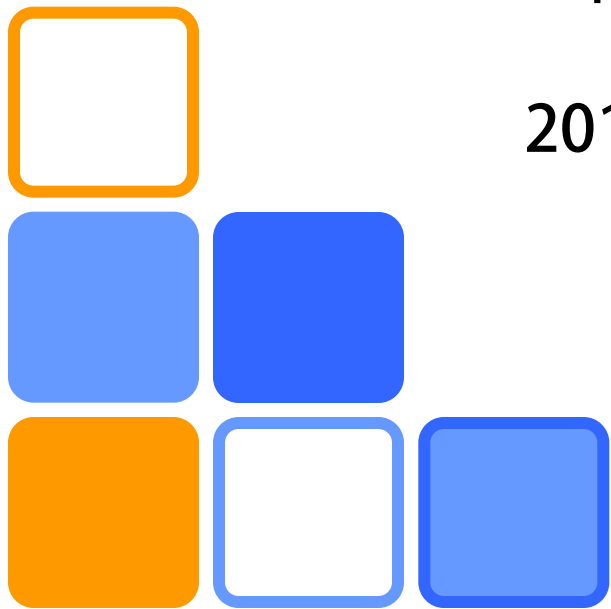


「あかり」を用いた 近傍銀河に存在する星間氷の探査

山岸 光義 (名古屋大学)

2012/12/19 CPSセミナー





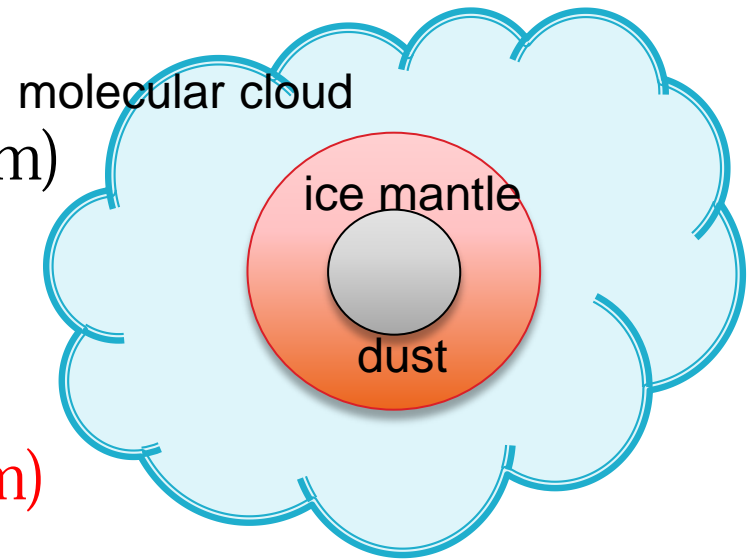
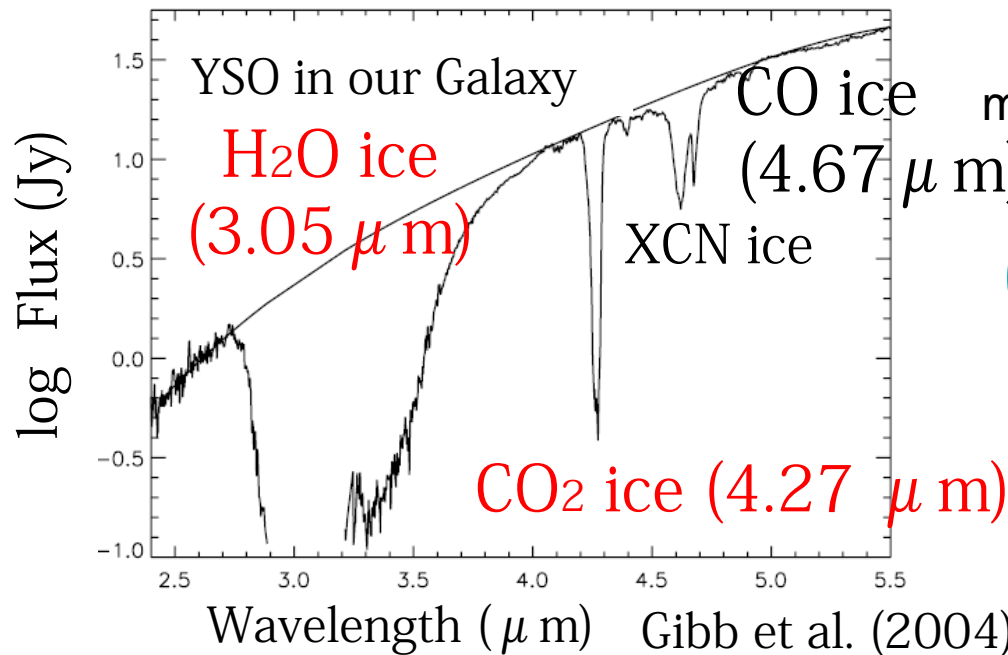
アウトライン

- イントロダクション
 - 氷による吸収
 - 「あかり」衛星
 - 近赤外線スペクトルフィーチャーとその有用性
- 「あかり」による氷の研究
 - 氷の探査と系統的議論
 - 近傍スターバースト銀河における氷の詳細観測



Introduction: Ice

- The absorption features are seen in near- and mid-IR



- Ices have information on interstellar environment

1) Sublimation temperature:

H_2O 90 K, CO_2 50 K, CO 15K (Tielens 2005)

Introduction

2) Interstellar chemistry

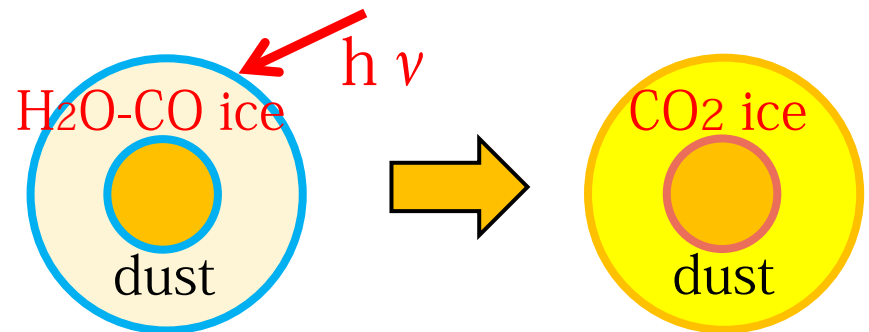
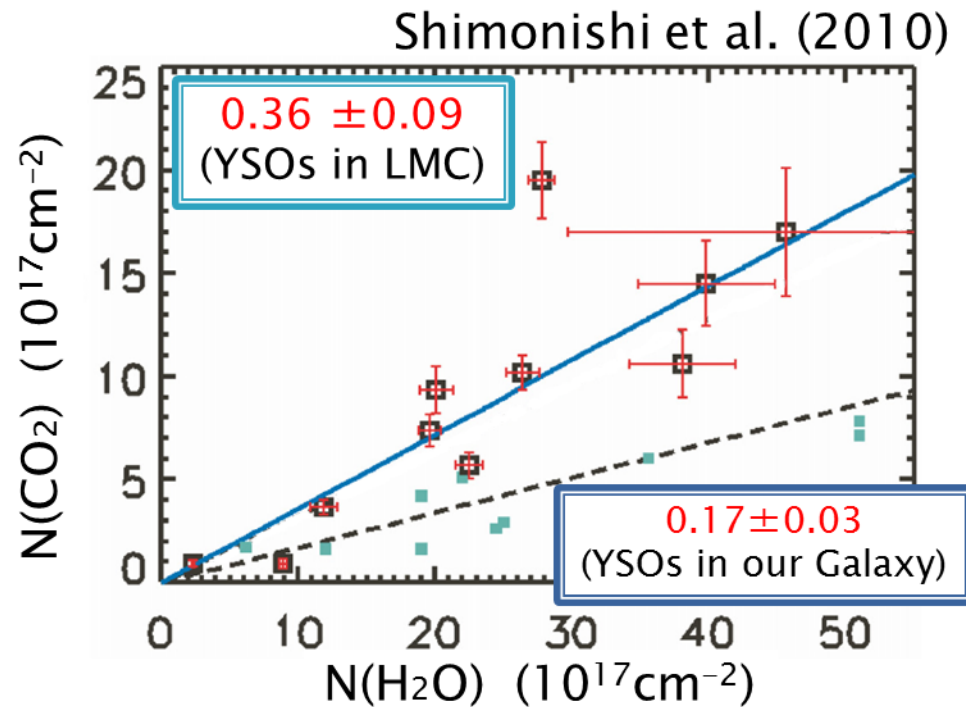
- $N(\text{CO}_2)/N(\text{H}_2\text{O})$ may depend on metallicity of a galaxy
- LMC metallicity: $1/3 Z_{\text{Sun}}$ (Shimonishi et al. 2010)

3) Radiation environment

- Radiation may play an important role to produce CO_2 ice (e.g. Watanabe et al. 2002)

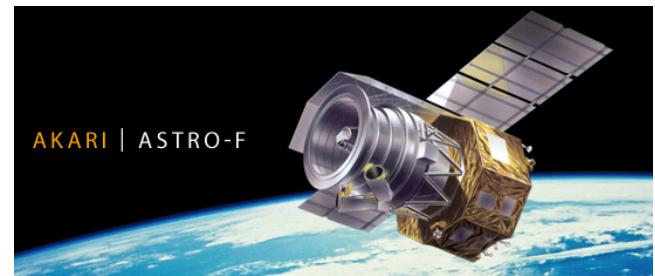
Ices are useful tracers of interstellar environment.

So far, ices only in our Galaxy and the LMC have been studied very well. → ISM in nearby galaxies





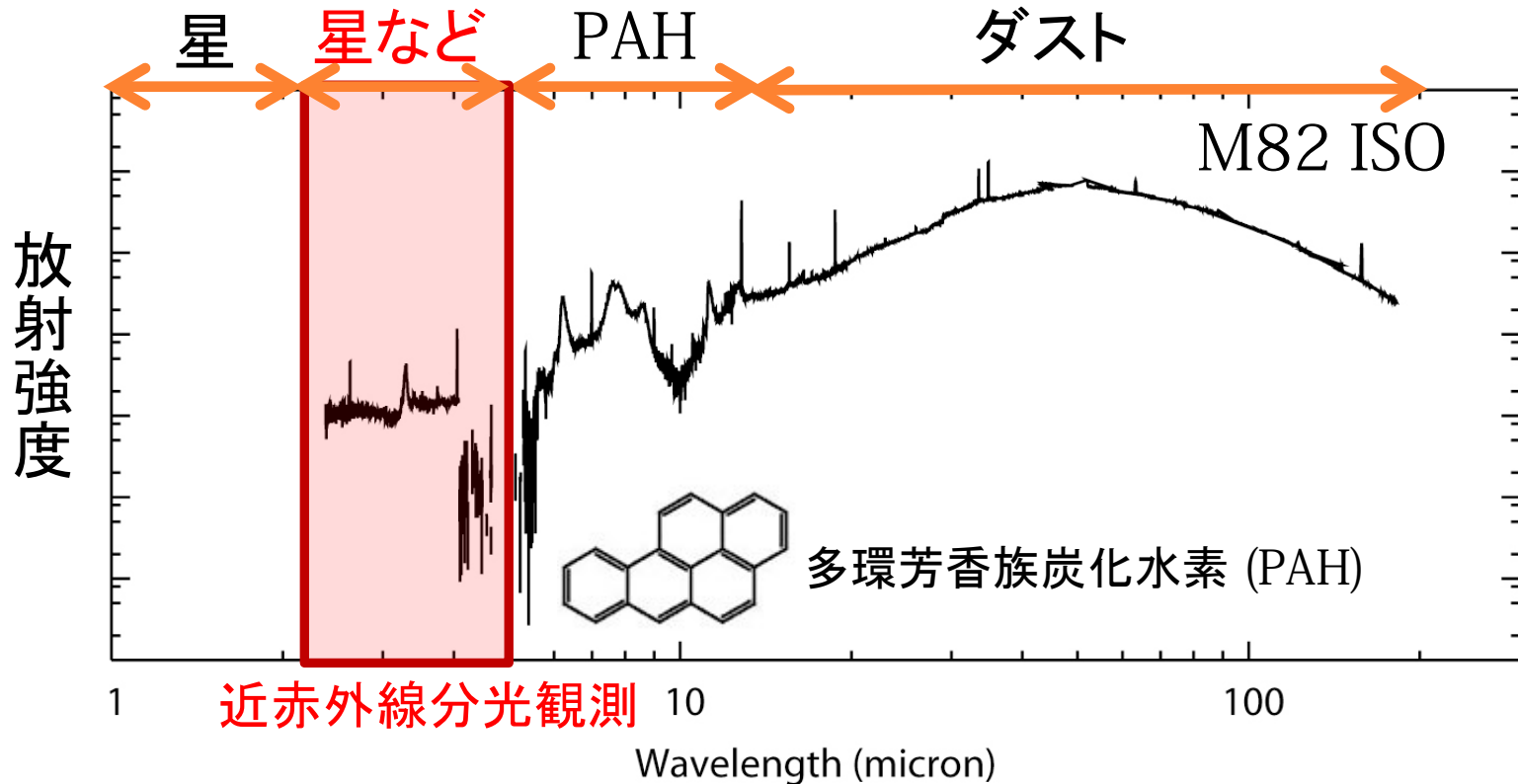
「あかり」衛星



- 日本初の本格的な赤外線天文衛星
- 2006年打ち上げ、2011年科学運用終了

- IRC (InfraRed Camera) 観測波長2- 27 μm
- FIS (Far-Infrared Surveyor) 観測波長 50-180 μm
- 全天観測
 - 波長 9, 18, 65, 90, 140, 160 μm で全天マップを作成
- 指向観測
 - 撮像12バンド、分光観測 (近赤外、中間赤外、遠赤外)
 - ◆ 観測波長 2.5-5.0 μm , $R = \lambda / \Delta \lambda \sim 100$
 - ◆ 大気に影響されないため、高感度、連続的な観測が可能

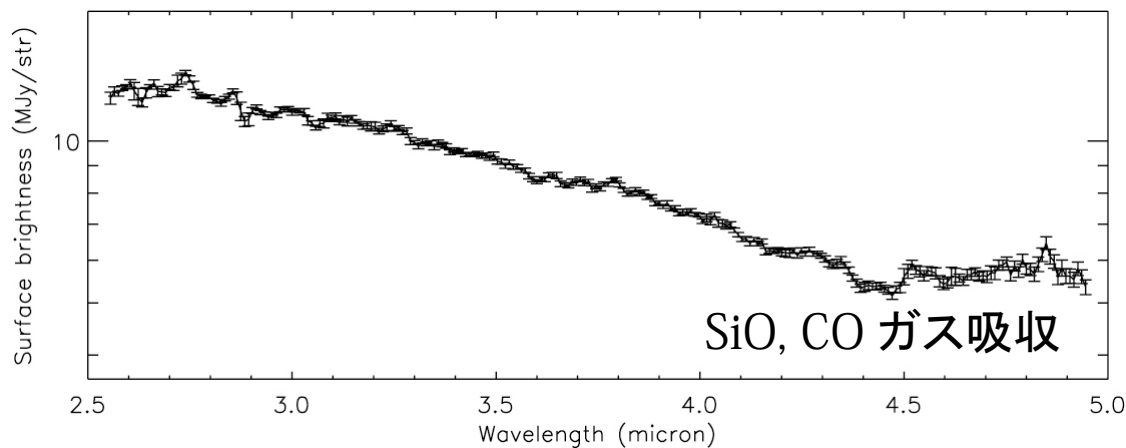
近赤外線スペクトルで見えるもの



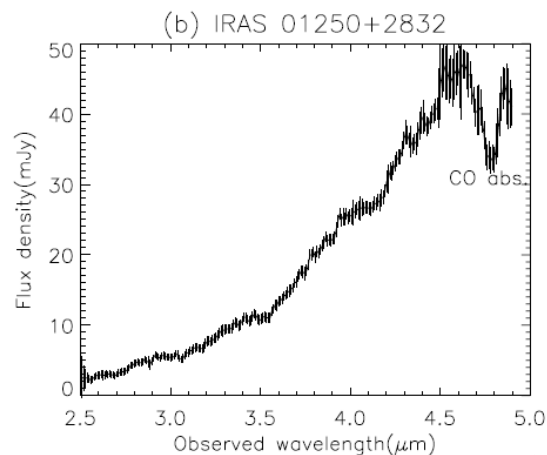
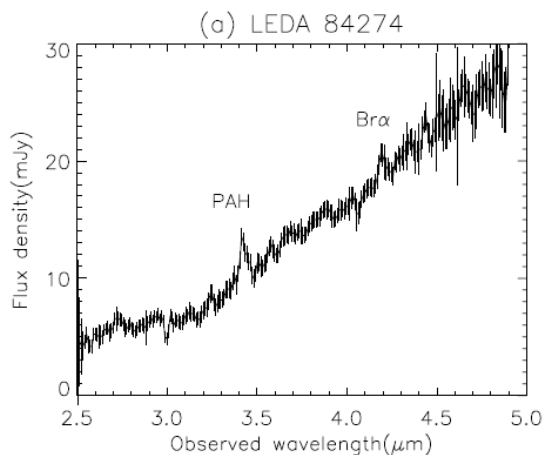
- 近赤外線帯は、星由来の放射と、星間物質由来の放射が混ざり合う領域
- 星間環境をよく反映するフィーチャーが多数存在する

