

宇宙の物質を電波望遠鏡で見る！

～天文学、物理学、化学にまたがって～



College of Engineering, Nihon University

日本大学工学部（福島県郡山市） 高野秀路（たかの しゅうろ）

- 宇宙にある物質（原子・分子）
- どうやって観測するか：野辺山の45m電波望遠鏡の例
- 観測例のご紹介
- 最先端の電波観測装置「アルマ(ALMA)望遠鏡」での観測



国立天文台提供

自己紹介と研究分野の紹介

- ・ 高野秀路 (たかの しゅうろ)
- ・ 1963年 東京生まれ (その後、名古屋、東京、横浜で育つ)
- ・ 東京大学、名古屋大学、分子科学研究所 (愛知県岡崎)、ケルン大学 (ドイツ)、国立天文台 (長野県野辺山) に在籍
- ・ 研究分野: 電波天文学 主に宇宙の物質の研究

- ・ 2015年4月から日大工学部
総合教育 物理



黒く見える部分：**ガスやチリ**が後ろの星の光を遮っている

・ ガス (分子)

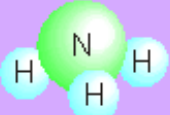
H₂ 水素分子
一番多い


CO 一酸化炭素
強い電波

宇宙に多く存在する分子と
それらの暗黒星雲での典型的な
存在量 (1 cm³あたり)

 水素分子 10000個

 一酸化炭素 1個

 アンモニア 0.0001個

 シアン化水素 0.0001個

・ チリ (塵) (よくはわかっていないが)

グラファイト (炭素質)、**シリケート** (石のかけら)

星間空間の環境： 密度、温度

• 星間雲

- diffuse clouds H原子 数 10 cm^{-3} $\sim 100 \text{ K}$
- 分子雲（暗黒星雲） H_2 （水素分子） $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ~ 10 から数 10 K

分子雲： 密度 H_2 にて 10^4 cm^{-3} 程度（超高真空！）、 10 K として、

- 平均自由行程(λ)、平均速度(\bar{v})、と衝突の時間間隔(t)

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} \quad \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad t = \frac{\lambda}{\bar{v}} \propto \frac{\sqrt{m}}{d^2}$$

d: 分子の直径
n: 密度
m: 分子の質量

H_2 $2 \times 10^6 \text{ km}$, $3 \times 10^2 \text{ m/s}$, 80 日

- 3体反応は重要ではない。
- 発熱反応が進む。

反応の開始

- 宇宙線によるイオン化

- 宇宙線として H^+ (proton), He^+ が飛び回っている。

- H , H_2 をイオン化

- 低温かつ紫外線が入れない分子雲内部での主要な電離源

- かつ化学反応のエネルギー源

- 具体的には:

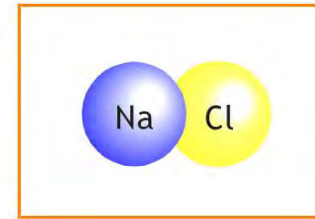
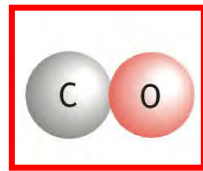
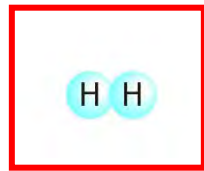
$H_2 \rightarrow H_2^+ + e$ 生成した H_2^+ は、周囲に多く存在する H_2 と反応

$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$ H_3^+ が生成(三角の形)

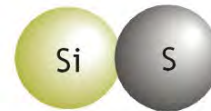
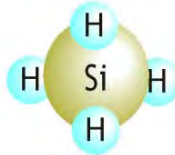
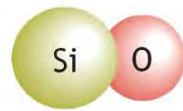
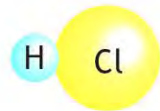
H_3^+ は、他の分子と反応を起こす。

$CO + H_3^+ \rightarrow HCO^+ + H_2$ (イオン・分子反応: 比較的速い)

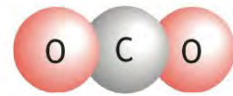
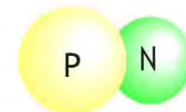
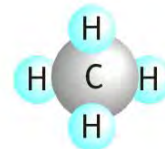
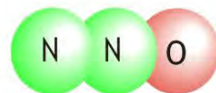
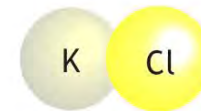
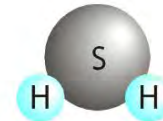
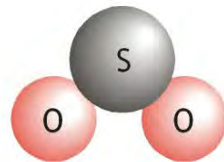
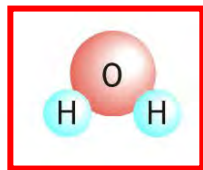
沢山の種類のガスが見つかった



