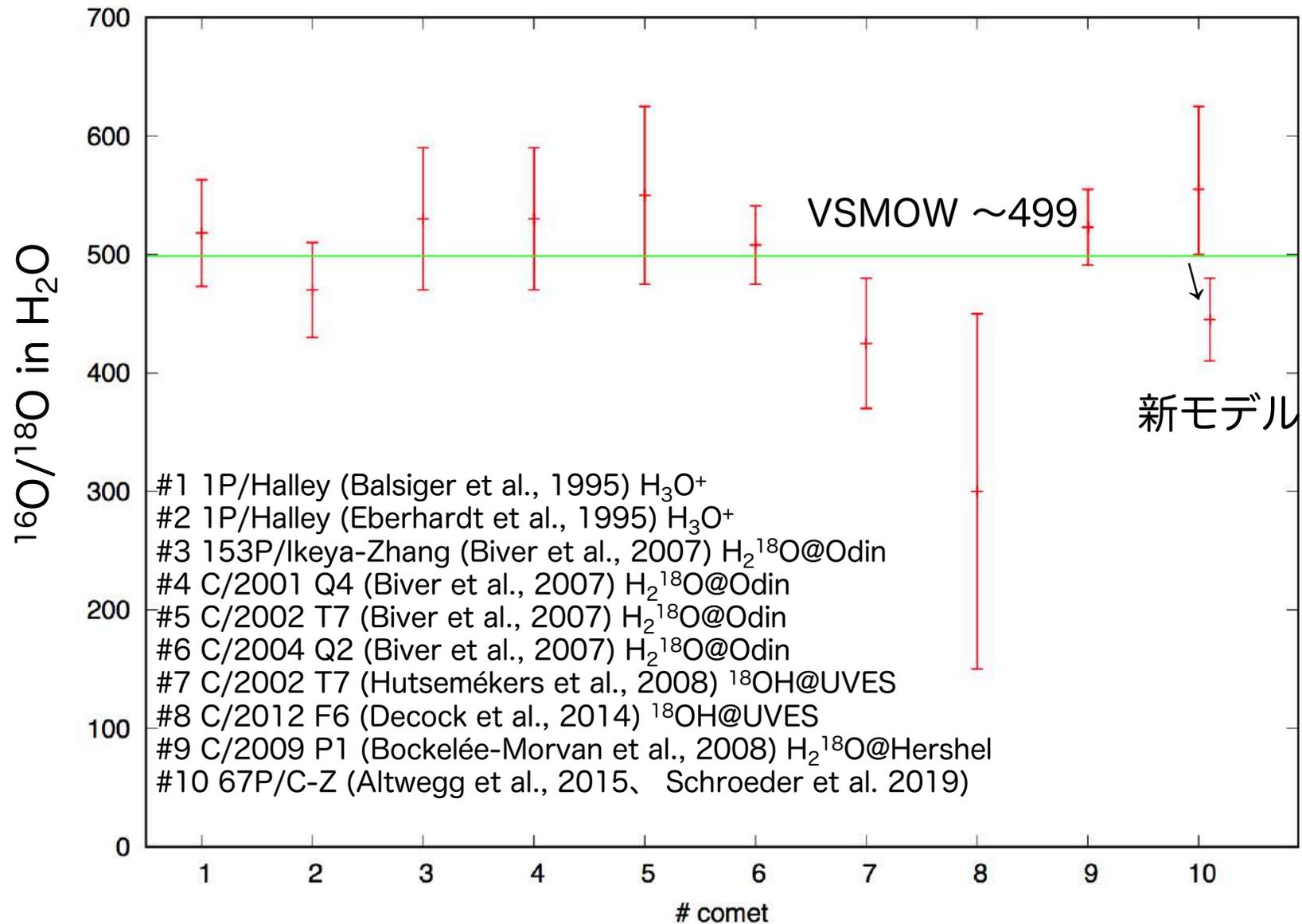
Yang et al. (2017)



Manfroid et al. (2009)