主なNIR放射の起源 その1

- 星 (楕円銀河 NGC2768) 黒体放射 レイリー-ジーンズ則

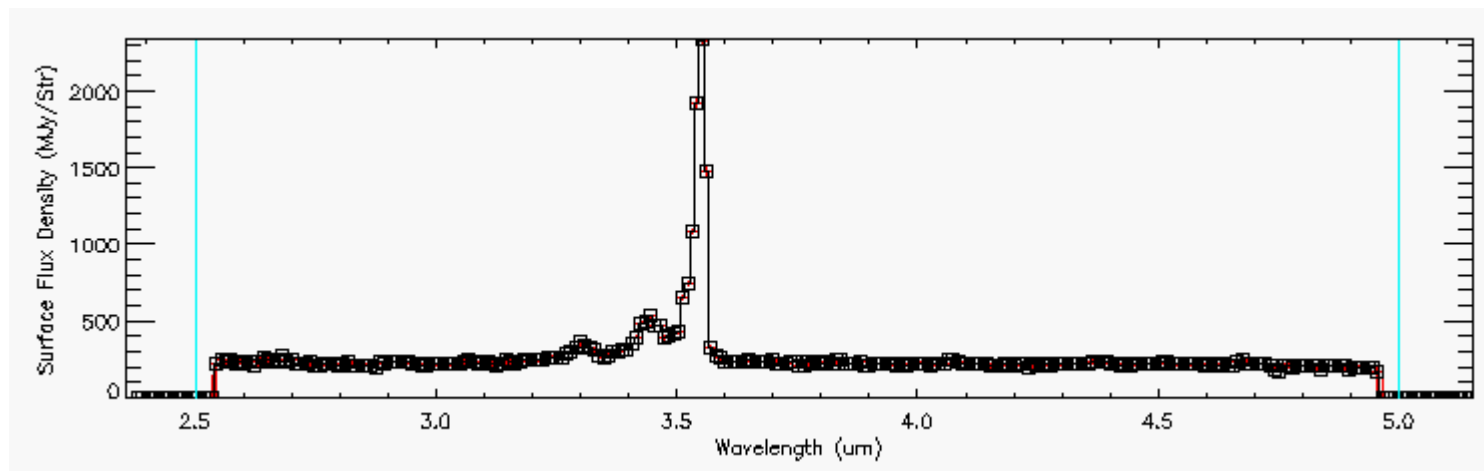
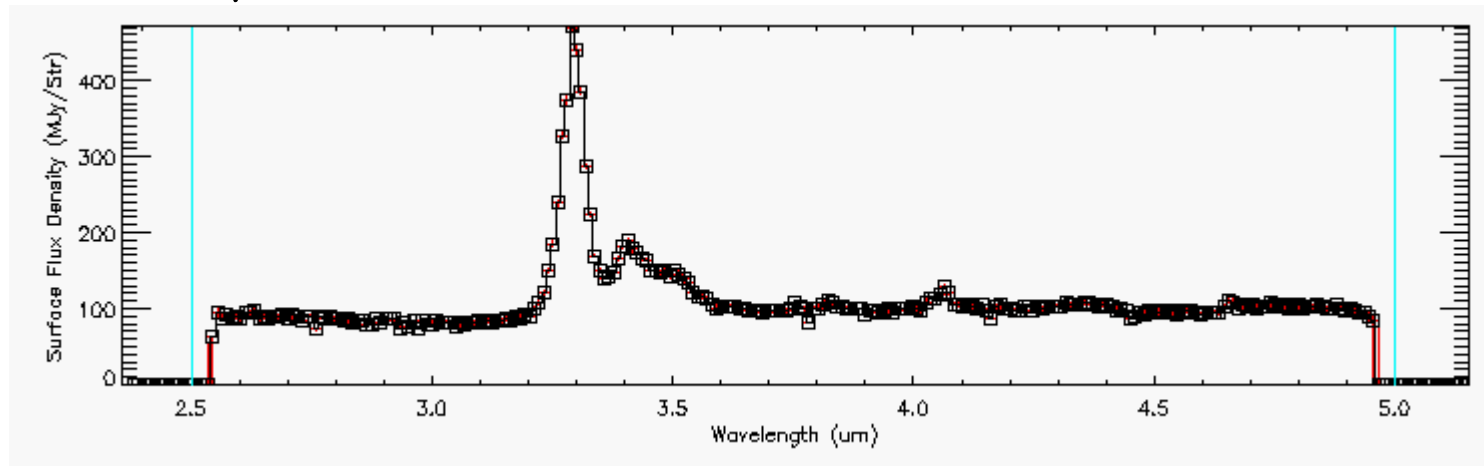


- Hot dust ~ 1000K (AGN) 黒体放射



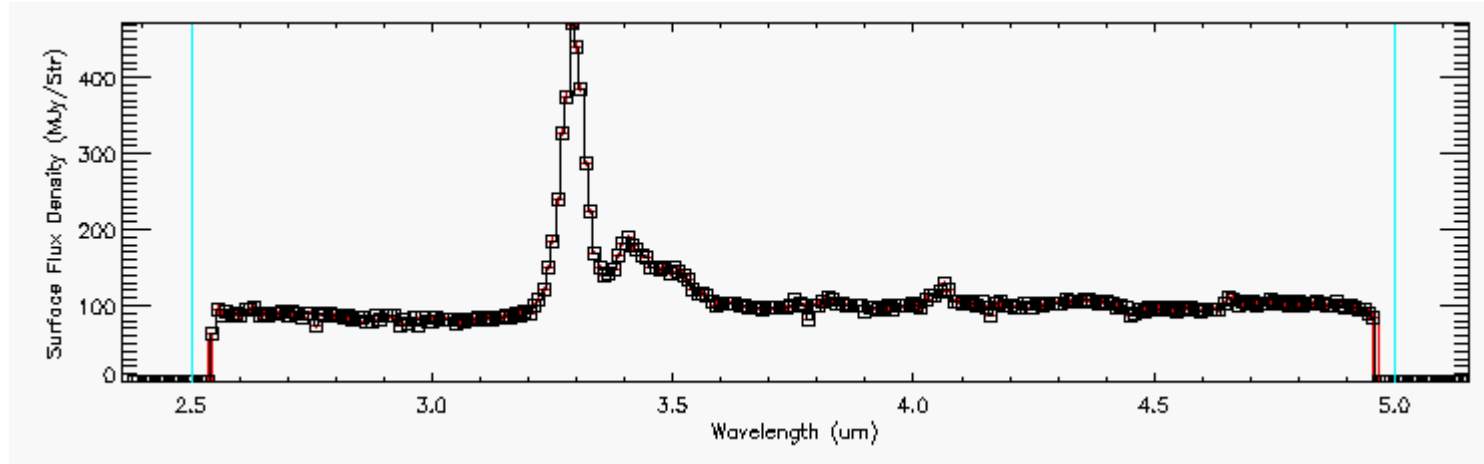
主なNIR放射の起源 その2

- PAH 3.3 μm 多環芳香族炭化水素 C-H伸縮モード (TY CRA)

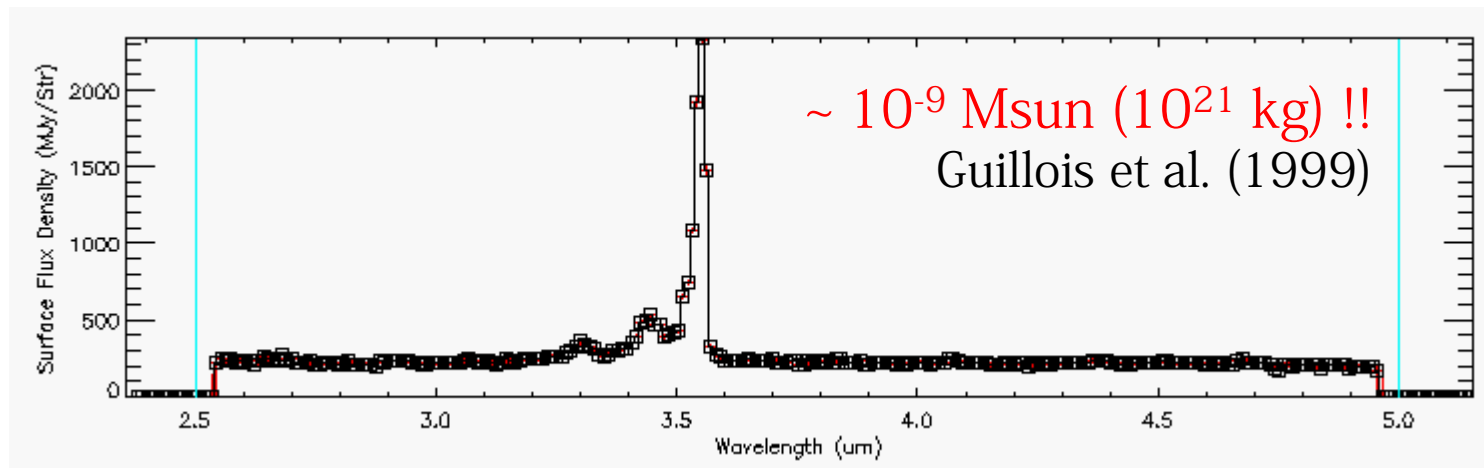


主なNIR放射の起源 その2

- PAH 3.3 μm 多環芳香族炭化水素 C-H伸縮モード (TY CRA)

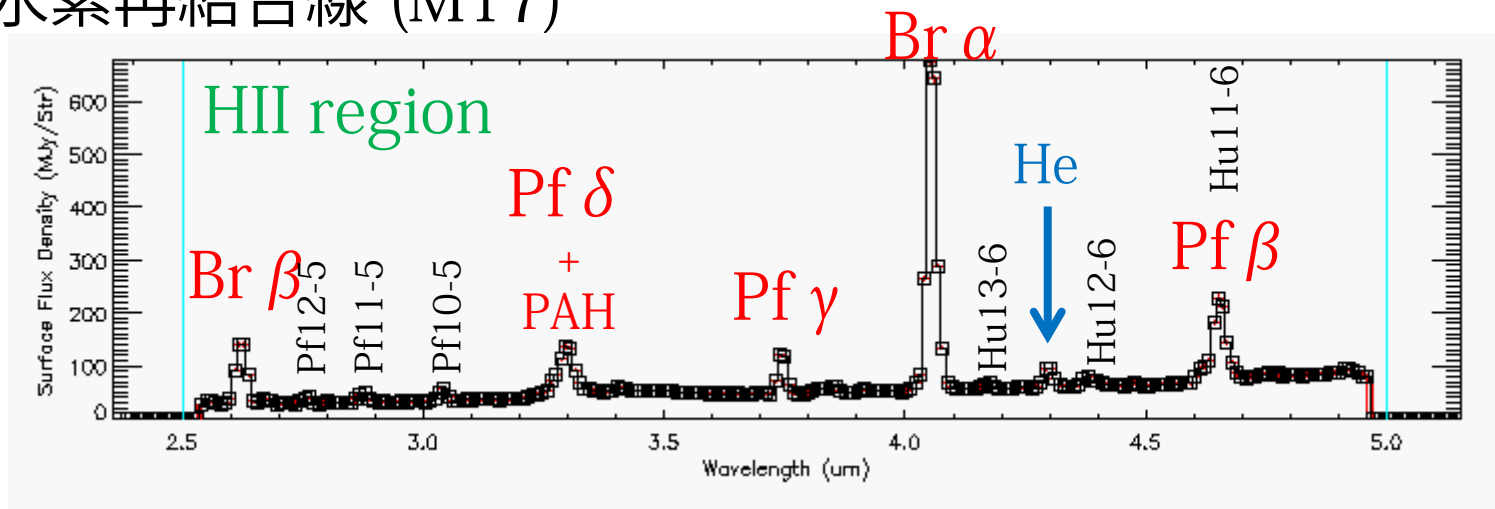


- Circumstellar diamond !? (HD97048; Herbig Be star)

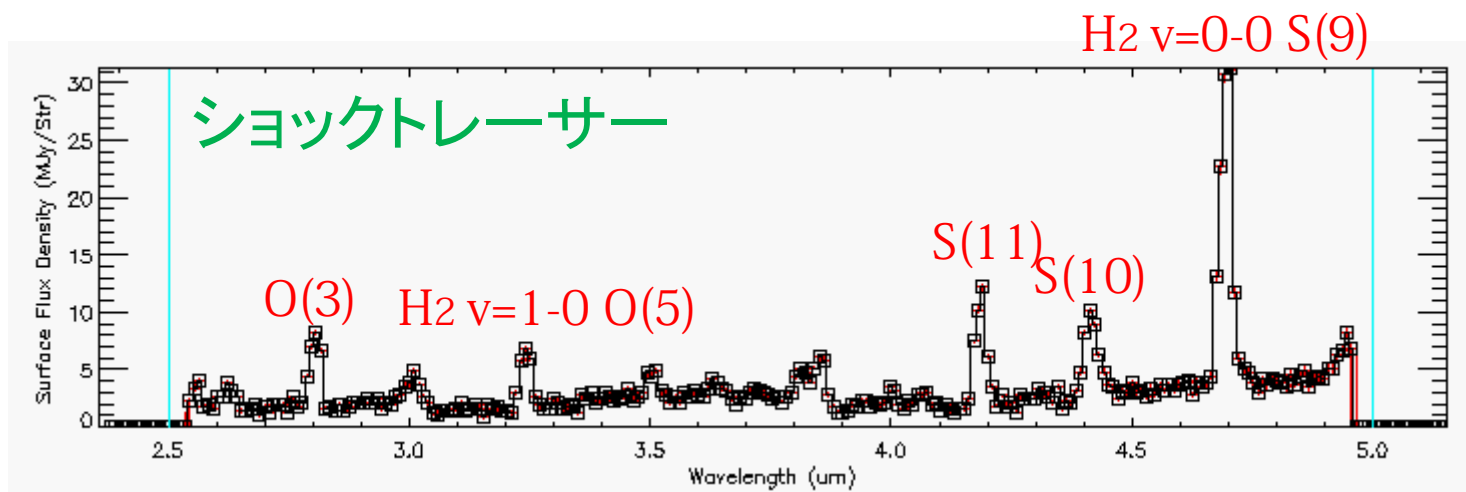


主なNIR放射の起源 その3

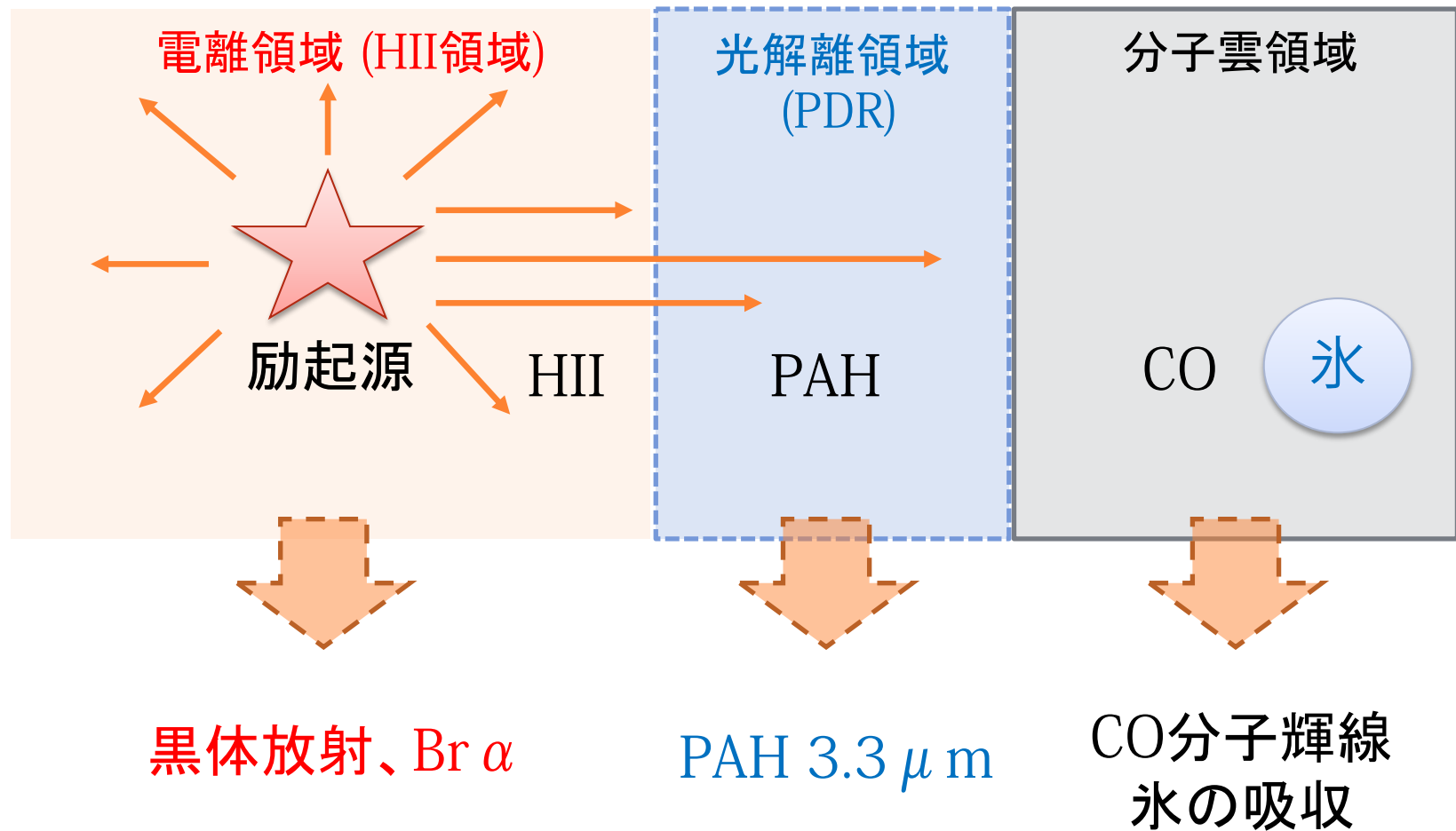
水素再結合線 (M17)



H₂ 純/振動 回転遷移 (IC443)