塩

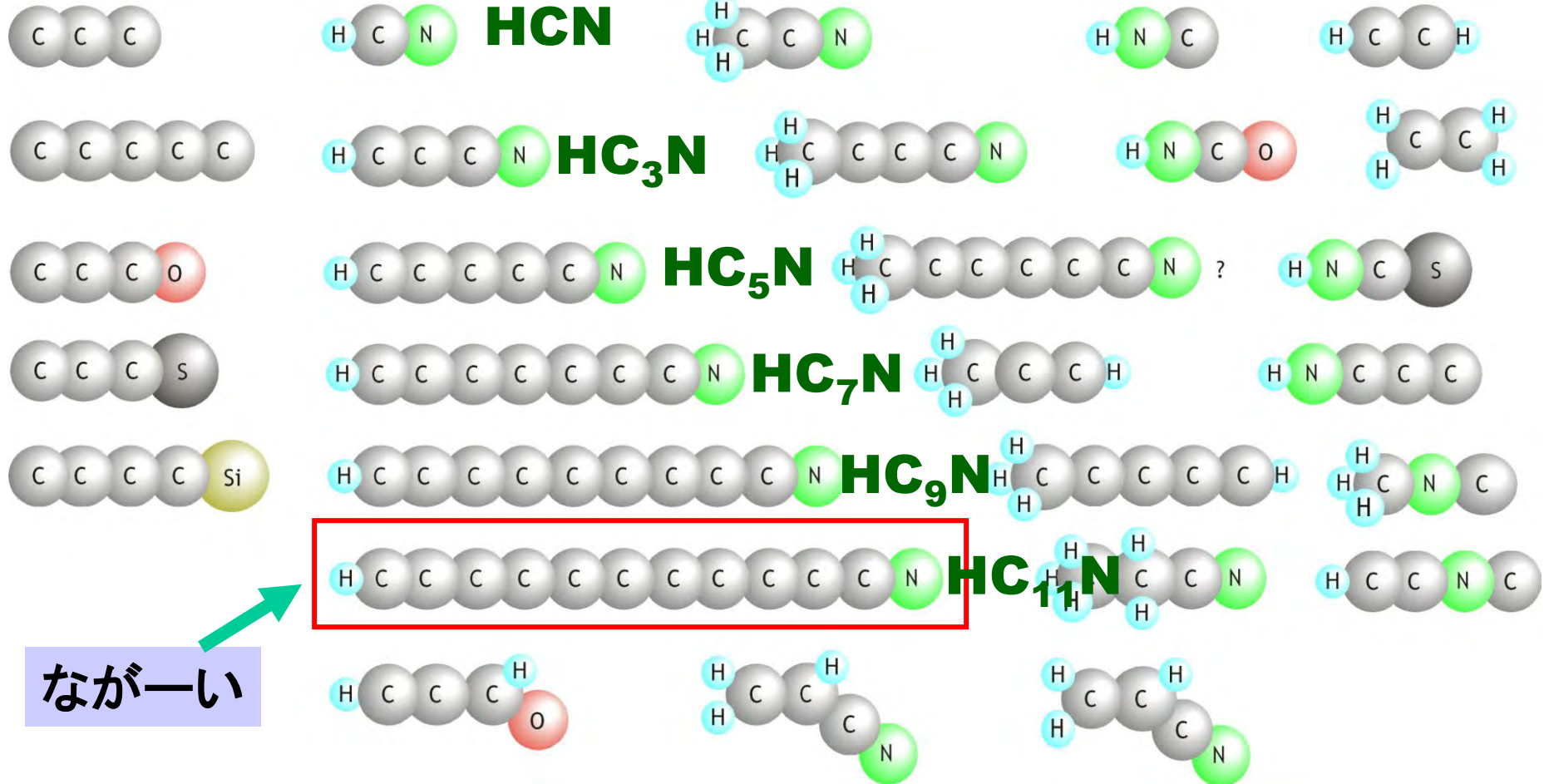


水



沢山の種類のガスが見つかった

シアノポリイン



宇宙の分子など

- 宇宙空間には所々にガスや塵が濃い場所（水素分子数 $\geq 10^4$ 個/cm³）
 - 分子雲や暗黒星雲
- そのような場所では、原子から分子が生成
さらに、重力収縮して星が形成
- 主に電波望遠鏡を用いた観測
 - 銀河系で約260種類の分子（星間分子）が発見
- 地上でも見られるH₂、CO、CO₂、H₂O、NH₃などに加え、ラジカルやイオンが多い
- 「理科年表」に星間分子のリストがある。

宇宙の物質研究(星間化学)の意義、魅力

- 天体物理の観点
 - 分子がスペクトル線を持つのは、主に電波領域
 - 電波天文学でガスを調べる際に、主に分子を通して調べる
 - 必ず化学反応が関係する。星間化学の知識がないと、解釈が難しいことも。
- 化学の観点
 - 宇宙空間という極限的な環境(極低温 ~ 10 K、極低圧、数十万年にも及ぶタイムスケール)での反応の研究
 - 地球上での化学反応とは異なる(宇宙的規模で)より一般的な物質の振る舞いが、明らかに。
 - 分子分光学、反応素過程、理論計算、などに新領域を触発

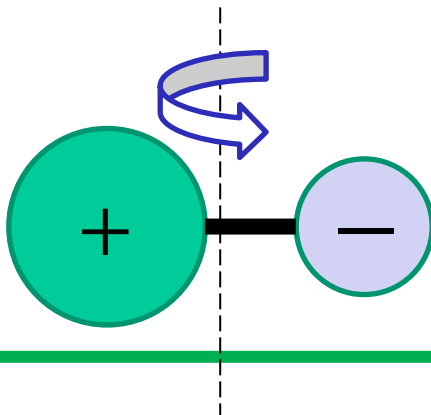
宇宙の物質研究(星間化学)の意義、魅力

- 生物学の観点
 - astrobiologyの発展の基礎としての宇宙の物質
(2015年4月 自然科学研究機構アストロバイオロジーセンター設立)
 - アミノ酸、核酸などの分子、その前駆体などの探査が行われている。
- 非常に学際的な分野
- 色々な分野の方が、専門を生かして研究

電波を出す仕組み

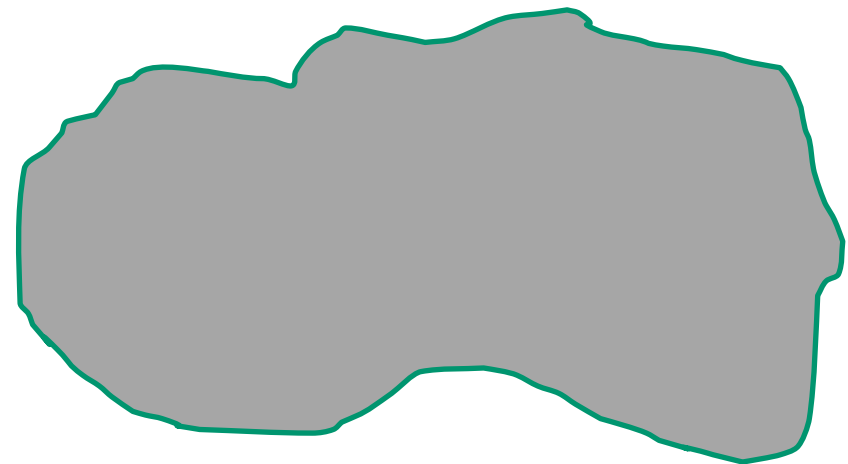
• 分子

- 電氣的に偏りがある場合
- それが**回転**することで、電波が発生
- 特定の周波数：**スペクトル線**
(→ 周波数の精度が高い)



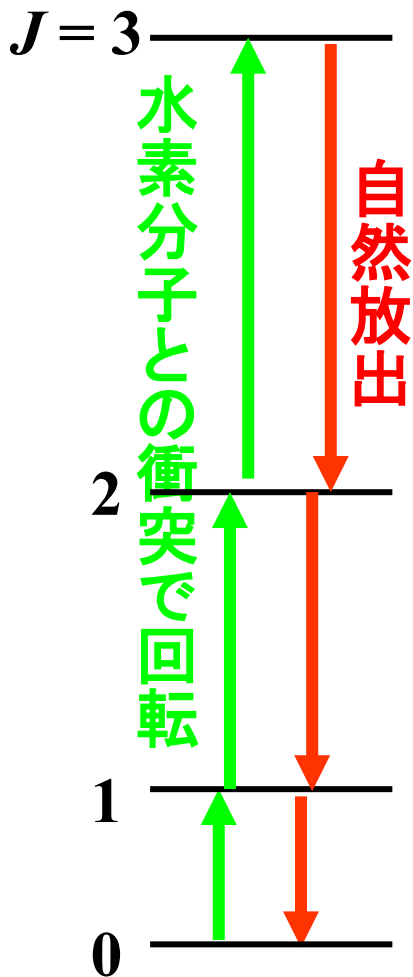
• チリ(塵)