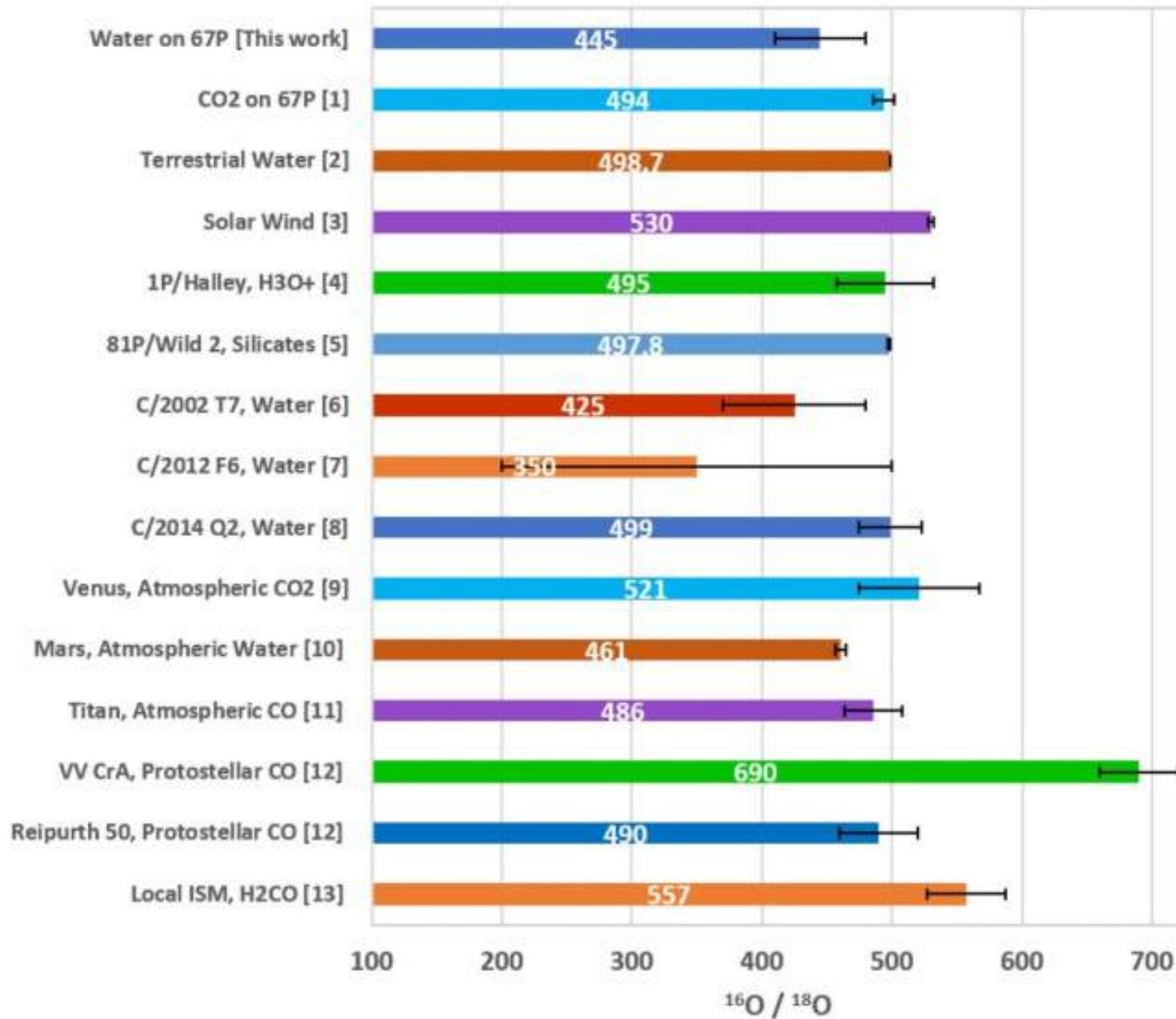
同位体比

$^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ in H_2O どの彗星でもほぼ一定、VSMOWと同程度