主なNIR放射の起源 まとめ

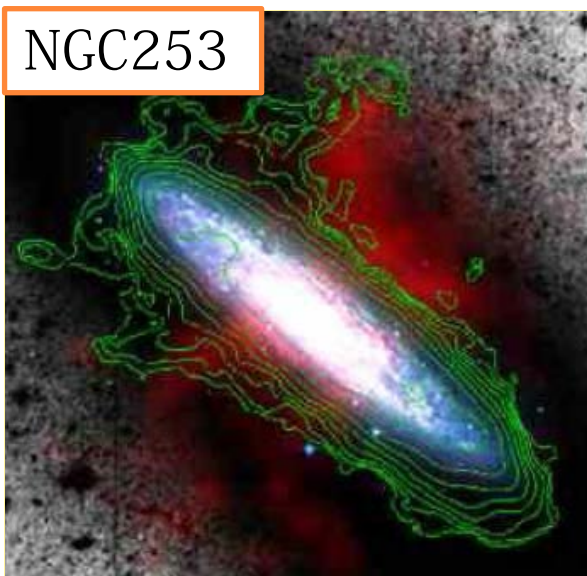




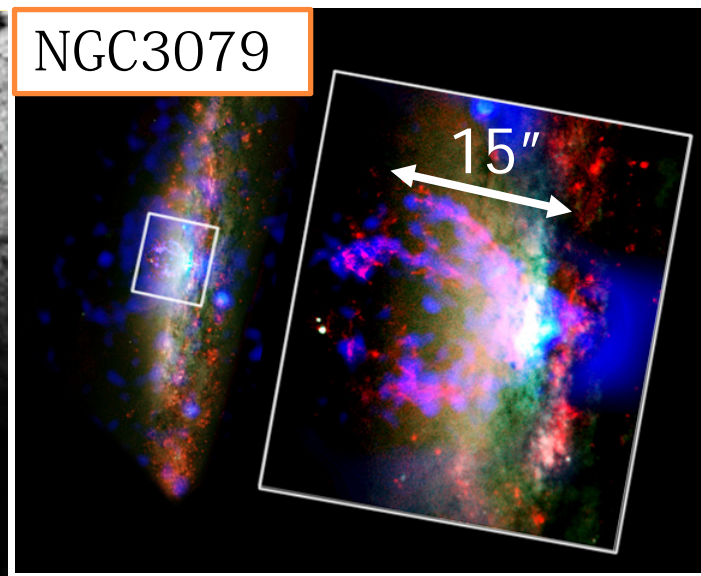
スペクトル例：

NGC253、NGC3079、M82

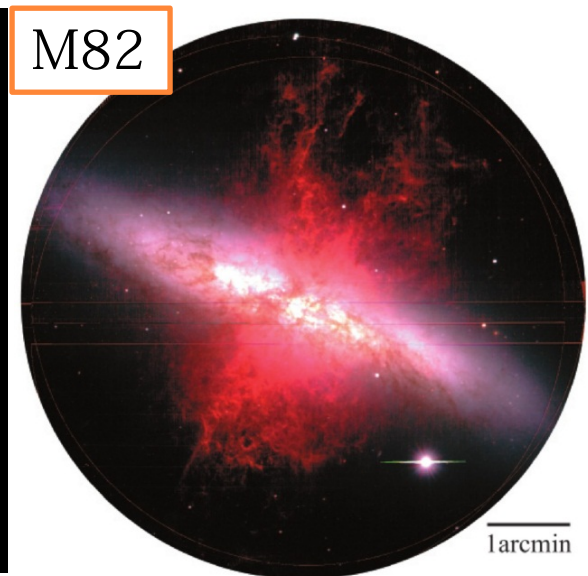
- 近傍の横向きスターバースト銀河
 - Bバンド絶対等級が同程度 (~ -19 mag)
 - 金属量が同程度 ($\sim 1 Z_{\text{sun}}$)
 - 銀河面から X線、 $H\alpha$ のアウトフローがある



赤：X線、緑：HI、青：星
Boomsma et al. (2005)



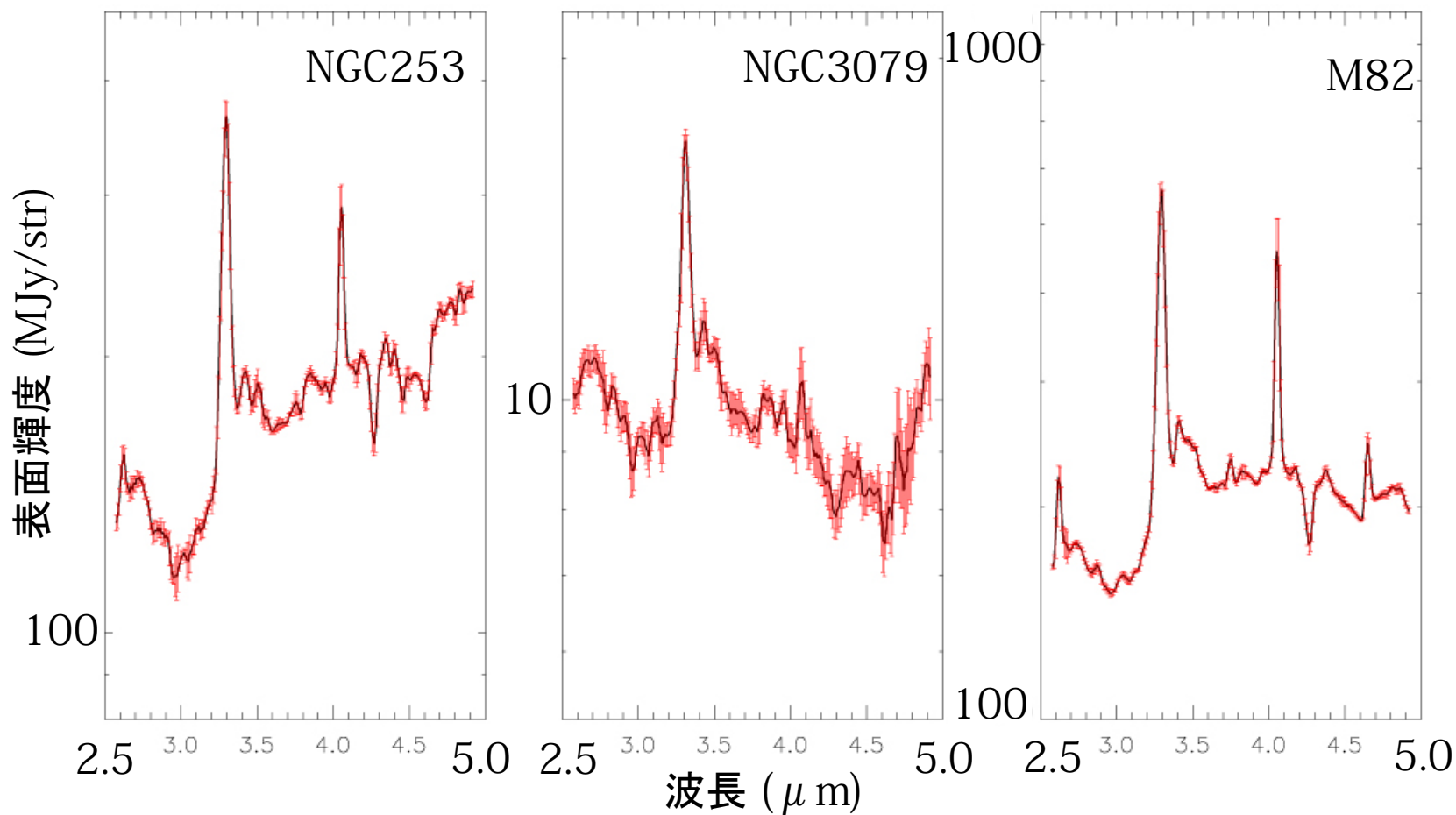
赤： $H\alpha$ 、緑：星、青：X線
<http://chandra.harvard.edu/>



赤： $H\alpha$ 、緑、青：星
Ohyama et al. (2002)