どんな物体でも、その温度に対応した電磁波を出す(黒体放射: 特定の周波数ではなく、広い周波数にわたる放射:**連続波**)。



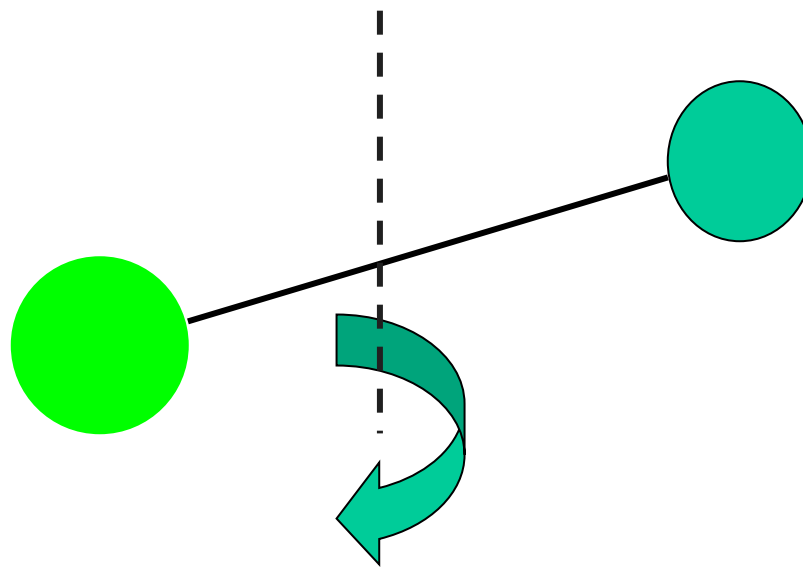
分子の回転（飛び飛びのエネルギー）

回転エネルギー準位



$$\Delta E = h\nu$$

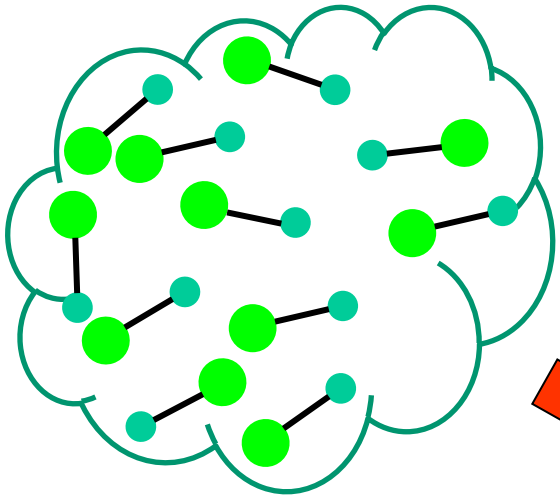
電波



回転は一般に低エネルギーであり、容易に起こる

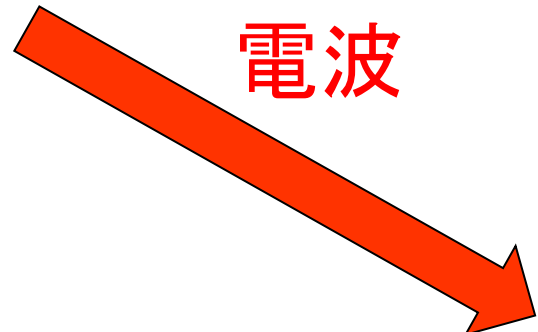
例) CO $J=1-0$ 115.271 GHz = 5.53 K

どのように観測？ → 電波望遠鏡にて

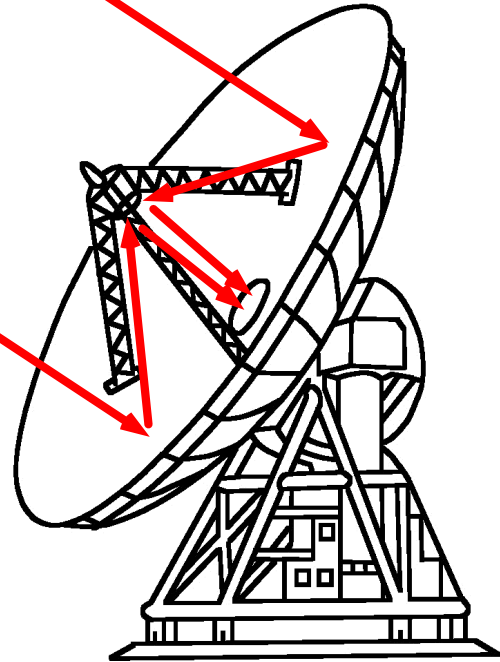


分子雲

電波



電波望遠鏡



受信機



電波分光計



スペクトル

国立天文台提供

例： 野辺山の電波観測所

- ・ 八ヶ岳のふもと 野辺山高原： 標高1300m
- ・ 冬は寒く(最低 -20°C !!)、乾燥、広い土地