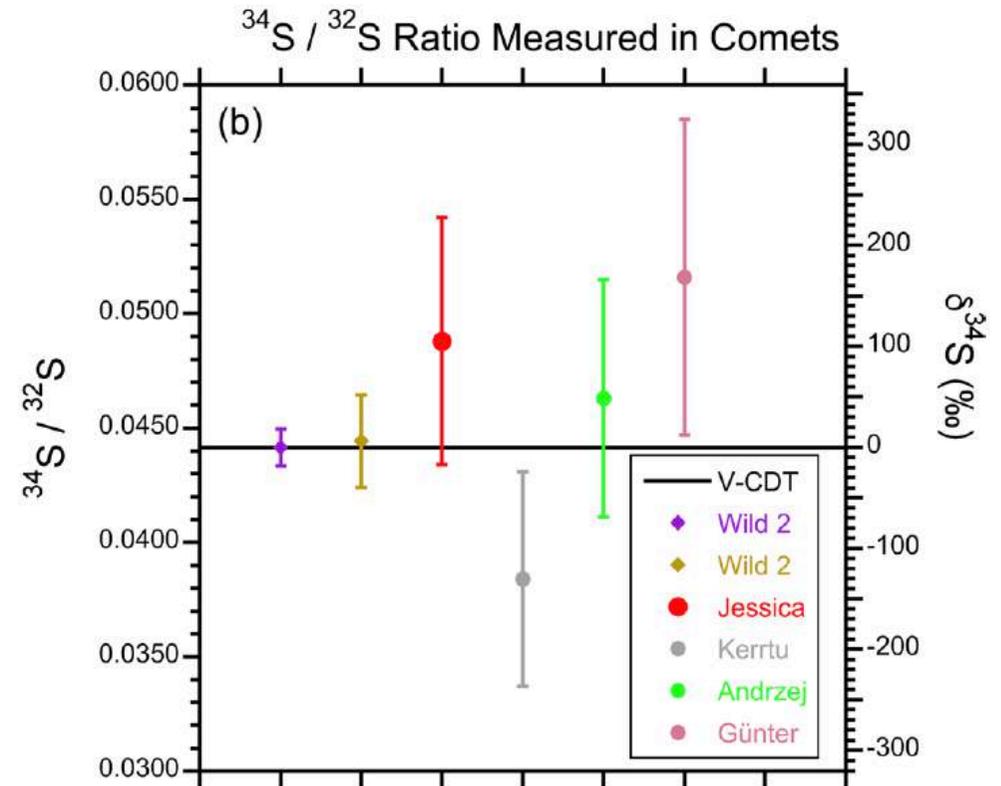
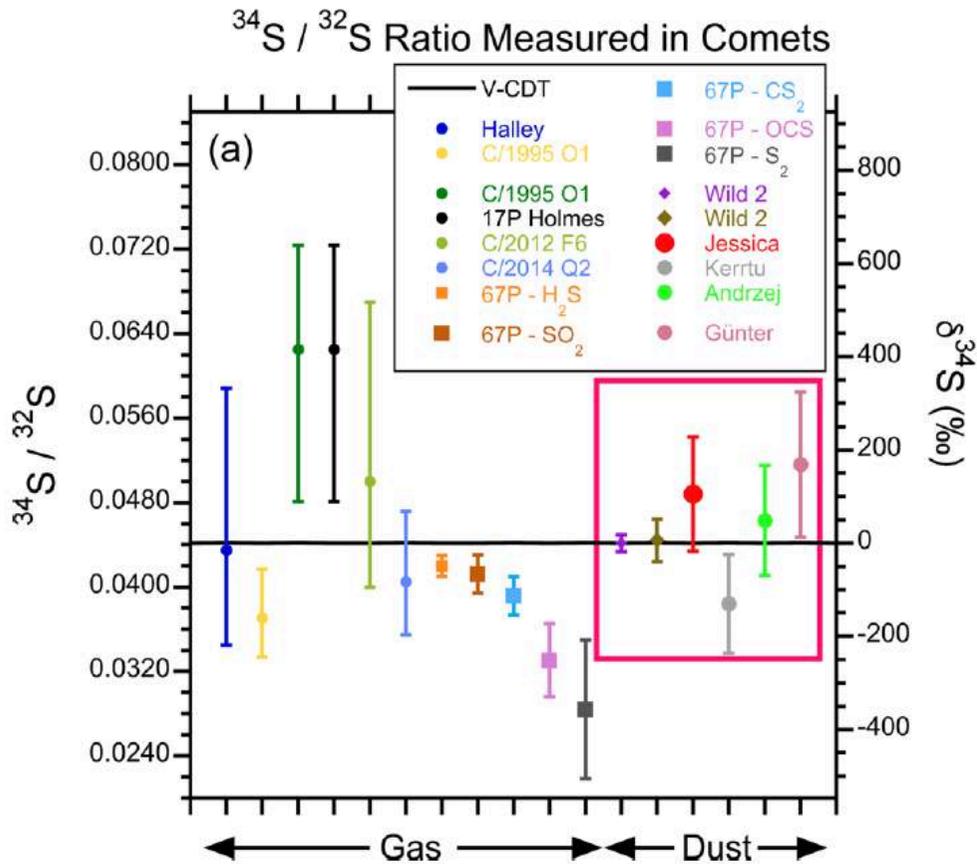
同位体比