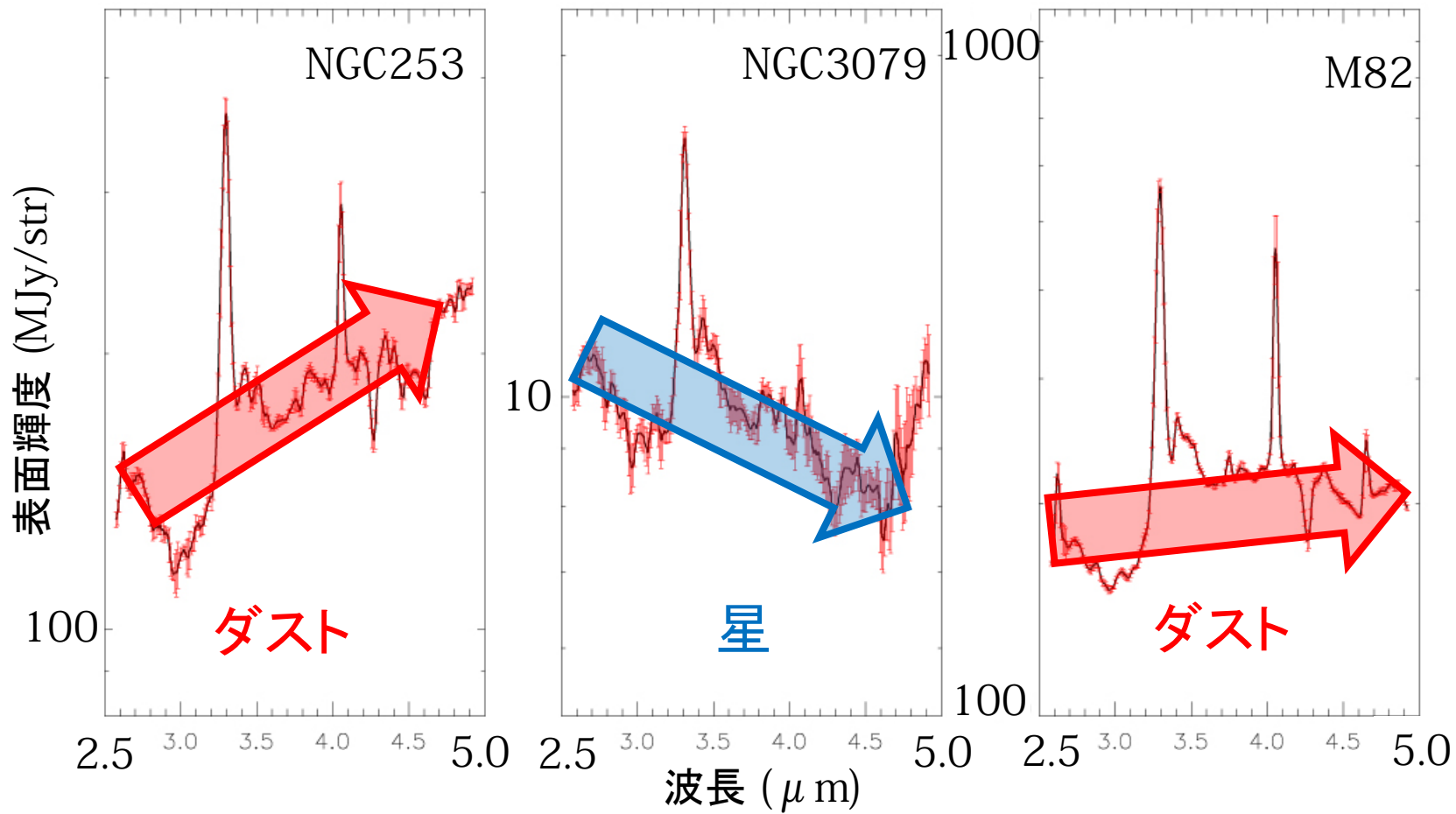
スペクトル例→星間環境の違いを反映

各銀河の中心付近スペクトル



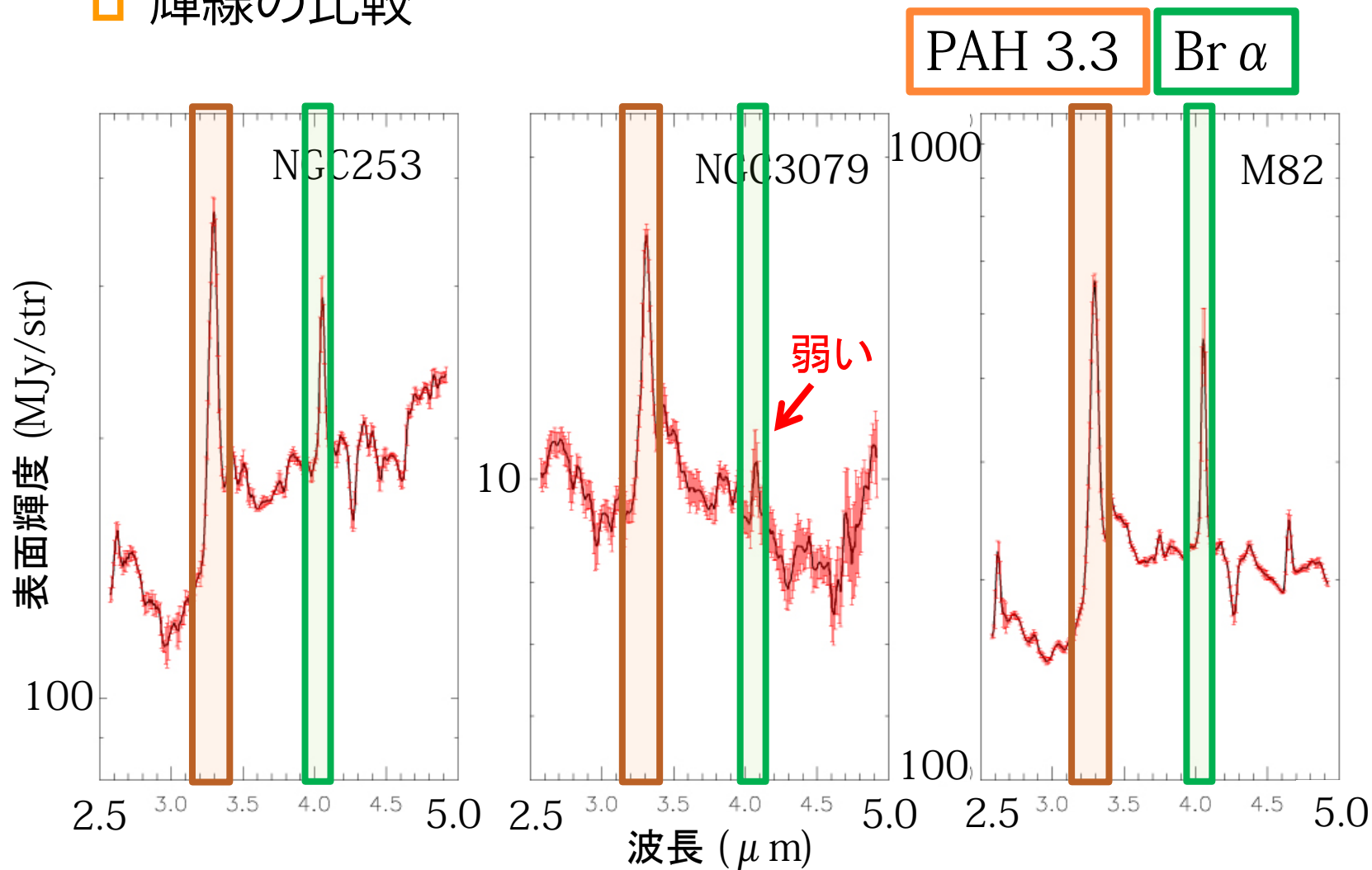
スペクトル例→星間環境の違いを反映

連続放射成分の比較



スペクトル例→星間環境の違いを反映

輝線の比較



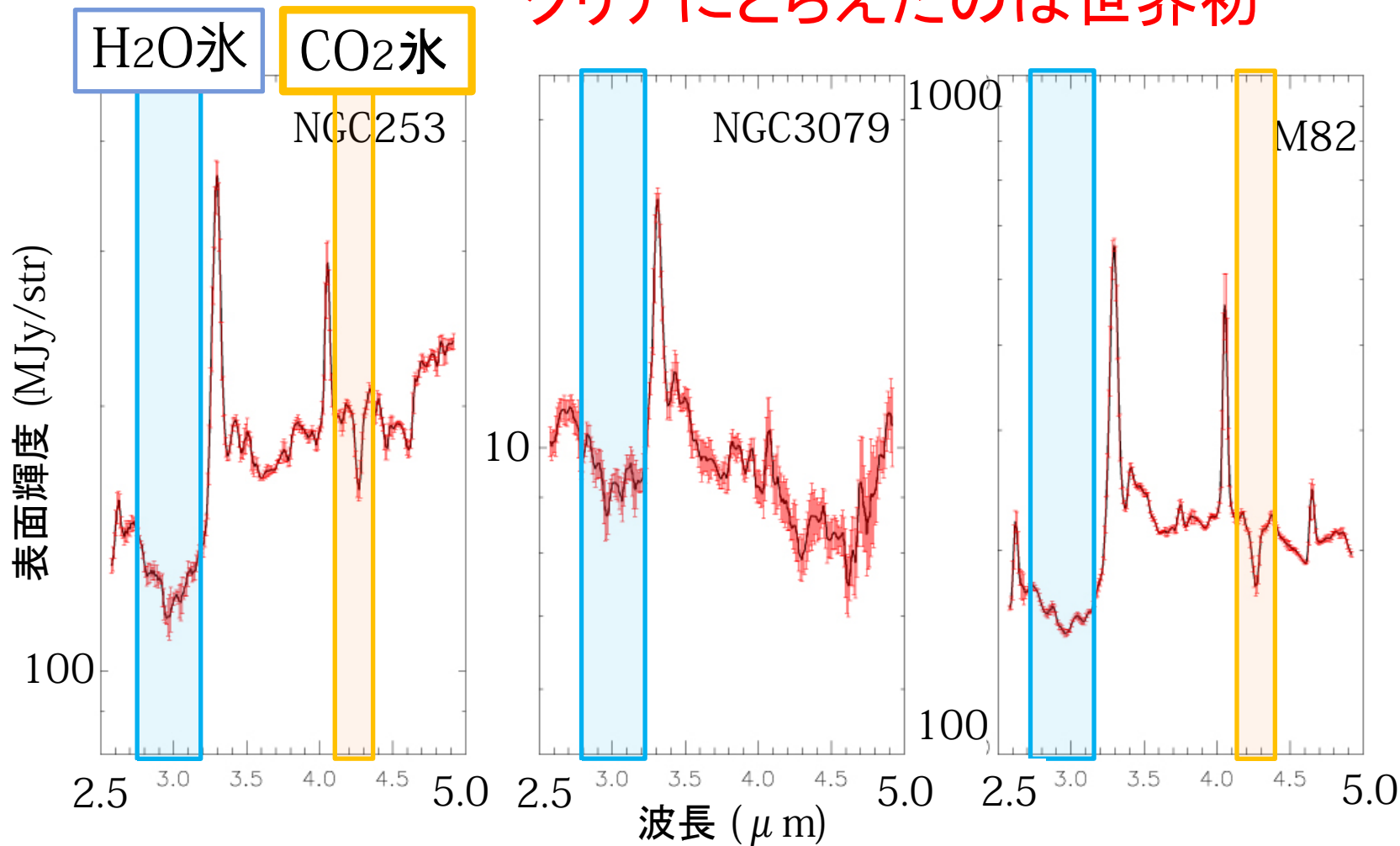
スペクトル例→星間環境の違いを反映

近傍銀河の星間物質中で氷の吸収をクリアにとらえたのは世界初

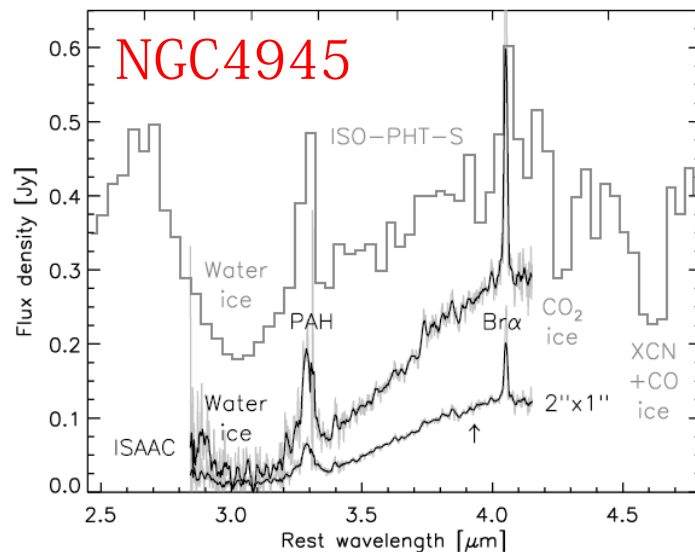
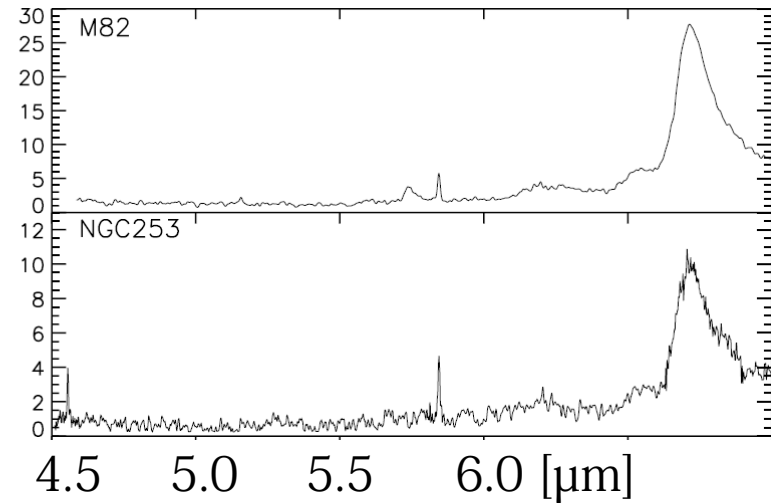
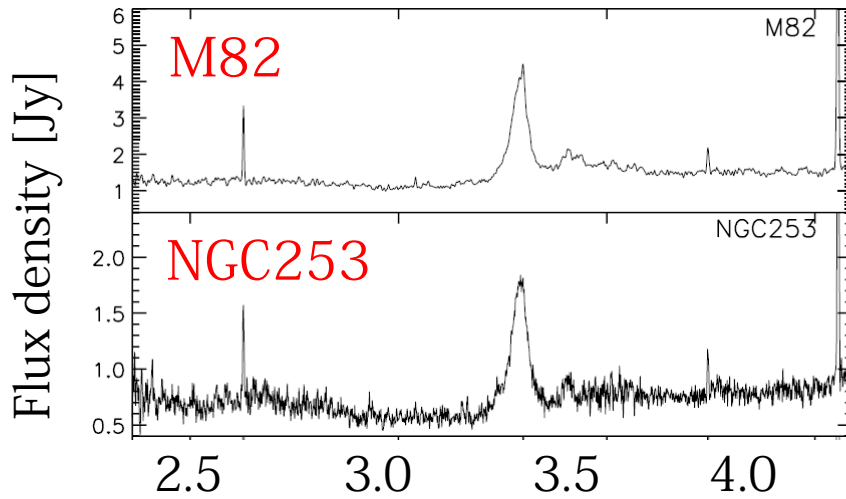
□ 吸収の比較

H₂O氷

CO₂氷



近傍銀河の氷の観測 → 3天体のみ

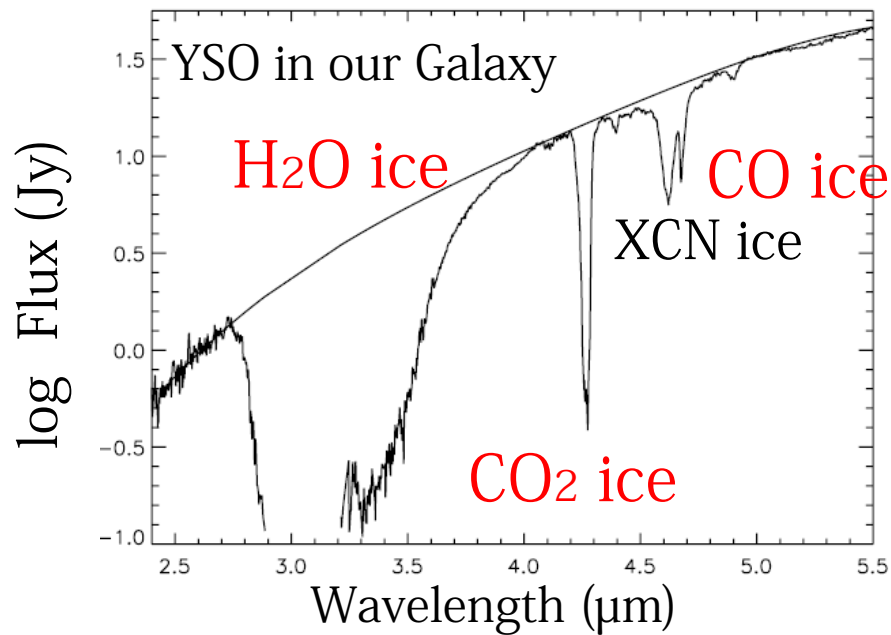


S Sturm et al. 2000 (ISO)
Detection: H₂O

S Spoon et al. 2003 (ISO+地上)
Detection: H₂O, CO₂, CO, XCN

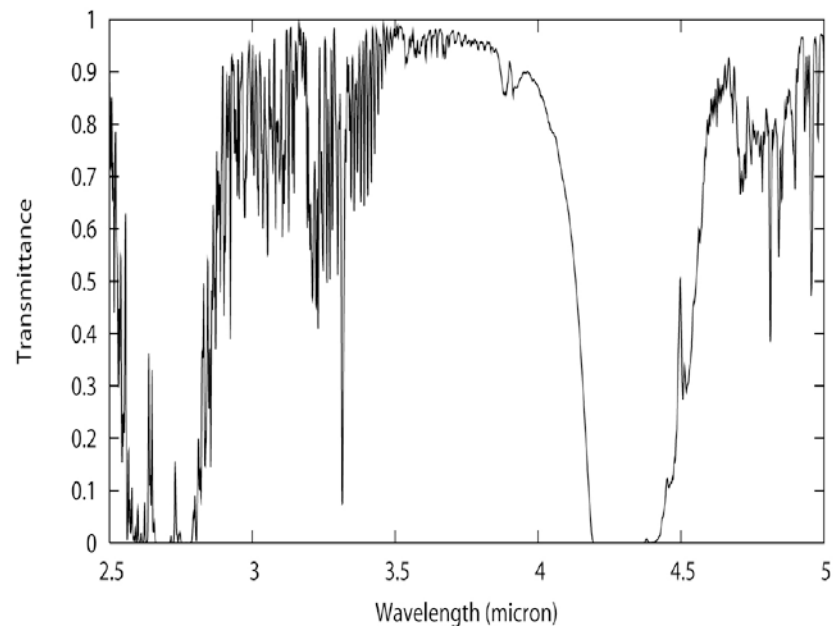
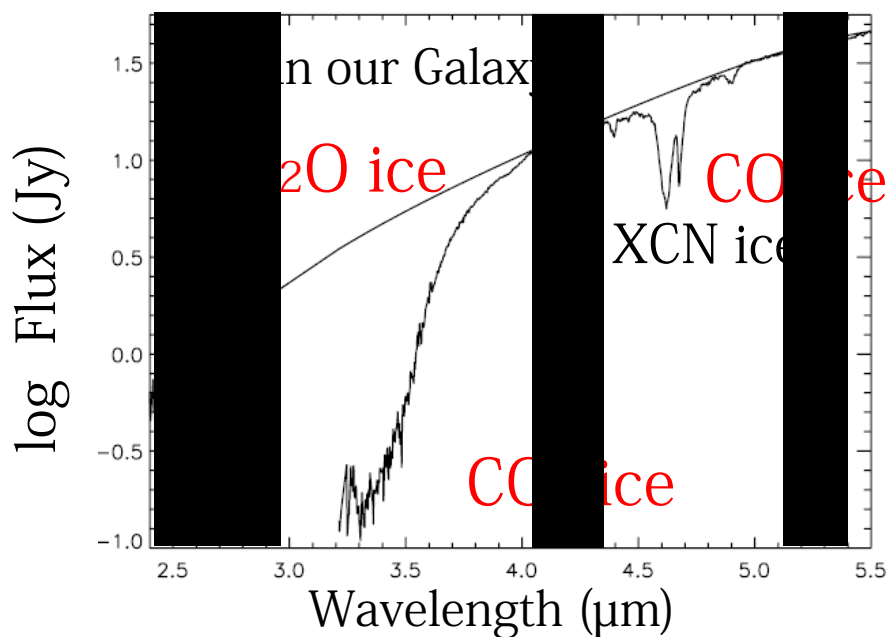
衛星観測の必要性

- 地上では大気の吸収により、氷の観測は困難
- 高感度かつ連続的に観測できる衛星観測が必須
- 「あかり」で氷を持つ天体をたくさん検出したい

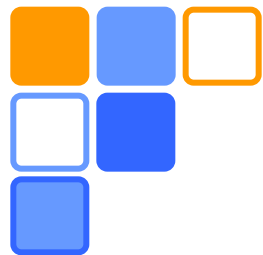


衛星観測の必要性

- 地上では大気の吸収により、氷の観測は困難
- 高感度かつ連続的に観測できる衛星観測が必須
- 「あかり」で氷を持つ天体をたくさん検出したい



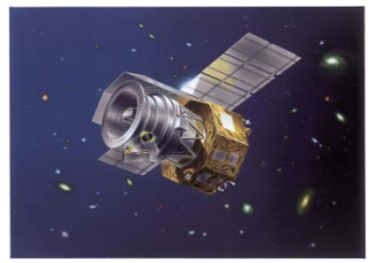
大気の透過率@マウナケア山頂



SYSTEMATIC STUDY OF INTERSTELLAR ICES IN NEARBY GALAXIES



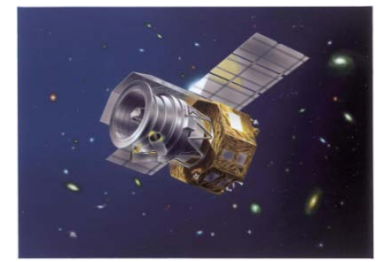
観測の概要



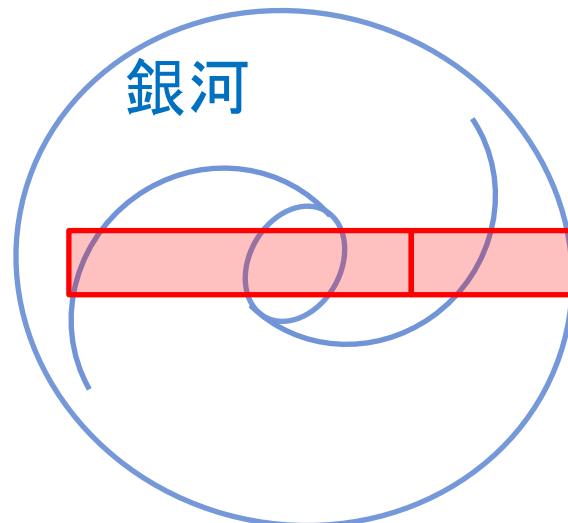
- 「あかり」スリット分光観測 ($\lambda = 2.5 - 5.0 \mu\text{m}$)
- 122天体に対して、ほぼ無バイアスな観測
 - M31, NGC253, NGC6946, M101, M51, NGC2768, Centaurus A, IC10, NGC205... etc
- トータル 211領域(スリットを当てた領域数)
- スペクトル 439本



観測の概要



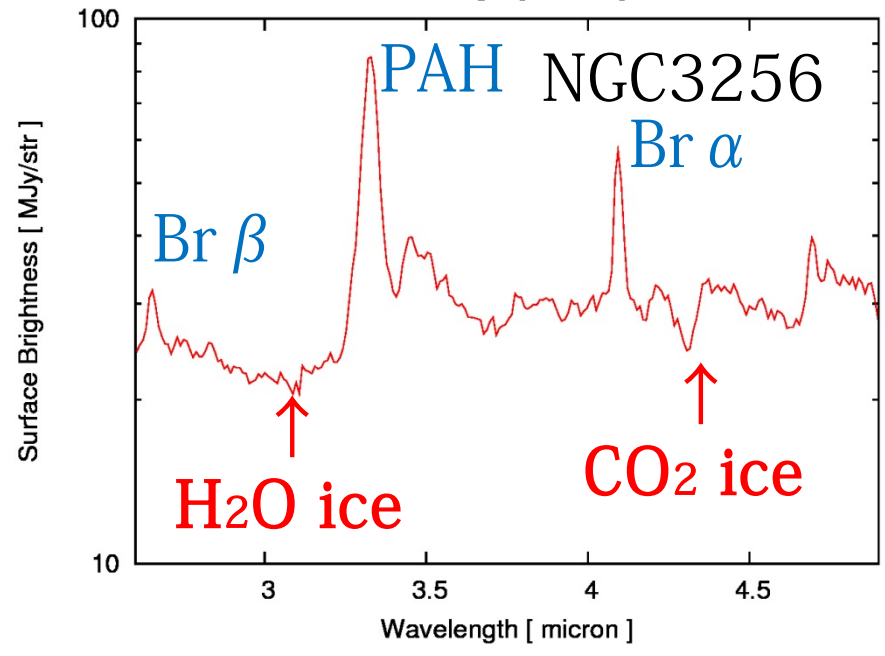
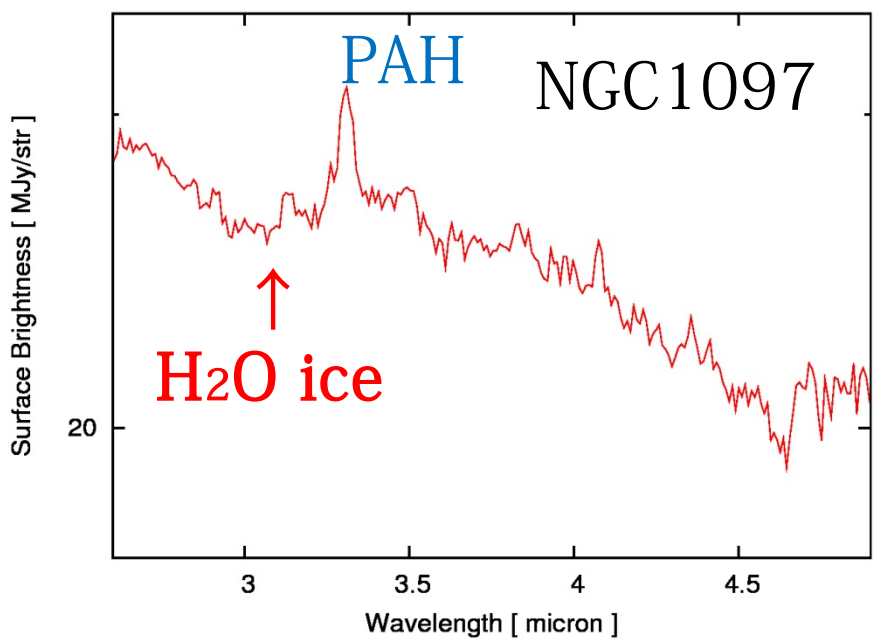
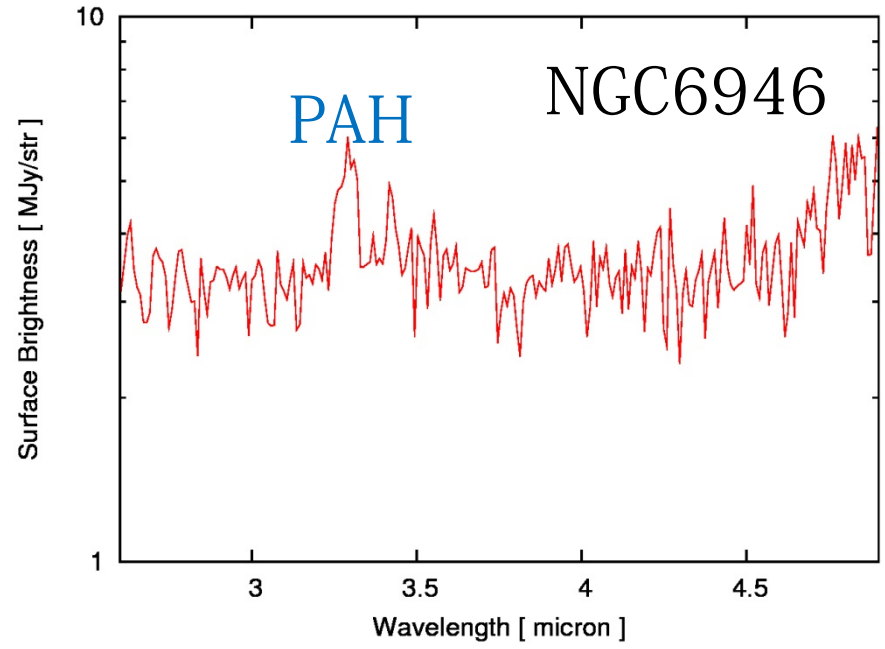
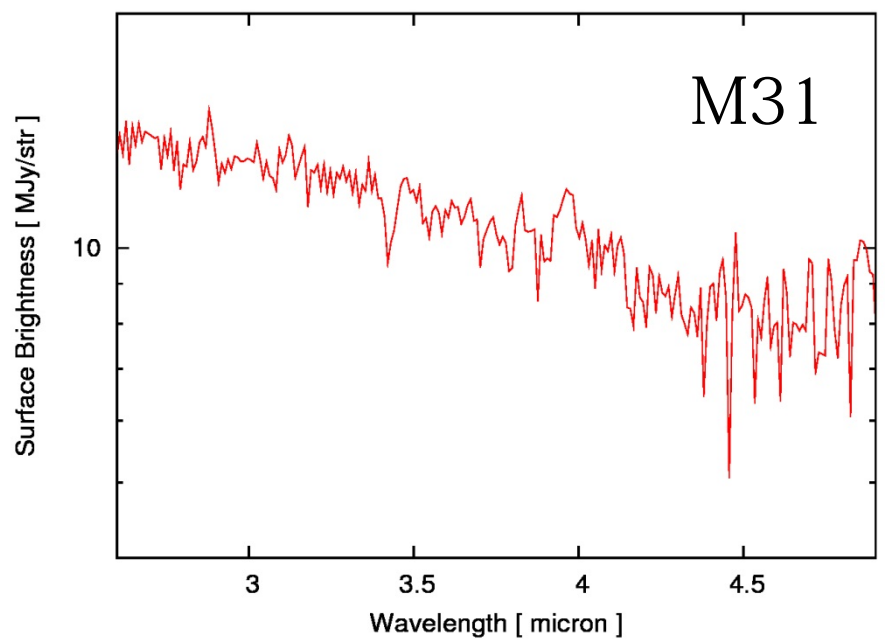
- 「あかり」スリット分光観測 ($\lambda = 2.5 - 5.0 \mu\text{m}$)
- 122天体に対して、ほぼ無バイアスな観測
 - M31, NGC253, NGC6946, M101, M51, NGC2768, Centaurus A, IC10, NGC205... etc
- トータル 211領域 (スリットを当てた領域数)
- スペクトル 439本