- ・ 1982年 観測を開始



アンテナ

八ヶ岳

野辺山 宇宙電波 観測所

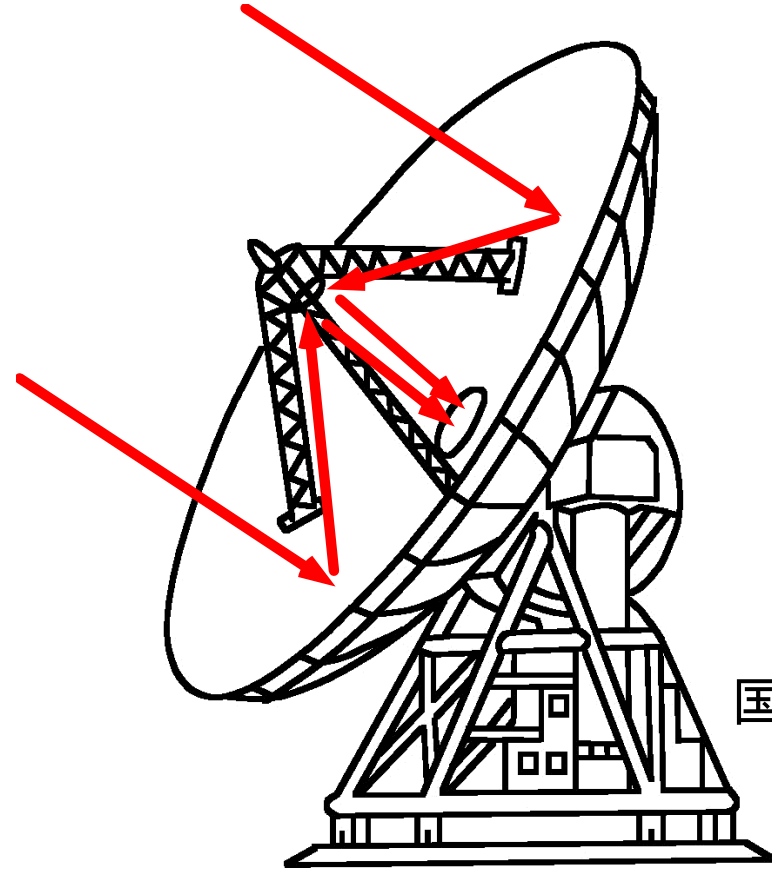
- 直径45m 電波望遠鏡
大きなパラボラアンテナで電波を集める

内部への
電波の入口



直径45m 電波望遠鏡の仕組み

- 宇宙からきた電波は、**赤い矢印**のように反射し、中へ入る。
- 中には、すごくいいラジオがある（受信機）。
- このラジオで音を聞くわけではなく、**電波を電気にかえる**。
- それを**コンピューターに入れ**、電波の強さをグラフや画像にする。
→ **観測者が電波を認識！**



国立天文台提供

電波での観測の特徴

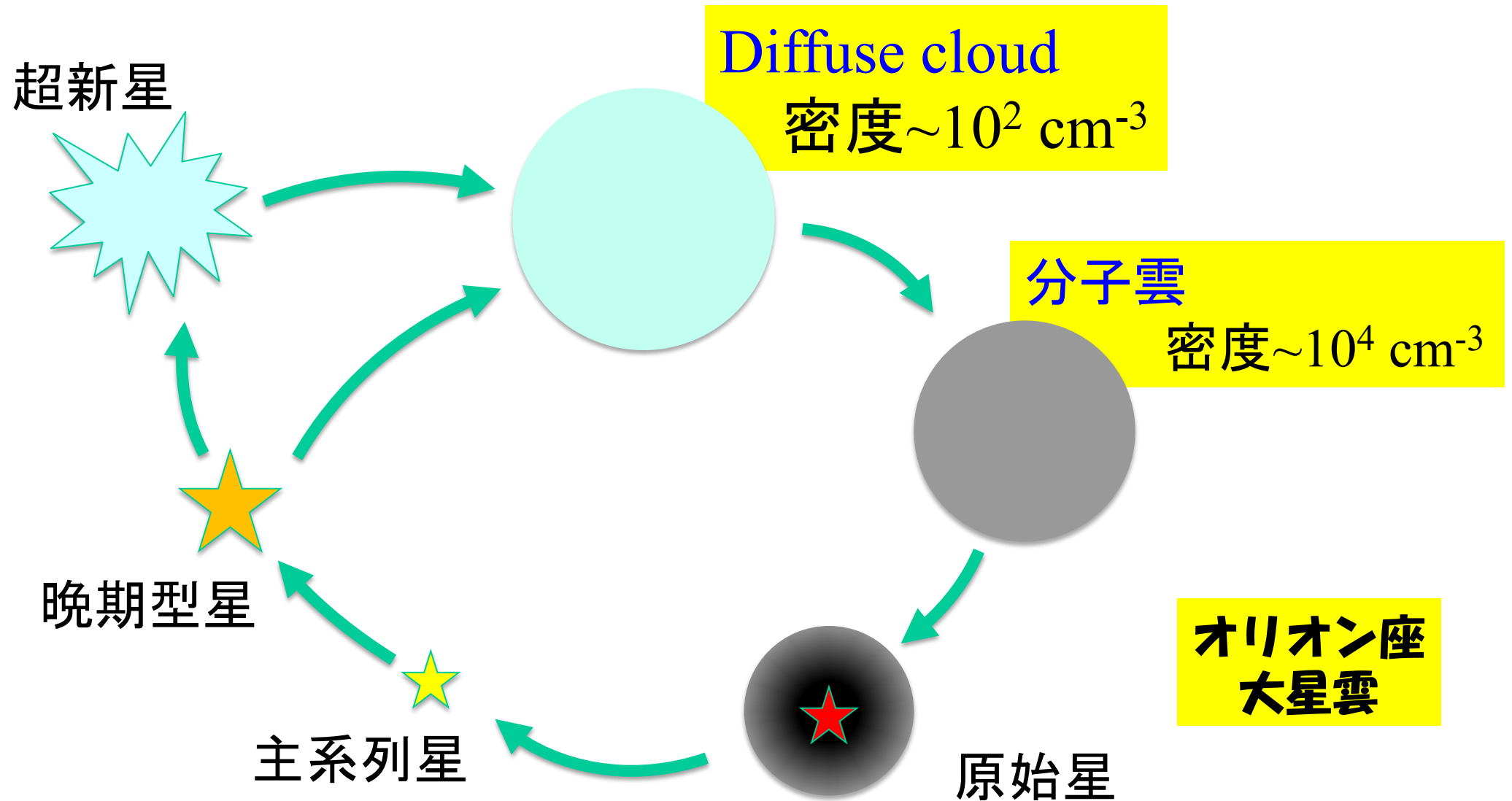
- 電波望遠鏡には**目でのぞくところがありません！**
- 太陽の光にじゃまされないので、**昼間でも観測ができます！曇っていてもかなり観測できます。**
- ただ、一番いい季節は、やはり**空気が澄んでいる冬**です。