Schroeder et al. (2019, in press)



同位体比

$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ in CS/H₂S/S+ どの彗星でもほぼ一定、V-CDTと同程度



Paquette et al. (2017)

Outline

- 太陽系の形成と彗星
- 彗星の高分散分光観測
 - 分子の化学組成比
 - 原子核スピン異性体比と核スピン温度
 - 同位体比
- 今後の観測に向けて

今後の観測に向けて

- 過去の情報と現在の彗星のリンク ⇒ 同位体比、特に D/H と $^{14}N/^{15}N$
- ISM – disk – comet と総じて観測されている分子 ⇒ CO 、 CO_2
- 彗星核の内部構造（物質の昇華・集積メカニズム）
⇒ 探査機・ランダーによる直接観測、高空間分解能での観測
- extended sourceの存在（彗星核に氷として取り込まれているのか、
固体微粒子として取り込まれているのか）
⇒ 高空間分解能での観測
(特に後者の場合は、昇華メカニズムが
デブリディスクにも関連???)

すべてアクセス可能なのが **ALMA**



今後の観測に向けて

個人的にやりたいこと

業界インパクト

様々な分子の
D/H比
(HCN、H₂Oでの比較)

P-bearing分子探し

彗星核からの物質放出
直接観測

H₂Sはどこ由来か？
(彗星核orダスト)

水のD/H比

様々な分子の
同位体比
(¹²C/¹³C、¹⁴N/¹⁵N)

S-bearing分子組成比

彗星コマ内の
化学反応の有無

分子の組成比

H₂COやHNCなどの
Extended source
確認観測

空間分解能

今後の観測に向けて

Cycle 6での検討結果
個人的にやりたいこと

業界インパクト

様々な分子の
D/H比
(HCN、H₂Oでの比較)

DCNの強度不足

水のD/H比

様々な分子の
同位体比
(¹²C/¹³C、¹⁴N/¹⁵N)

分子の組成比

P-bearing分子探し

H₂Sの強度不足

S-bearing分子組成比

彗星核からの物質放出
直接観測

空間分解能不足

H₂Sはどこ由来か？
(彗星核orダスト)

彗星コマ内の
化学反応の有無

H₂COやHNCなどの
Extended source
確認観測

空間分解能

今後の観測に向けて

Cycle 6での検討結果

46P/Wirtanen彗星

- ・ 短周期彗星
- ・ 元々Rosettaミッションのターゲットだった天体



D/H ratios of water in Jupiter-family comets - case of comet 46P/Wirtanen

ABSTRACT

We propose HDO observations of a Jupiter-family comet 46P/Wirtanen to investigate Jupiter-family comets. D/H ratios of water depend on their formation temperatures and history of formation and modification of water by comparing D/H ratios in multiple objects in the planetary system formation. In particular, cometary D/H ratios are precious clues to find the evolution in early phase of solar system formation. The cometary D/H ratios are determined from the distribution of D/H ratios among the samples. However, it is difficult to evaluate the taxonomy or group of comets because of lack of samples. Our goal is to determine the D/H ratio in Jupiter-family comets (HDO) collaborating with Subaru/IRCS, Keck2/NIRSPEC and IRTF/iSHELL data (H₂O). The success of our observations provides a sample-return mission target with high priority. The success of our observations provides evolution in proto-planetary disk of solar system.