スリット (5" × 40" or 3" × 47")

スリットの向きと垂直方向に光を分散
S/Nの許す範囲で、スリット内の複数の
領域からスペクトルを作成できる

Examples



Data analysis

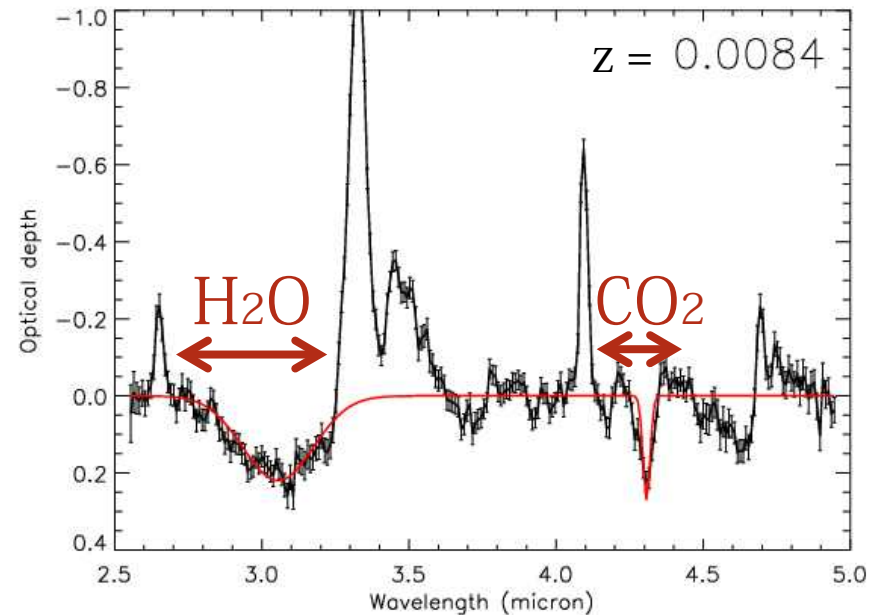
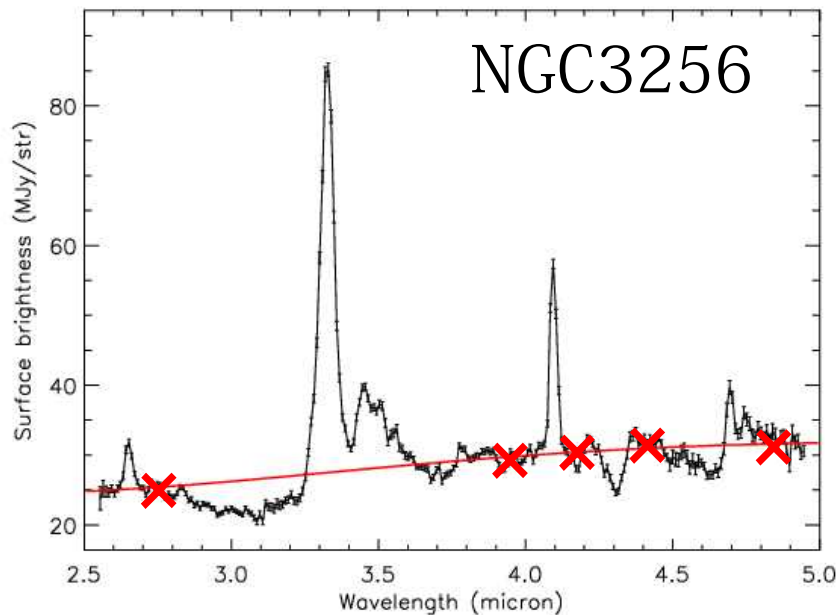
$$\text{Column density: } N = \int \tau d\nu / A$$

τ : optical depth, ν : wave number

A : Gerakines et al. (1995)

- Continuum : multi-temperature blackbody
- Absorption : H₂O, CO₂ ice model → column density

For example NGC3256; $N(\text{H}_2\text{O}) = 3.6 \times 10^{17} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$
 $N(\text{CO}_2) = 5.8 \times 10^{16} \text{ (cm}^{-2}\text{)}$





Detection: 36 / 122 galaxies

Late type : 22

CO₂ ice detected

M31, M63, M64, M83, M90, M94, M104, NGC253,
NGC891, NGC1097, NGC1291, NGC1566, NGC1808,
NGC2146, NGC3079, NGC3190, NGC3627, NGC3628,
NGC4041, NGC4258, NGC5430, NGC6946

Early type: 9

Cen A, IC1459, IC3370, NGC1316, NGC3557, NGC3904,
NGC4697, NGC5018, NGC5044

Irregular : 5

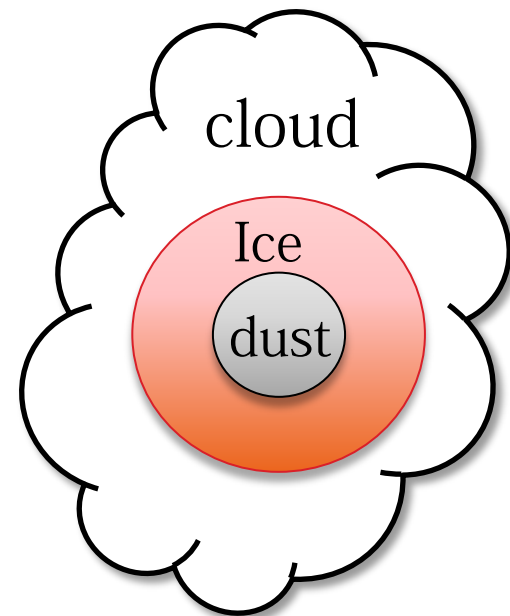
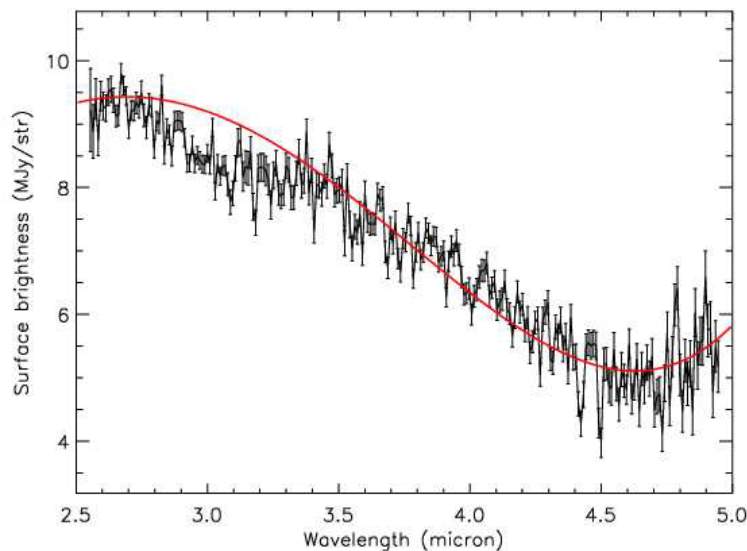
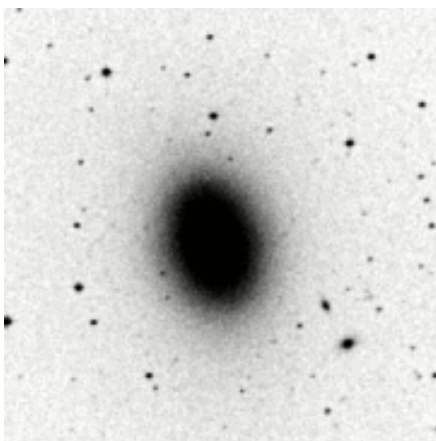
ESO0495-G021, M82, NGC1614, NGC3256, NGC7727

H ₂ O ice detected	... 36 galaxies
CO ₂ ice detected	... 9 galaxies

NGC3904

- 楕円銀河からも氷を検出 $N(\text{H}_2\text{O})=2 \times 10^{17} \text{ [cm}^{-2}\text{]}$
- 楕円銀河 = 星形成をしておらず、星間物質が少ない
- 氷の存在 → ダストの存在 → 分子雲の存在
- $\text{H}_2\text{O}/\text{H}$ abundance $\sim 10^{-4}$ (Kwok 2007)
→ $N(\text{H}) \sim 10^{21} \text{ [cm}^{-2}\text{]}$

NGC3904 (可視光)





Detection: 36 / 122 galaxies

Late type : 22

CO₂ ice detected

M31, M63, M64, M83, M90, M94, M104, NGC253,
NGC891, NGC1097, NGC1291, NGC1566, NGC1808,
NGC2146, NGC3079, NGC3190, NGC3627, NGC3628,
NGC4041, NGC4258, NGC5430, NGC6946

Early type: 9

Cen A, IC1459, IC3370, NGC1316, NGC3557, NGC3904,
NGC4697, NGC5018, NGC5044

Irregular : 5

ESO0495-G021, M82, NGC1614, NGC3256, NGC7727

H ₂ O ice detected	... 36 galaxies
CO ₂ ice detected	... 9 galaxies



Detection: 36 / 122 galaxies

Late type : 22

CO₂ ice detected

M31, M63, M64, M83, M90, M94, M104, NGC253,
NGC891, NGC1097, NGC1291, NGC1566, NGC1808,
NGC2146, NGC3079, NGC3190, NGC3627, NGC3628,
NGC4041, NGC4258, NGC5430, NGC6946

Early type: 9

Cen A, IC1459, IC3370, NGC1316, NGC3557, NGC3904,
NGC4697, NGC5018, NGC5044

Irregular : 5

ESO0495-G021, M82, NGC1614, NGC3256, NGC7727

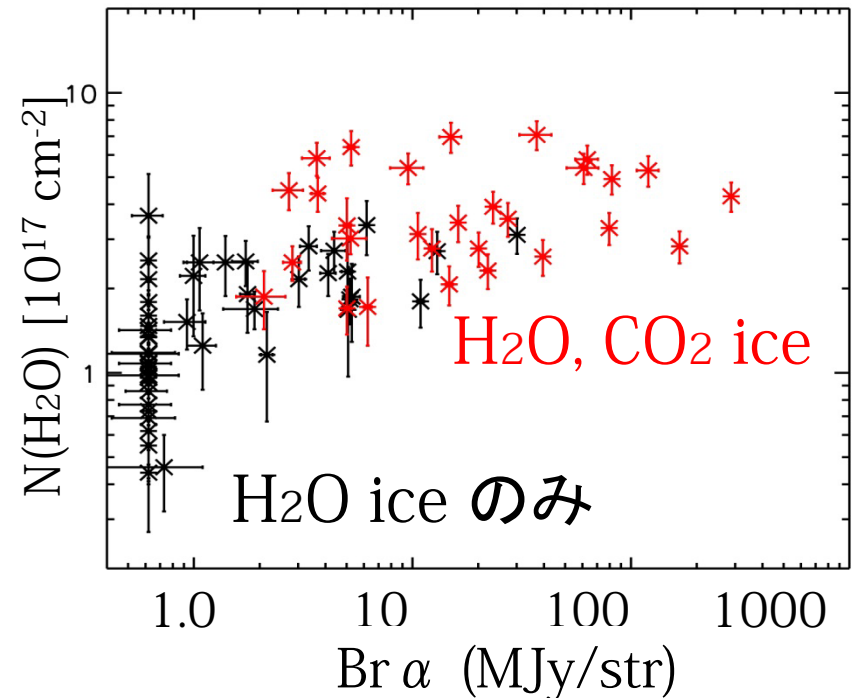
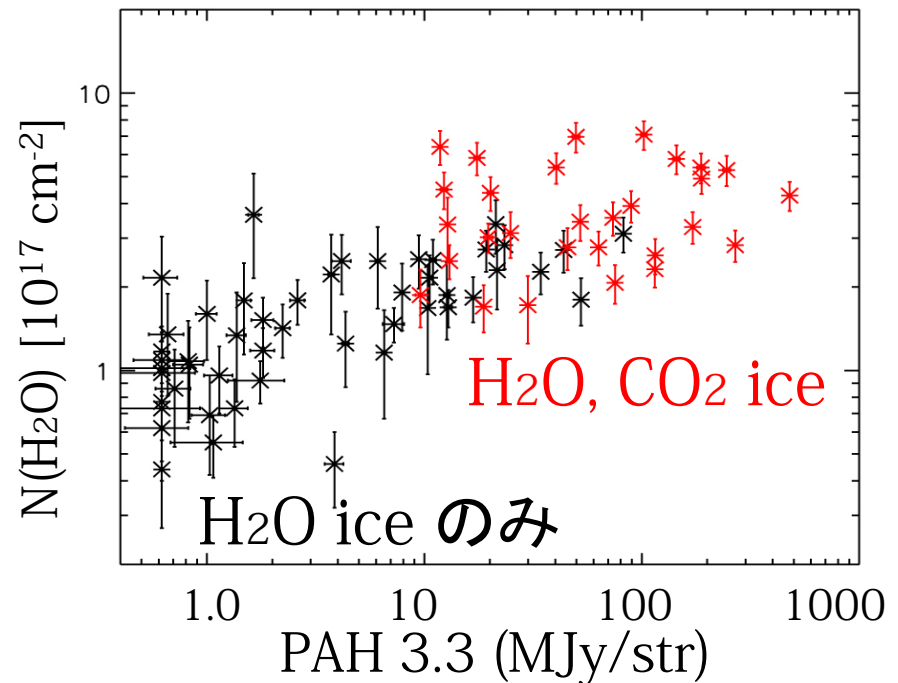
H₂O ice detected ... 36 galaxies

CO₂ ice detected ... 9 galaxies

疑問：そもそも氷の存在量を決めているものは何か？

N(H₂O)

- N(H₂O)はPAH, Br α 放射強度と弱い相関あり
 - PAH: 中性の星間物質
 - 物質の多いところで、氷も多く存在
 - 輻射環境がCO₂氷の生成に影響している可能性
 - 単純に物質の量、UV強度だけで評価できない。
 - 何か別の要因がある？
 - 個別天体の解析でより詳細に議論。

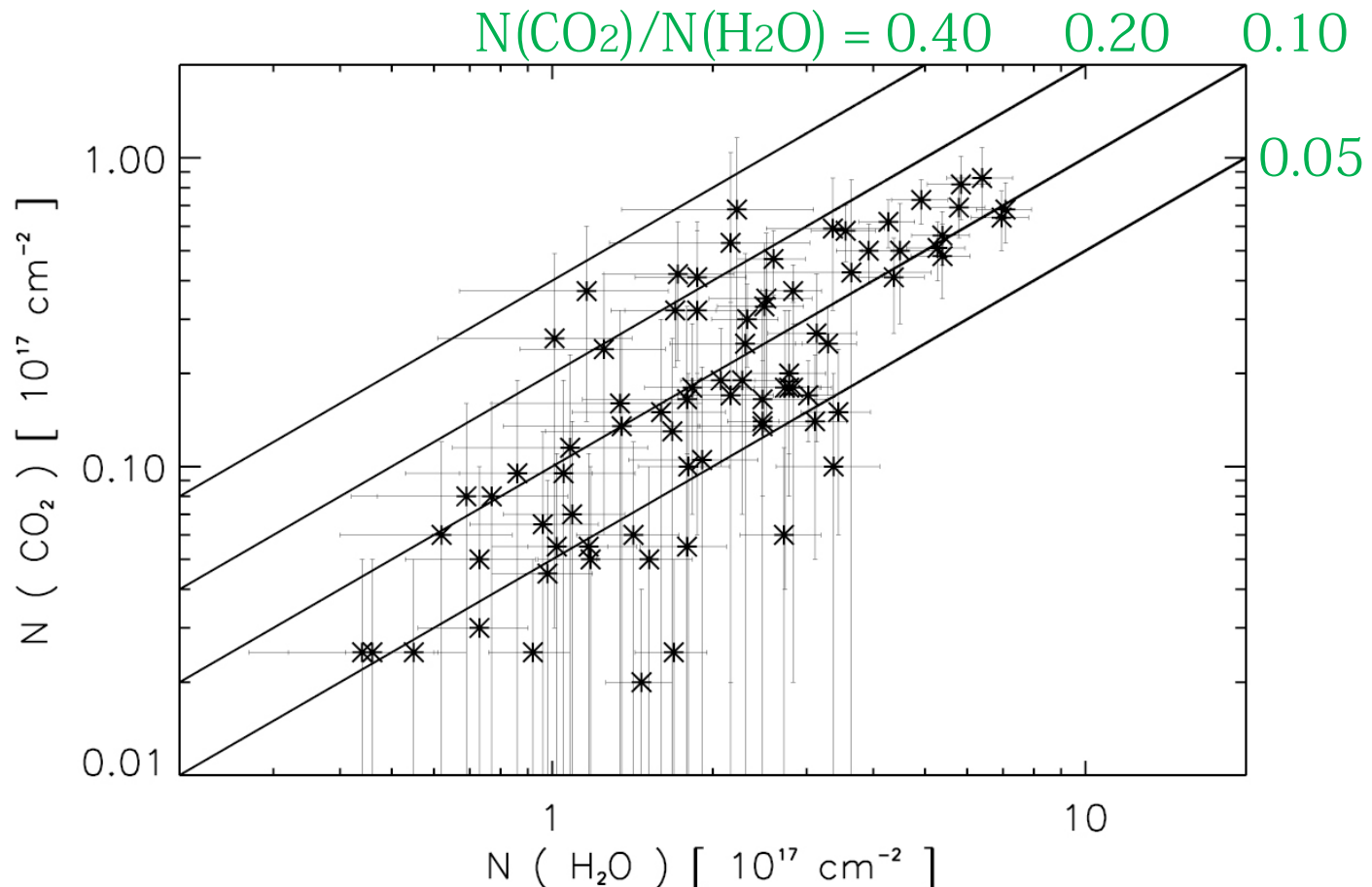


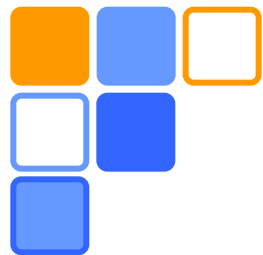
$N(\text{CO}_2)/N(\text{H}_2\text{O})$

YSOs in LMC: 0.36 ± 0.09
YSOs in our Galaxy: 0.17 ± 0.03

Gibb et al. (2004), Shimonishi et al. (2010)

- CO₂/H₂O比は銀河系に近いもの(～0.1)が多い。
- 金属量依存性は、今のところ議論困難。





SPATIALLY RESOLVED STUDIES OF ICES



Ices in NGC253 and M82

Yamagishi et al. (in prep)

- Active nearby edge-on starburst galaxies ($D \sim 3$ Mpc)
- We perform spatially resolved studies.