電波と光の違い

色々な手段での観測で、より良くわかる

	望遠鏡の例	波長	エネルギー	天体の温度	具体的な天体は？
電波		長い	低い	低温のことが多い	ガス、チリ (分子雲)
光		短い	高い	高温	星

星間物質の輪廻



オリオン座の場合

- オリオン座

可視光の写真



COの電波の強度
分布を重ねたもの



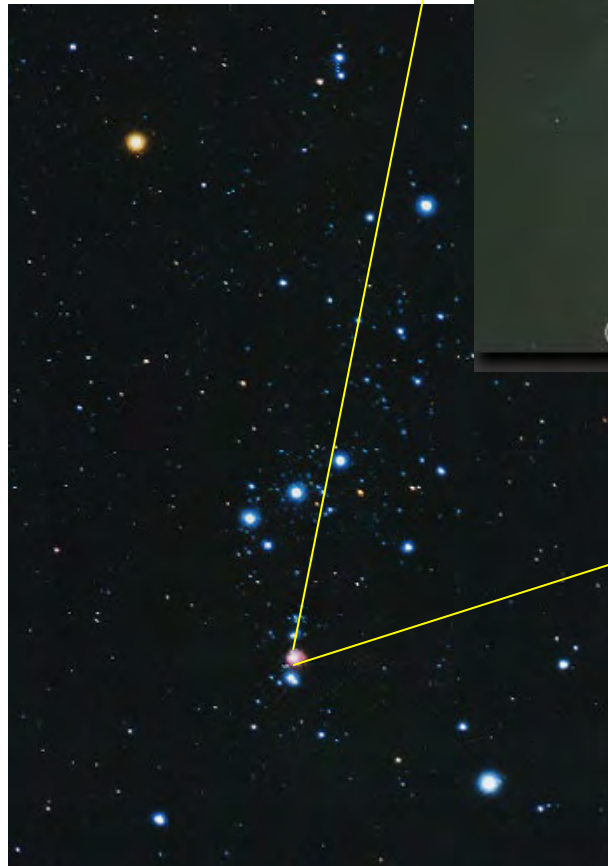
野辺山
Web page
より

オリオン座の場合

- オリオン座
可視光の写真



強度
のもの



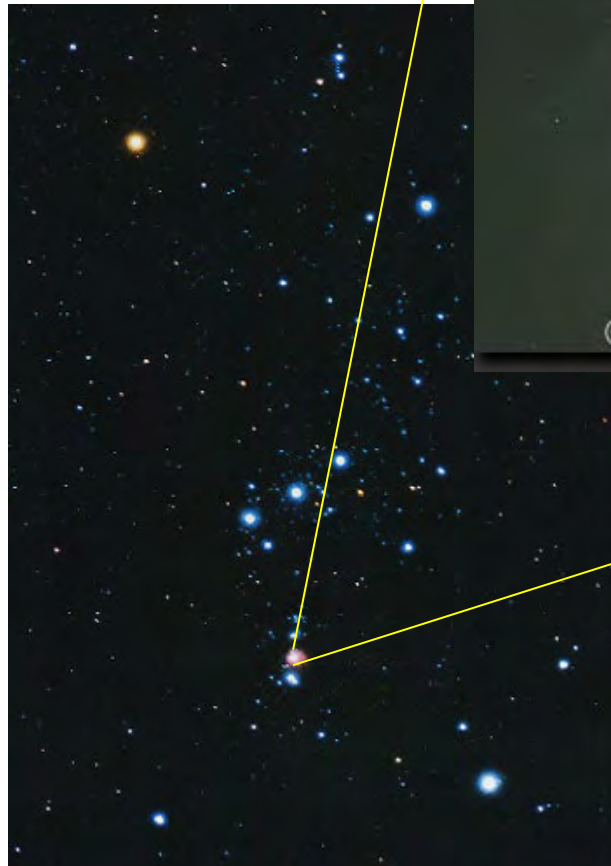
野辺山
Web page
より



オリオン座の場合

- オリオン座

可視光の写真

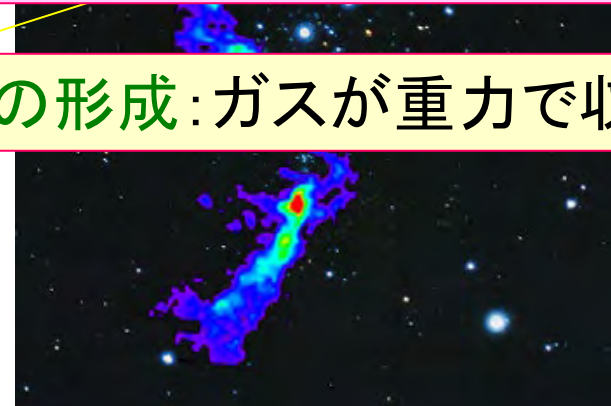


強度
もの

電波観測: 可視光で見えない
ガスの量、組成、(運動も)が
わかる!