PI NAME:

Hitomi Kobayashi

SCIENCE

ESTIMATED
12M TIME:

11.0 h

ESTIMATED
ACA TIME:

0.0 h

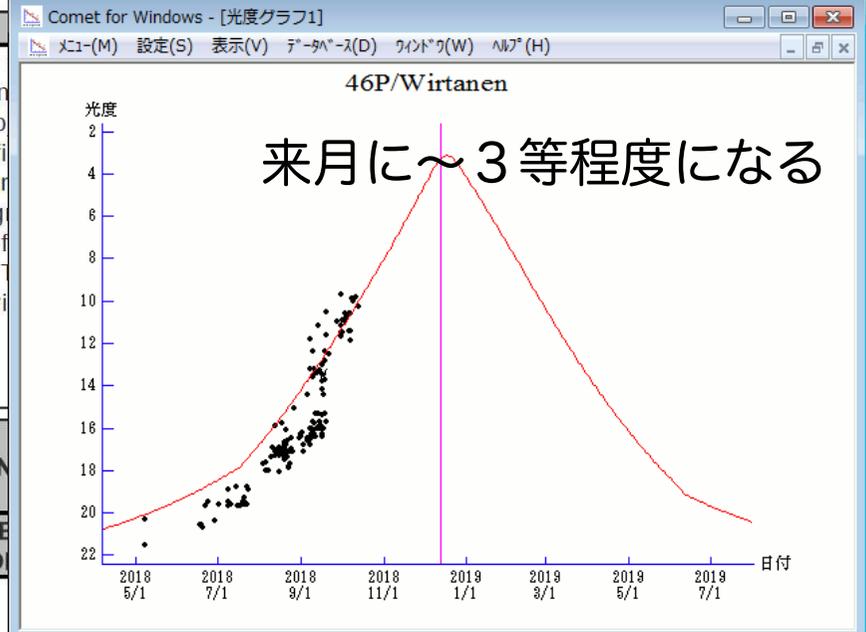
ESTIMATE
MOD

CO-PI NAME(S):
(Large & VLBI Proposals only)

Takahiro Iino; Hideyo Kawakita; Yoshiharu Shinnaka

CO-INVESTIGATOR
NAME(S):

飯野さん (農工大)、河北さん、新中さん (京産大)



今後の観測に向けて

彗星観測 with ALMA の注意事項

- いろいろ観測が可能かがほぼ決まっている
 - ALMAの望遠鏡セッティングおよび空間分解能が決まってしまう
- 空間分解能が高い
 - 観測スペクトルのS/Nは上がる
 - 寿命の短い分子などはコマ全体を観測することが可能だが
寿命の長い分子や観測条件によっては、分子からのフラックスをロスしてしまう
- 一度に複数のラインをカバーできない  明らかに高分散分光観測がベスト
 - 時間変動天体は難しい
 - 複数のラインを使って力学的パラメータを求めるのには不向き
(水のオルソ/パラ比を観測から求めるには赤外観測が良さそう)
- ALMAの場合は観測セメスターが1年間
 - セメスター中にとってもよい条件の彗星が見つかった場合はToO的に出す必要がある
(どの望遠鏡でも一緒だが、半期か1年間かの差)

まとめ

- ・ 彗星核形成前（分子雲・原始惑星系円盤）の環境を探る手がかりを探すために、彗星核に含まれる氷成分に着目、コマに含まれるガスの高分散分光観測を実施している（ガス成分のS/Nを高めることができる）
- ・ 主に3つのパラメータがこれまで勢力的に観測されてきた
 - 分子の化学組成比：各彗星でバラエティがある
過去の情報を保持しているか？2次的に生成？
 - 原子核スピン異性対比：平衡温度として核スピン温度が指標に挙げられる
原子核スピンは氷→蒸発時に統計平衡になるので過去の情報を保持していない可能性が高い
 - 同位体比：D/H比（ H_2O ）の場合はdiskでのmodificationは少ない
 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比（ HCN ）も同様、 NH_3 はmodificationあり
 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 、 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ は地球での値とほぼ同程度
隕石やサンプルリターンをしたダストでも調べられている
- ・ 化学組成比や同位体比を観測するにはALMAが便利！
ただし時間変動天体や複数ラインを用いたパラメータ導出は難しい。。。