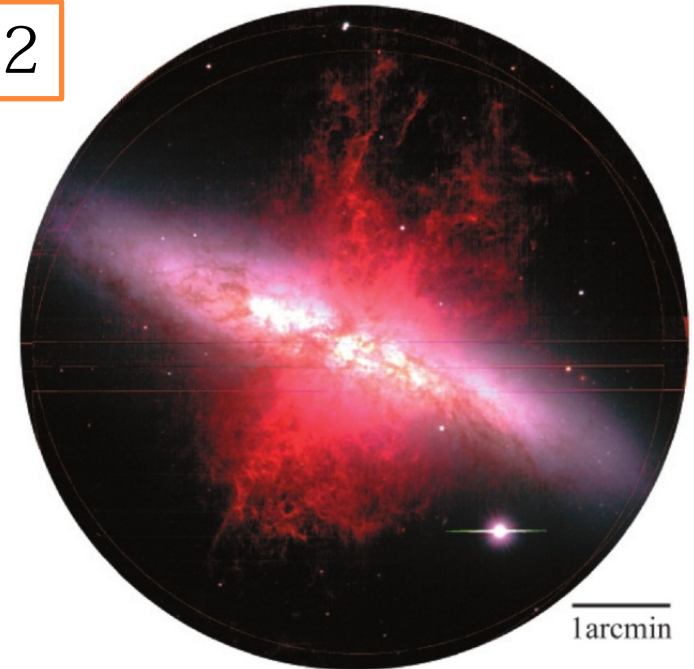
NGC253



Red: H α , Green, Blue: optical

<http://www.eso.org/public/images/eso0902a/>

M82



Red: H α , Green, Blue : optical
Ohyama et al. (2002)

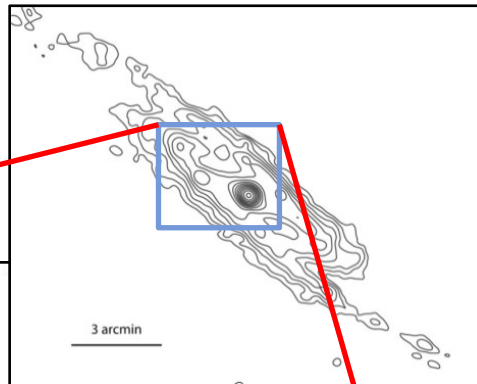


Ices in NGC253 and M82

- Active nearby edge-on starburst galaxies ($D \sim 3$ Mpc)
- We perform spatially resolved studies.

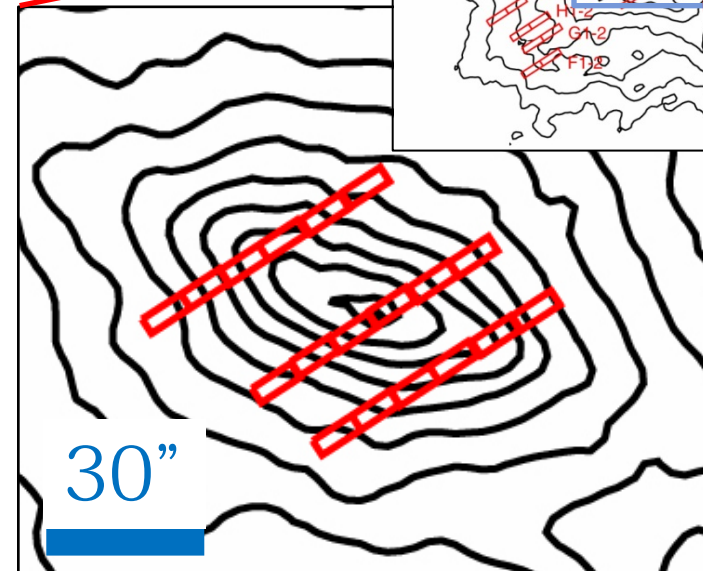
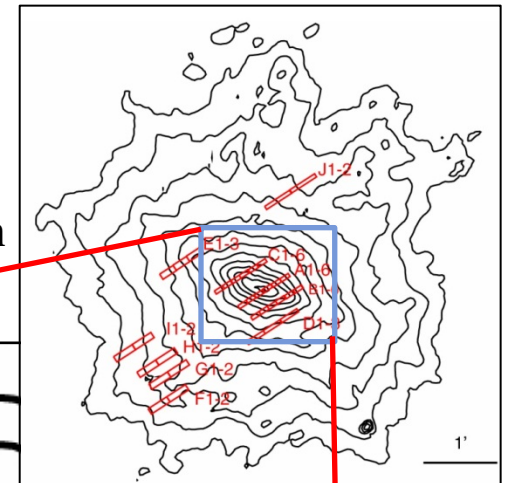
NGC253

Contours: AKARI
all-sky survey $9 \mu\text{m}$



M82

Contours:
AKARI $7 \mu\text{m}$

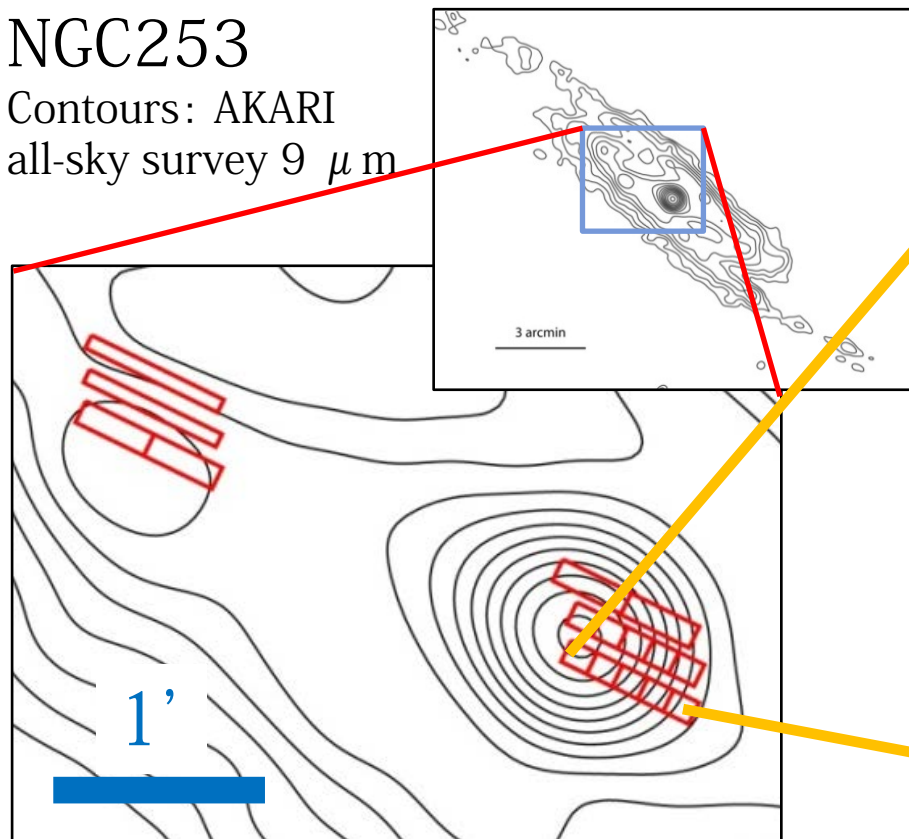




Example; NGC253

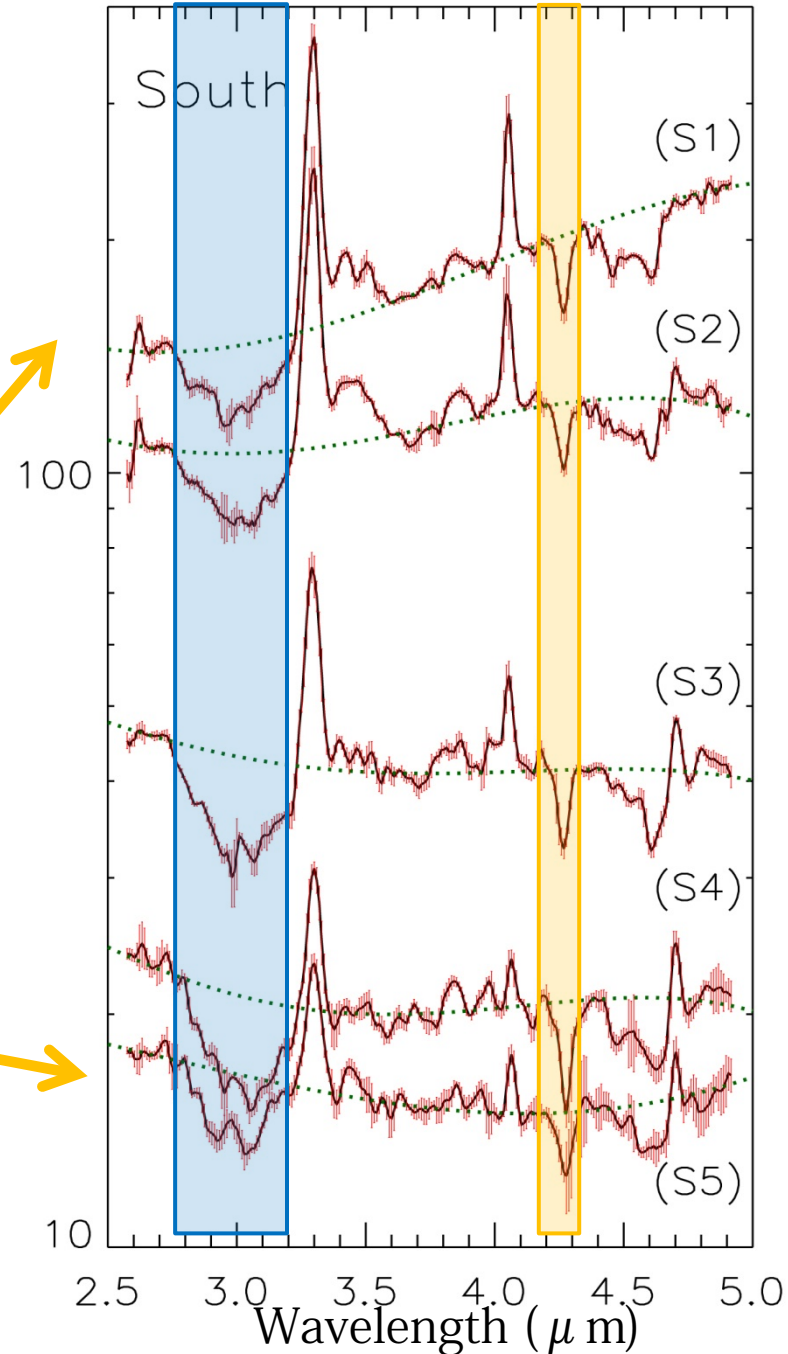
NGC253

Contours: AKARI
all-sky survey 9 μm



Surface brightness (Mjy/str)

H₂O ice CO₂ ice



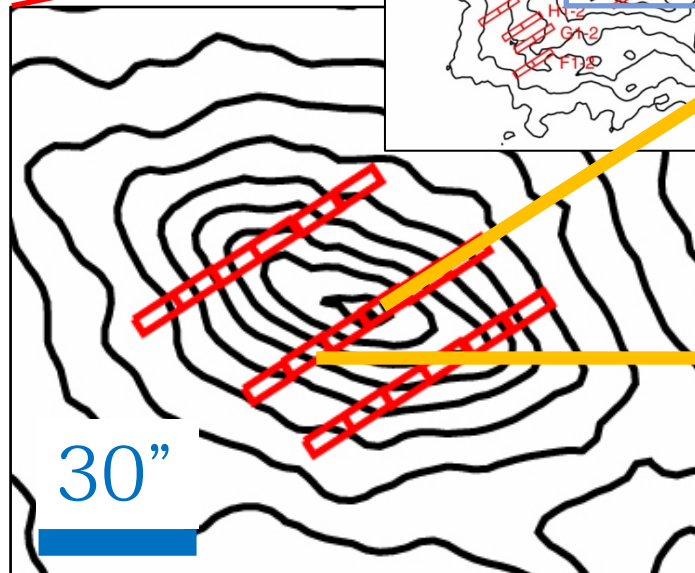
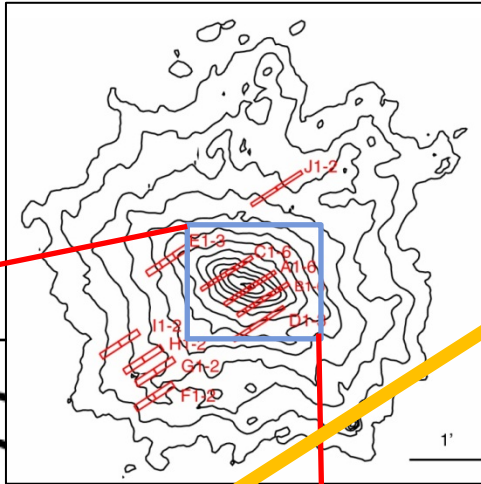


Example; M82

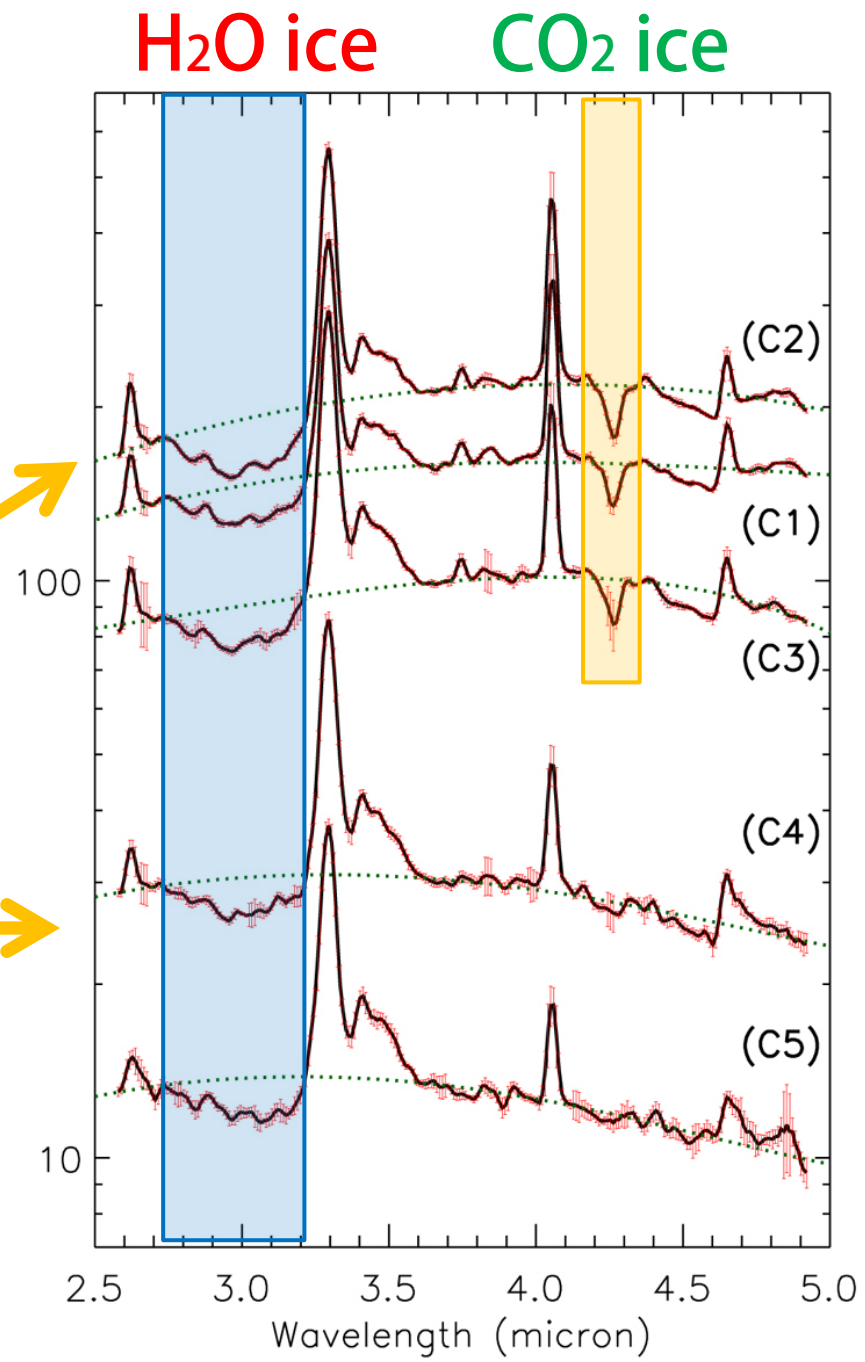
M82

Contours:

AKARI 7 μm



Surface Brightness (Mjy sr^{-1})



Example; M82

M82

Contours:

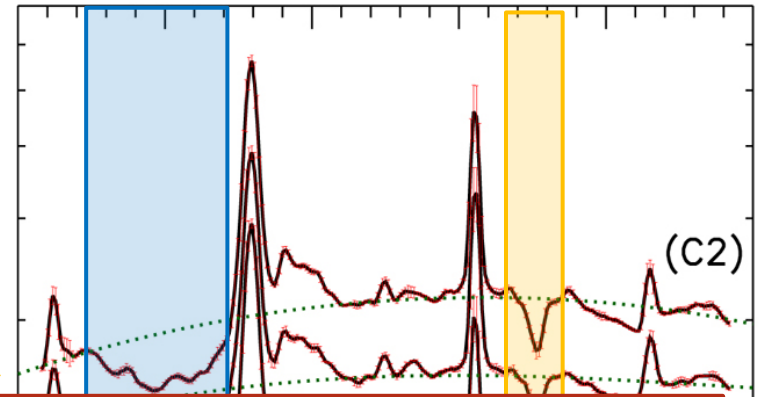
AKAP1 7 μm



sr^{-1}

H₂O ice

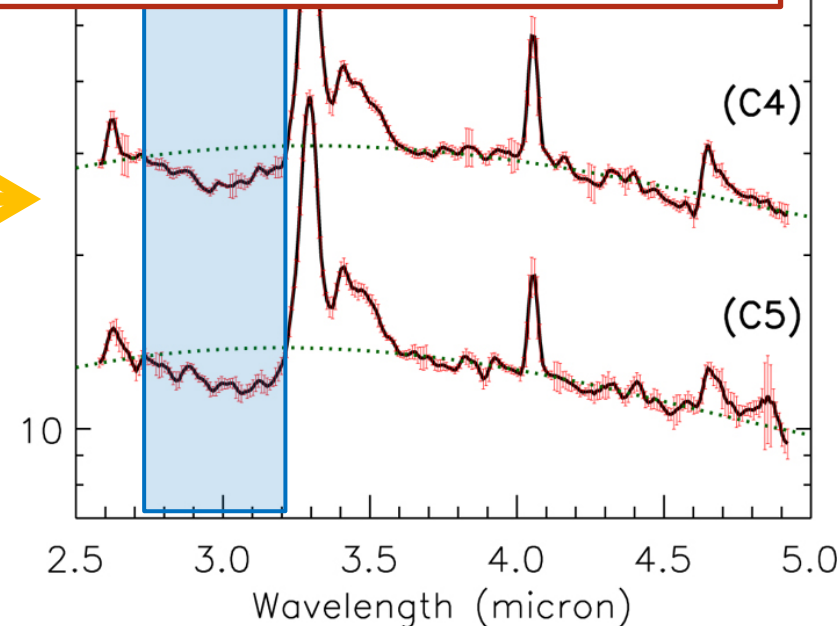
CO₂ ice



These results suggest that the distribution of H₂O ice may be different from that of CO₂ ice.