星の形成: ガスが重力で収縮

野辺山
Web page
より



観測例のご紹介： 野辺山で私が関係したものの

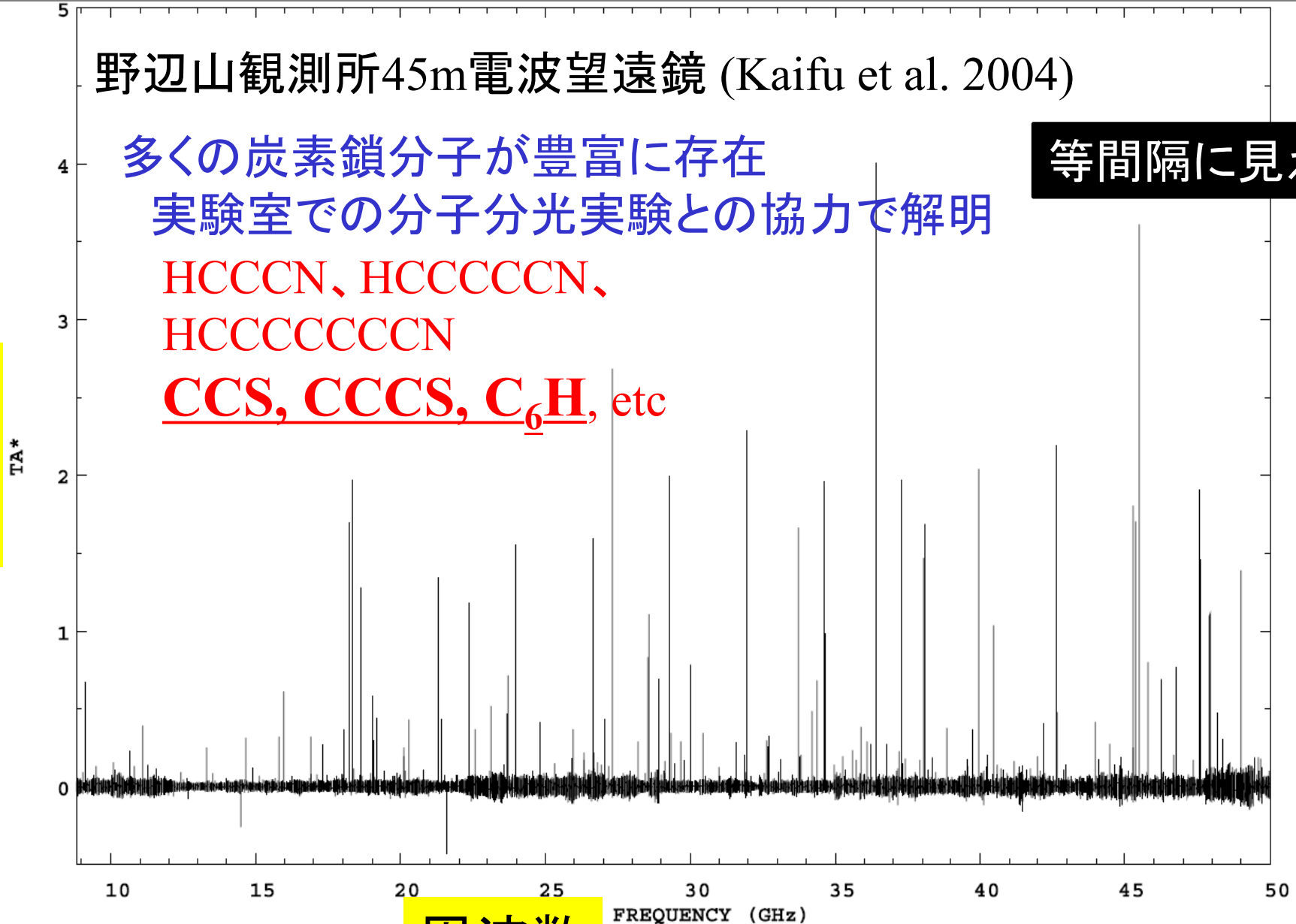
●おうし座の暗黒星雲TMC-1での分子の観測

- 多くの分子が観測される（星はまだ生まれていない）
- 炭素が連なった分子（炭素鎖分子）の観測とその生成反応

●私達の銀河系の外にある銀河（系外銀河）での分子の観測

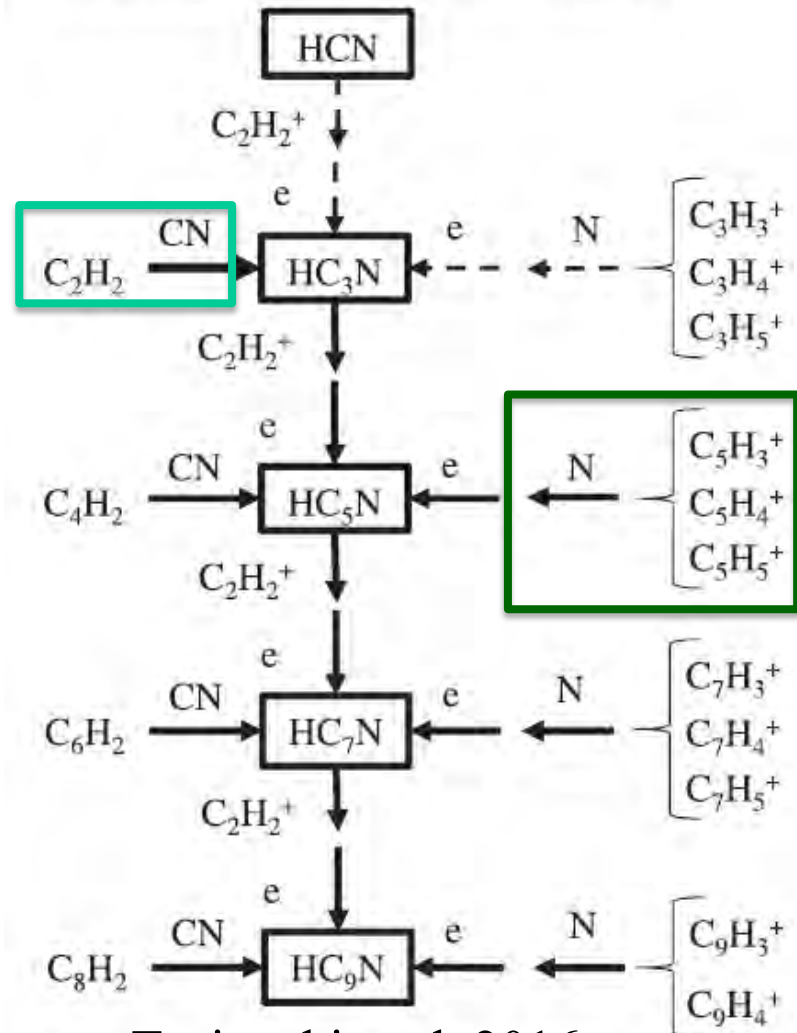
おうし座の暗黒星雲TMC-1におけるスペクトル線サーベイ

電波強度



炭素鎖分子(星間分子の約40%)の生成を観測的に調べる シアノポリイン HC_3N , HC_5N , HC_7N , ...

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 817:147 (7pp), 2016 February 1



Taniguchi et al. 2016

- HC_3N : ^{13}C 同位体種を観測し、同位体の影響を見つけた (TMC-1, Takano et al. 1998)



- HC_5N : ^{13}C 同位体種を観測したが、同位体の影響はあまりなかった (TMC-1, Taniguchi et al. 2016)

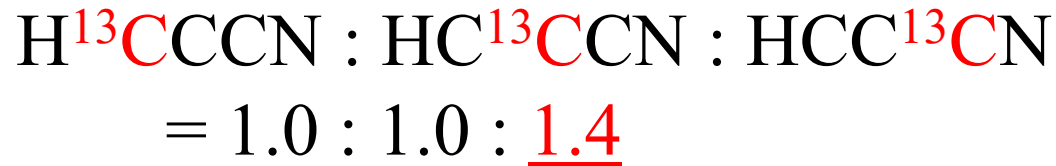
→ 環状の炭素からなる分子を基に生成か

→ 予想していなかった多様性が見つかった

炭素鎖分子の生成

Cyanopolyynes HC_3N , HC_5N , HC_7N , HC_9N ,...

- HC_3N : ^{13}C 同位体種を観測し、同位体の影響を見つけた (TMC-1, Takano et al. 1998)

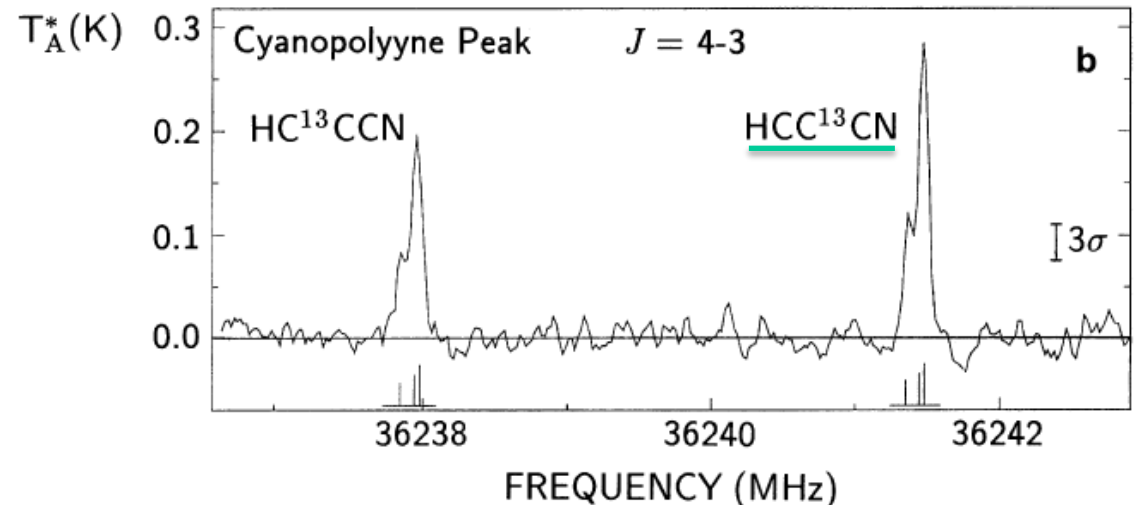
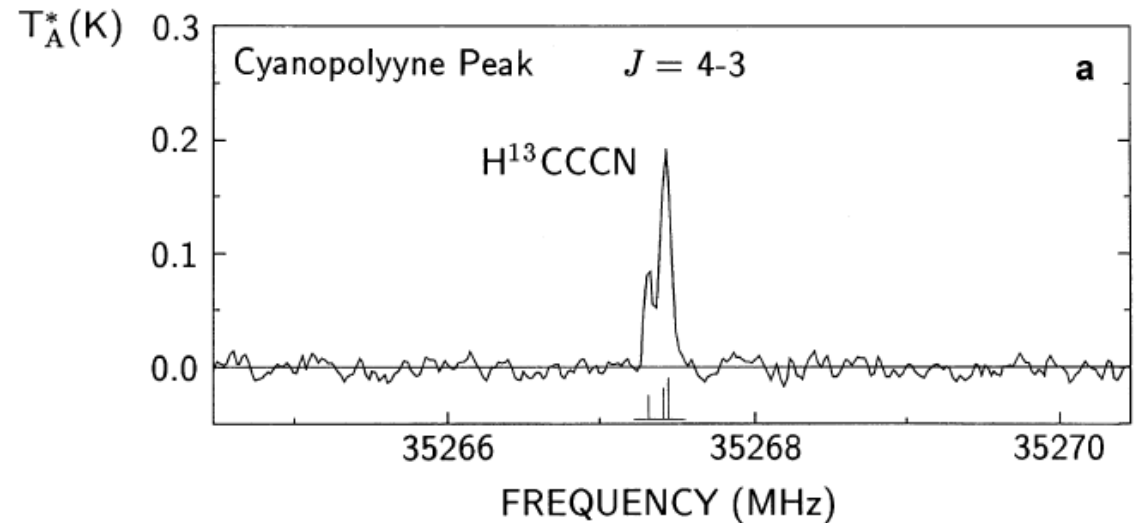


→ NのとなりのCは、起源が異なることが判明！

→ $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{CN}$!!

- さらに長い HC_5N は？

→ おそらく、 C_2H_2 での延長と推測されていた



炭素鎖分子の生成

Cyanopolyynes HC_3N , HC_5N , HC_7N , HC_9N , ...

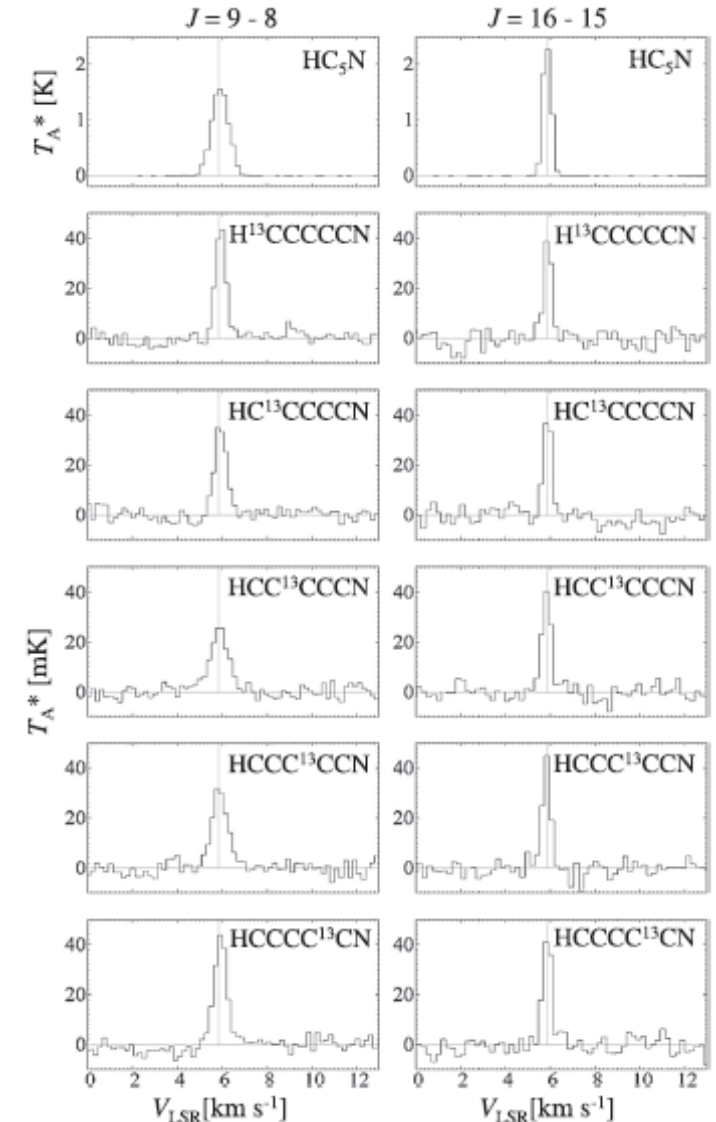
- HC_5N : ^{13}C 同位体種を観測したが、同位体の影響はあまりなかった (TMC-1, Taniguchi et al. 2016)

$\text{H}^{13}\text{C}\text{CCCCN}$: $\text{HC}^{13}\text{CCCCN}$: $\text{HCC}^{13}\text{CCCN}$:
 $\text{HCCC}^{13}\text{CCN}$: $\text{HCCCC}^{13}\text{CN}$

= 1.00 : 0.97 : 1.03 : 1.05 : 1.16 (± 0.19) (1σ)

→ C_2H_2 での延長は、**主な生成反応**
ではない!