Surface Br



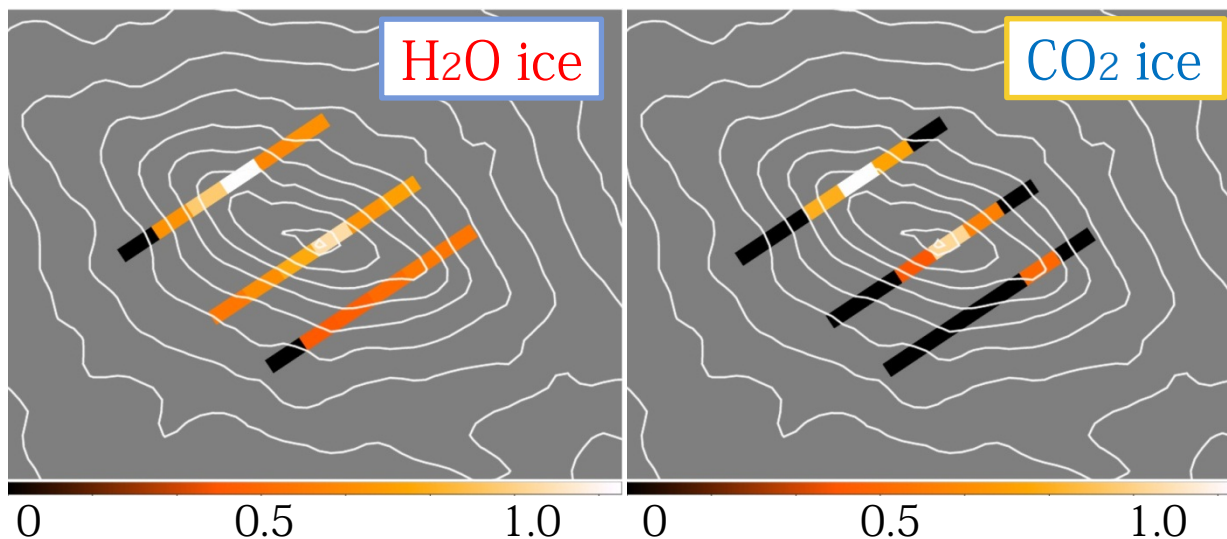


N(H₂O), N(CO₂) map

CO₂氷は中心のみで検出、氷の分布はPAHと異なる

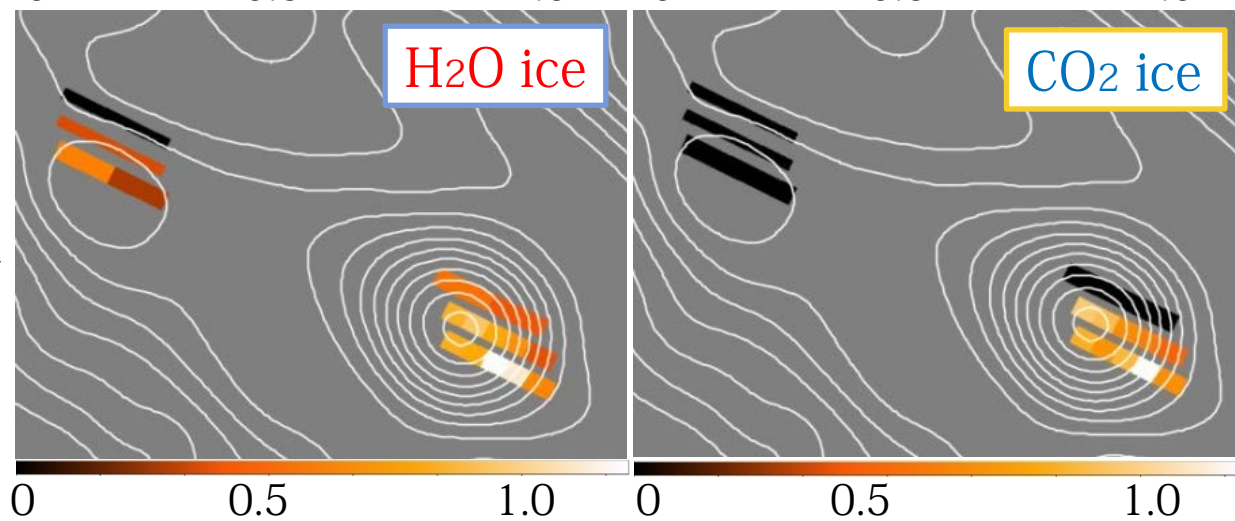
M82

コントア:
「あかり」7 μ m
→ PAH



NGC253

コントア:
「あかり」9 μ m
→ PAH

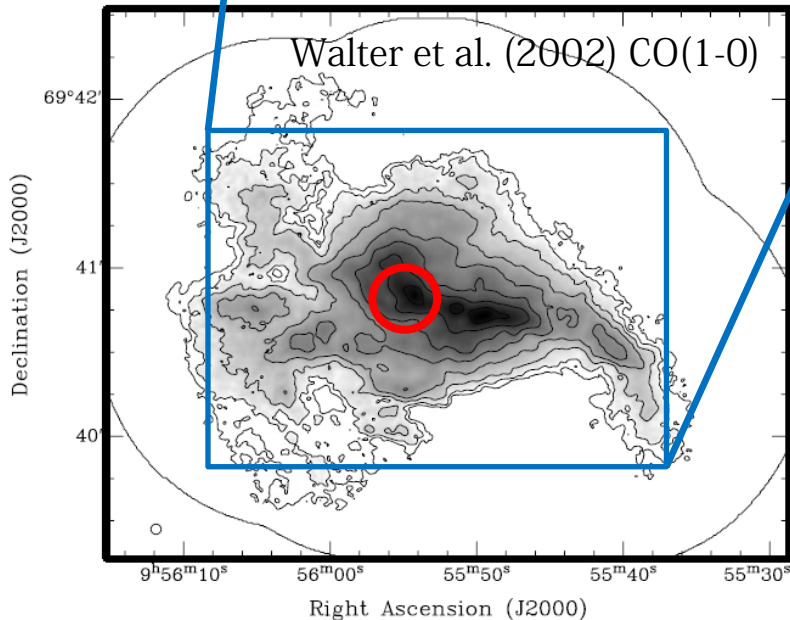
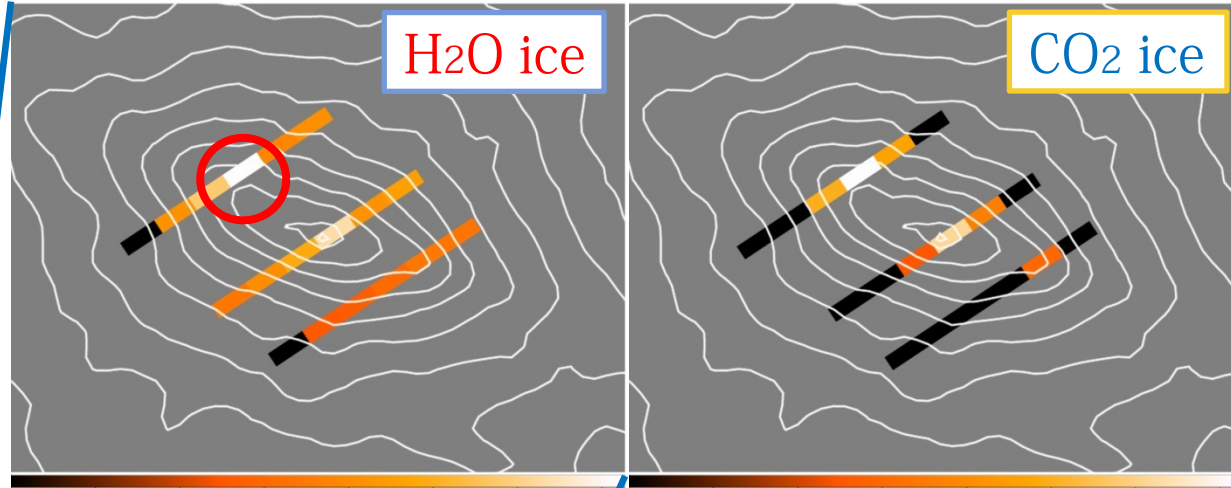


Column density (relative)

氷 - PAH - 分子ガス 分布

M82

コントア:
「あかり」7 μ m
→ PAH

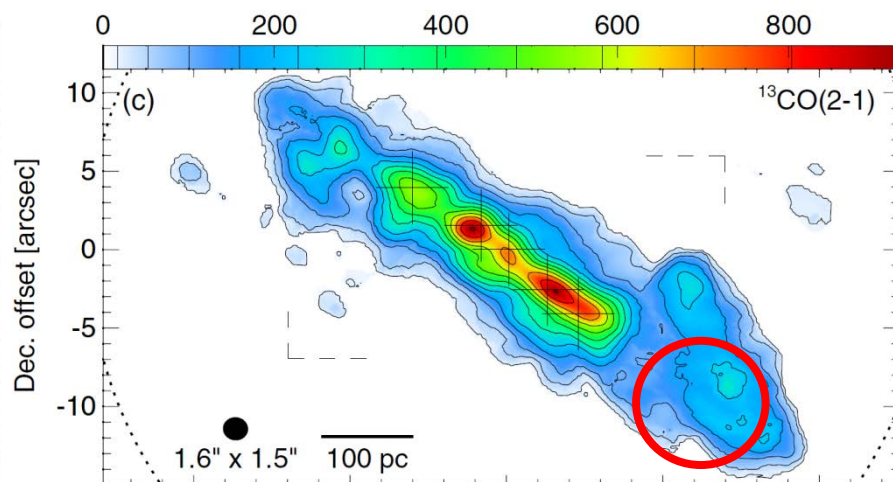
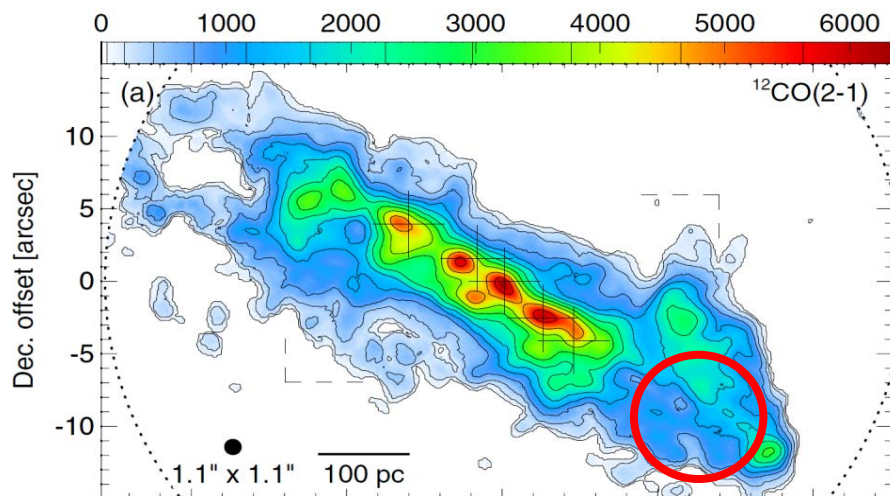
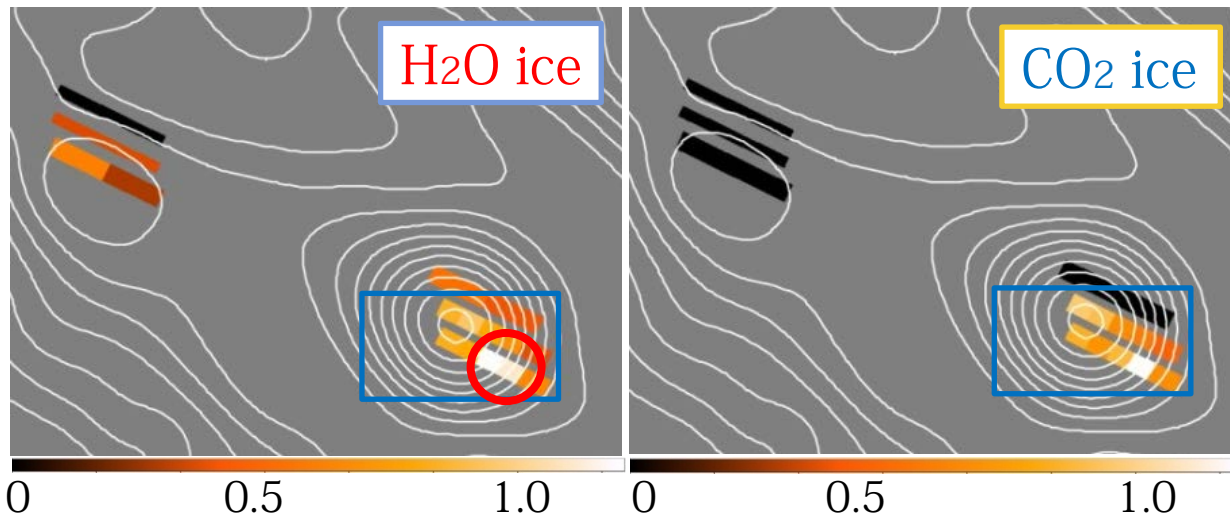


- ❑ 氷の分布は、分子ガスの分布と対応がよい
- ❑ 氷のピークは、分子雲のピークの一つに対応
- ❑ 分子雲の非対称性も再現されている

氷 - PAH - 分子ガス 分布

NGC253

コントア:
「あかり」9 μm
→ PAH

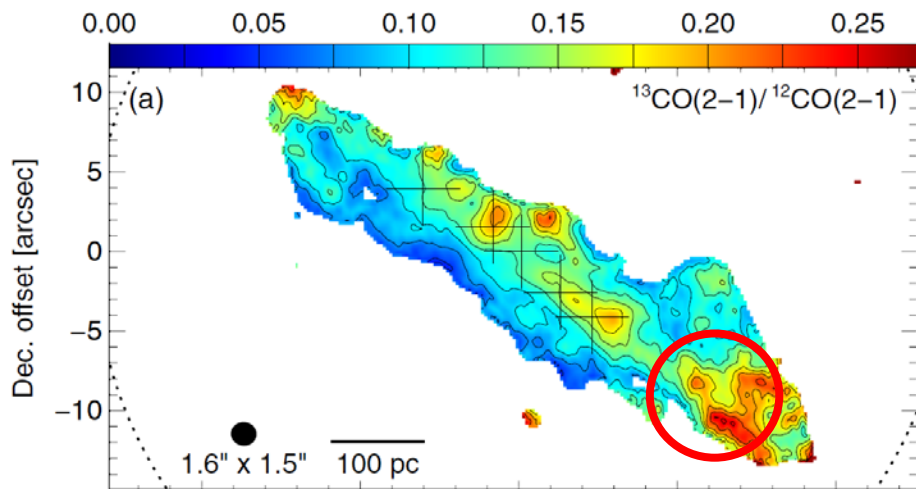
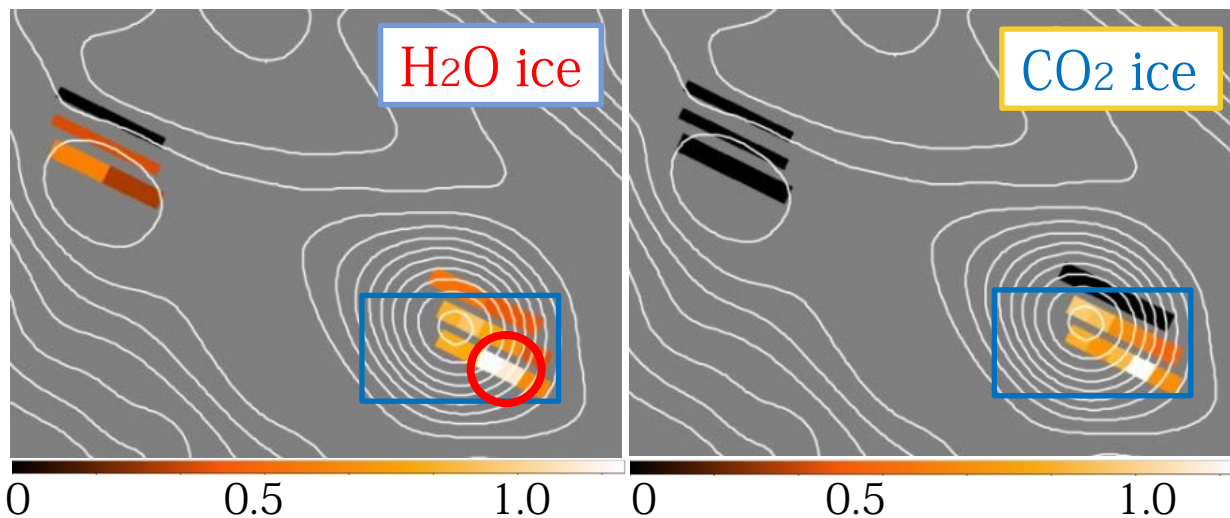


Sakamoto et al. (2011)

氷 - PAH - 分子ガス 分布

NGC253

コントア:
「あかり」9 μm
→ PAH



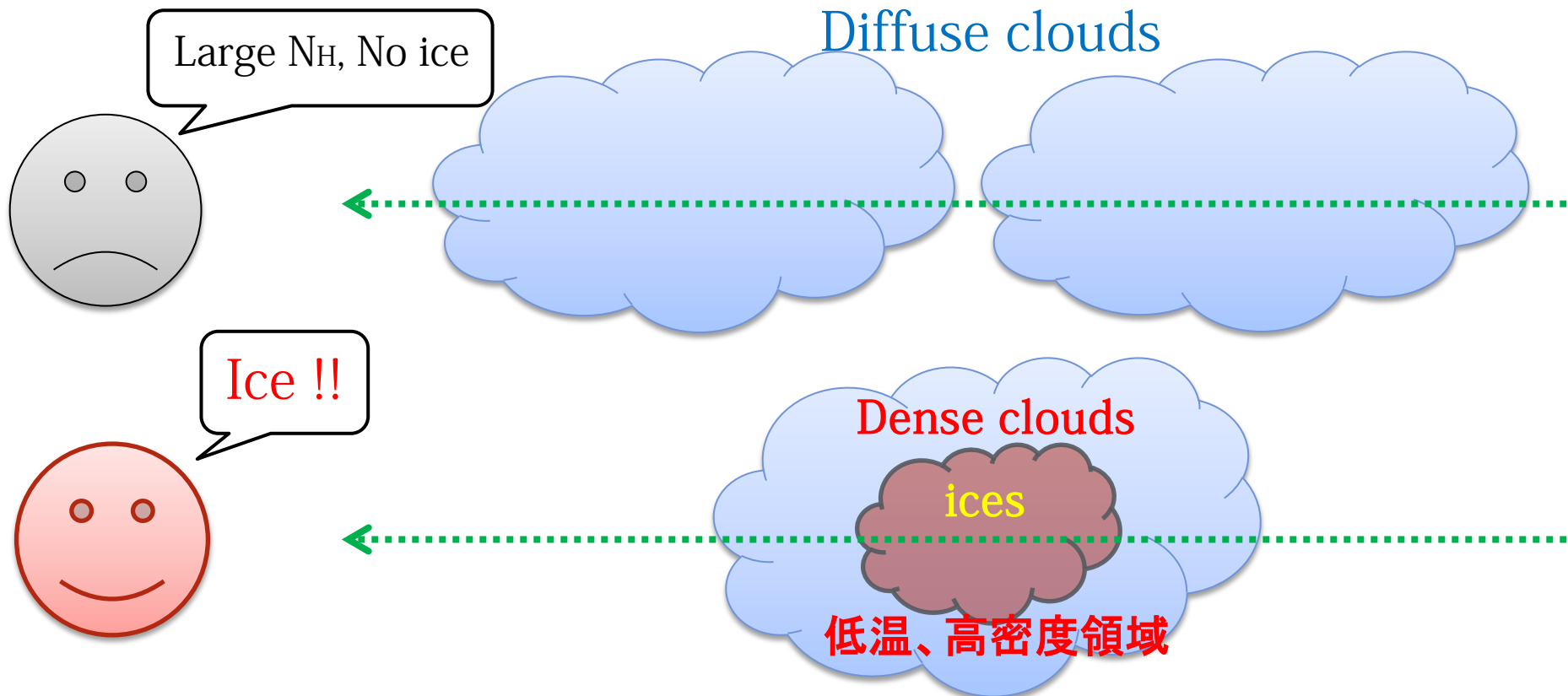
- 氷のピークに対応するクリアなCOピークなし
- $^{13}\text{CO}/^{12}\text{CO}$ 比では対応あり
- 総量としては少ないが、密度の濃いクラウドが存在

Sakamoto et al. (2011)



○ dense clouds × diffuse clouds

- 本質的なパラメータは、クラウドの柱密度ではなく、**体積密度**である



結局、氷の有無を決めるのは？

□ H_2O 氷は、濃い分子雲で多い

– PAH：PDR(光解離領域), COガス: 分子雲領域

□ CO_2 氷の生成には輻射が重要

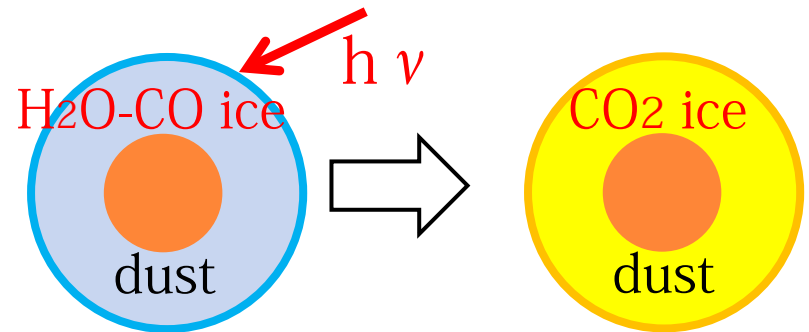
□ H_2O , CO_2 の分布の違い

→ 輻射環境の違い

□ 分子雲内部 ($A_v \gtrsim 10\text{mag}$) ではinterstellar UV photonは作用しないはず

□ Cosmic-ray起源のUV ?? $\text{H}_2 + \text{CR} \rightarrow \text{H}_2^+ + \text{e}^-$

□ 水素分子の電離度測定(HCO^+ の観測)が重要 → ALMA



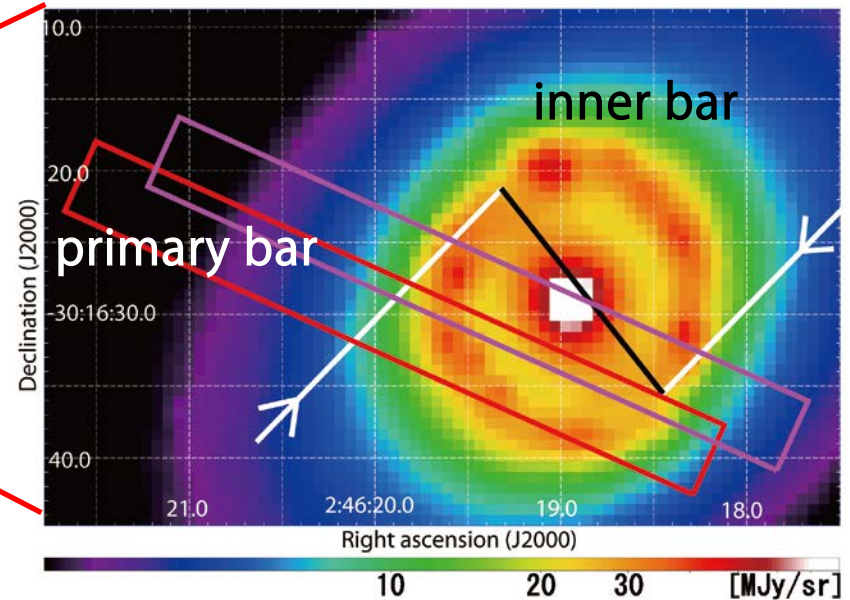
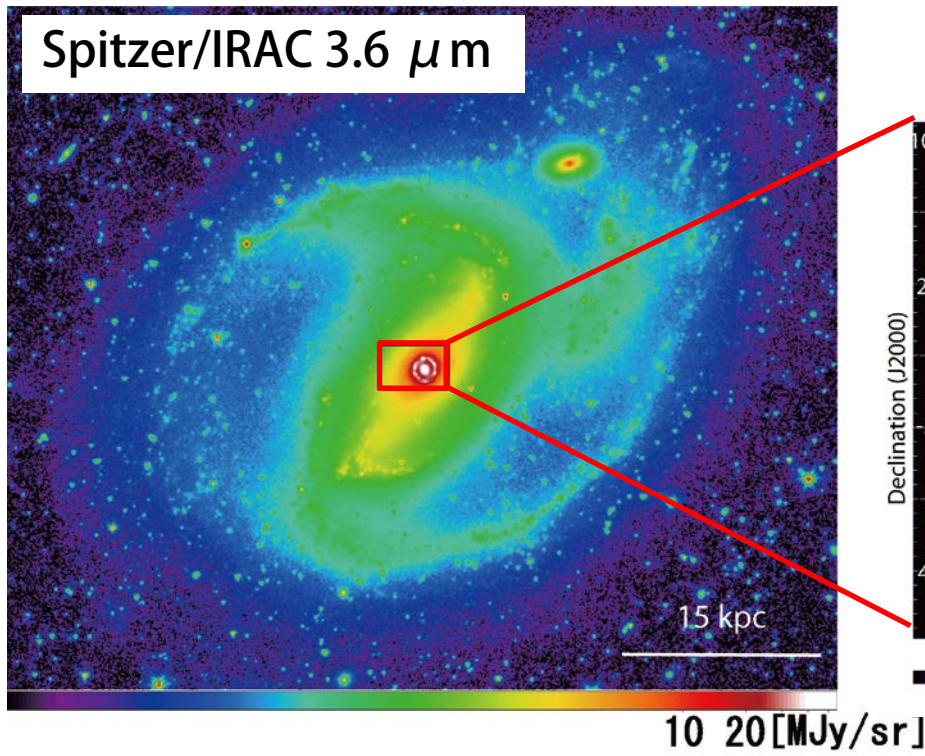
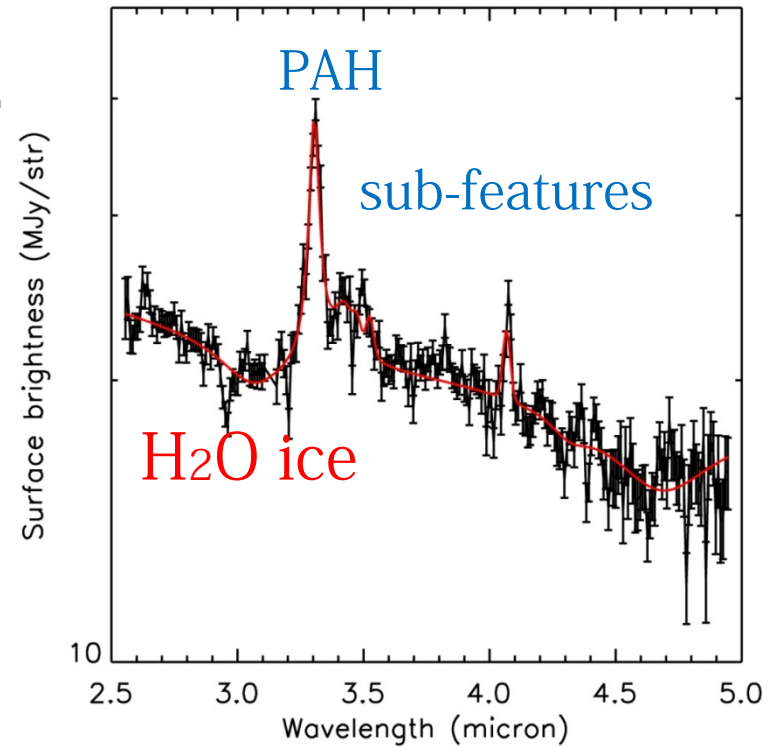
氷の有無：分子ガス密度、 CO_2 氷の生成：輻射環境



H₂O ice in NGC1097

Kondo et al. (2012)

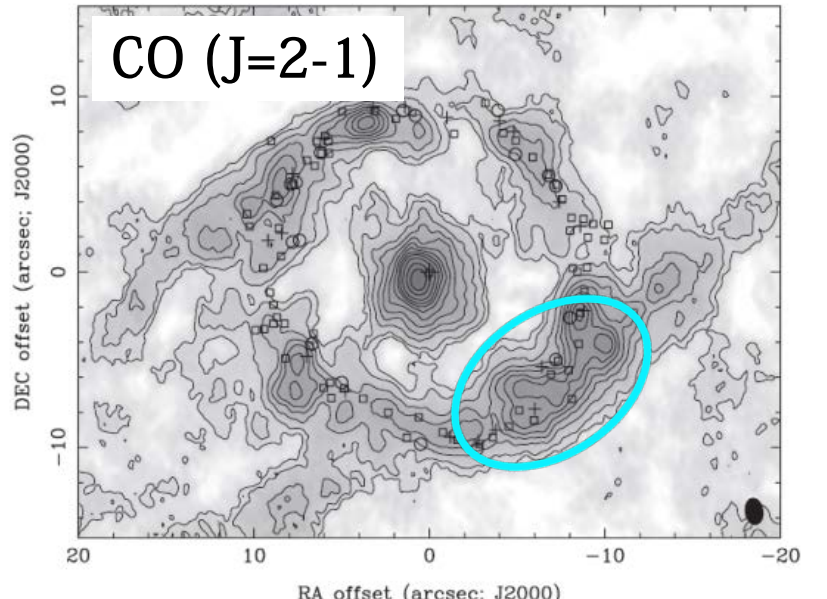
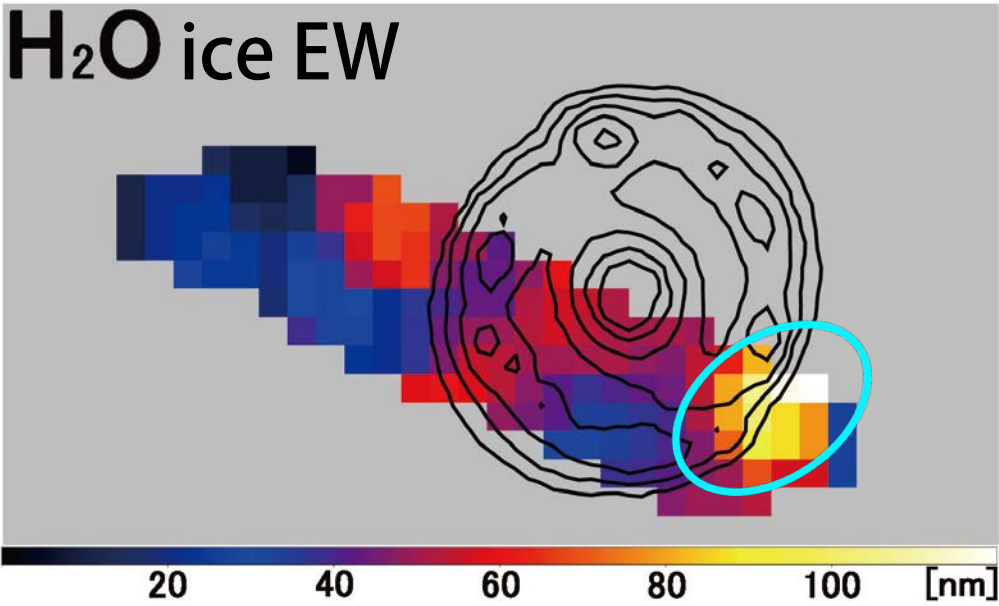
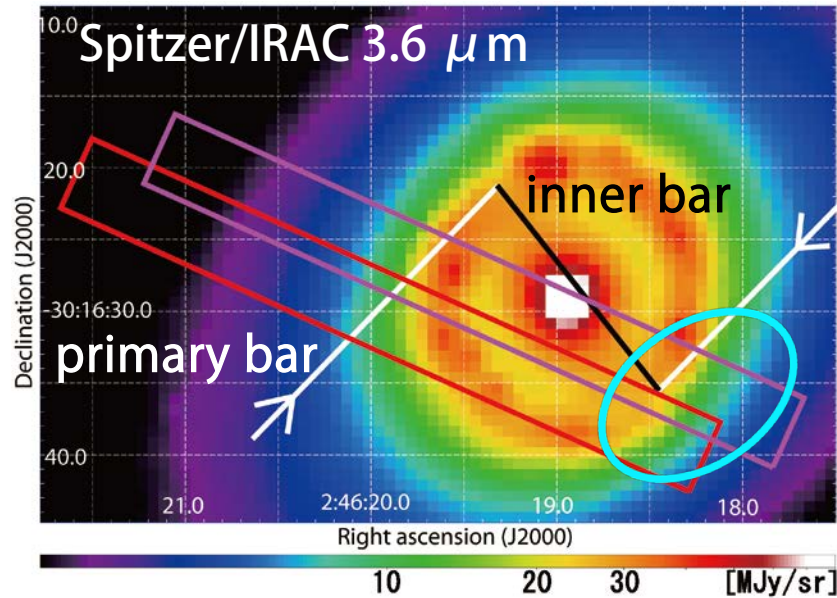
- NGC1097 has a primary bar, inner bar, and starburst ring in the galactic center.
- We create a spectral map of H₂O ice.





H₂O ice in NGC1097

- The peak of position of H₂O ice is located at the contact point of the primary bar with the ring.
 - Relatively low T_{ex} in the ring (~ 45 K)
 - High velocity dispersion (~ 100 km/s)
- Ice formation mechanism may work efficiently in the above condition.



Hsieh et al. (2011)



Summary

- 「あかり」を用いて、122銀河211領域の近赤外線分光観測を行った。
- H₂O氷による吸収を36銀河、CO₂氷による吸収を9銀河から検出した。
- 氷は晩期型銀河のみならず、従来ガスやダストが少ないと考えられている早期型銀河からも検出された。
- $N(\text{CO}_2)/N(\text{H}_2\text{O})$ (= 0.1- 0.2) は銀河系YSOに近い値を示した。
- ガス密度、輻射環境が、氷の存在量と関係している可能性がある。