→ **環状の炭素からなる分子を基に生成か**



炭素鎖分子の生成

Cyanopolyynes HC_3N , HC_5N , HC_7N , HC_9N , ...

- HC_5N : ^{13}C 同位体種を観測したが、同位体の影響はあまりなかった (TMC-1, Taniguchi et al. 2016)



= 1.00 : 0.97 : 1.03

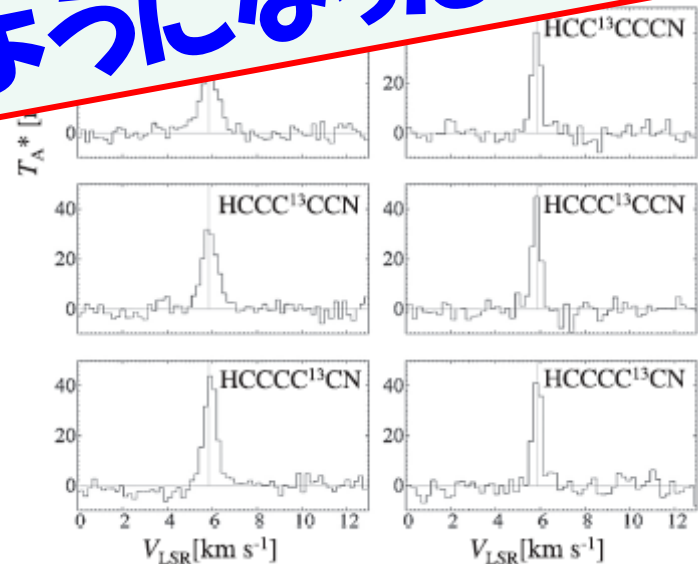
→ C_2H_2 での延長

ではない!

→ 環状の炭素からなる分子を基に生成か



同位体を使った化学反応の研究は、
地上でも行われているが、
宇宙でも出来るようになった!



観測例のご紹介： 野辺山で私が関係したものの

●おうし座の暗黒星雲TMC-1における観測

- ・ 多くの分子が観測される暗黒星雲（星はまだ生まれていない）
- ・ 炭素が連なった分子（炭素鎖分子）の観測とその生成反応

●私達の銀河系の外にある銀河（系外銀河）での分子の観測

系外銀河の魅力的な点: 宇宙物質の観点

様々な環境での物質

- 温度及び密度の様々な環境: 中心核、棒状構造、腕、腕の間
- 強い放射場: 紫外線やX線
- 重元素量の違い
- 銀河どうしの衝突
- 遠方銀河 (宇宙初期、低い重元素量)

ビッグバンから生命までの壮大な物質進化の一翼を担う。

観測天体 3つの近傍銀河

活動的な中心核を持つ

(AGN = Active Galactic Nucleus)

NGC 1068



大質量の星が大量に形成している銀河 (爆発的星形成銀河)

NGC 253, IC 342



このような特徴的な銀河での環境は？

NGC 1068: X線が強い

NGC 253, IC 342: 紫外線が強い

NGC 253

観測された(原子と)分子

NGC 1068 19 種

cyclic-C₃H₂(new), H¹³CN(new), SiO, C₂H(new), HNCO, HCN, HCO⁺, HNC, HC₃N, N₂H⁺, CH₃OH, CS, SO, ¹³CN, C¹⁸O, ¹³CO, CH₃CN, C¹⁷O?, CN, ¹²CO

NGC 253 24 種

cyclic-C₃H₂, CH₃CCH, H¹³CN, H¹³CO⁺, SiO, C₂H, HNCO, HCN, HCO⁺, HNC, HC₃N, N₂H⁺, CH₃OH, C³⁴S, CS, H, SO, ¹³CN, C¹⁸O, ¹³CO, CH₃CN, C¹⁷O, CN, ¹²CO

IC 342 22 種

cyclic-C₃H₂(new), CH₃CCH, H¹³CN, H¹³CO⁺, SiO, C₂H, HNCO, HCN, HCO⁺, HNC, HC₃N, N₂H⁺, C³⁴S, CH₃OH, CS, SO(new), C¹⁸O, ¹³CO, CH₃CN, C¹⁷O(new), CN, ¹²CO

わかったこと

- 銀河によって、多い分子、少ない分子がある

NGC 1068 (活動的銀河中心核を持つ) にお

- 他の銀河より強いスペクトル線

HCN, H¹³CN, CN, ¹³CN, HC₃N

また、関連して

HCN / HCO⁺比が大きい

- 一方, CH₃CCHは未検出

反応過程は不明

爆発的星形成銀河では検出

- 爆発的星形成を調べる手段となる

これまで、このよ
うな傾向は知ら
れていた。

45m望遠鏡で詳
しく調べた。

星間物質の研究
者にも、なじみが
ない分子。分子の
観測で、銀河の性
質がわかる！！

銀河の観測のまとめ

- 3銀河(NGC 1068, NGC 253, IC342)で
分子スペクトル線の網羅的観測を実行
- 85-116 GHz帯
- 19-24種の分子(と水素原子)を観測
- 活動的銀河中心核(AGN), 爆発的星形成での特徴
を確認, 追加
 - AGNを調べる良い手段: HCN, CN, HCN / HCO⁺比
 - 爆発的星形成を調べる良い手段: CH₃CCH

分子の観測で,
銀河の性質が
わかる!!

近年の大きな発展：^{アルマ}ALMA望遠鏡

- 尽きることのない研究者の要求

より遠くを！

より細かく！

より色々な電波を！

- ALMA (アルマ)

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array

スペイン語で [魂] という意味

近年の発展: ALMA望遠鏡

- ・ 千りのアンデス山中5000mの砂漠

建設地



近年の発展: ALMA

- ・ 北米、ヨーロッパ、日本を含む東アジアの国際協力
- ・ 直径12mのアンテナを54台 + 7mのを12台
- ・ 2013年3月13日開所式(運用中)



最大で18 kmの範囲にアンテナを設置

アルマ望遠鏡の 中心部分



Credit: X-CAM / ALMA

観測例のご紹介： ALMAで私が関係したものの

- ALMAでは、銀河系内、銀河系外を問わず、**画期的な成果が多数**でている！！
 - 国立天文台のALMAのホームページもご参照ください
- 今回、野辺山45m電波望遠鏡での私達の観測の発展をご紹介します
 - やはり天体は 銀河**NGC 1068**！

観測天体 活動的な近傍銀河 NGC 1068



可視光での画像(Hubble Space Telescope 2.5' x 1.9')

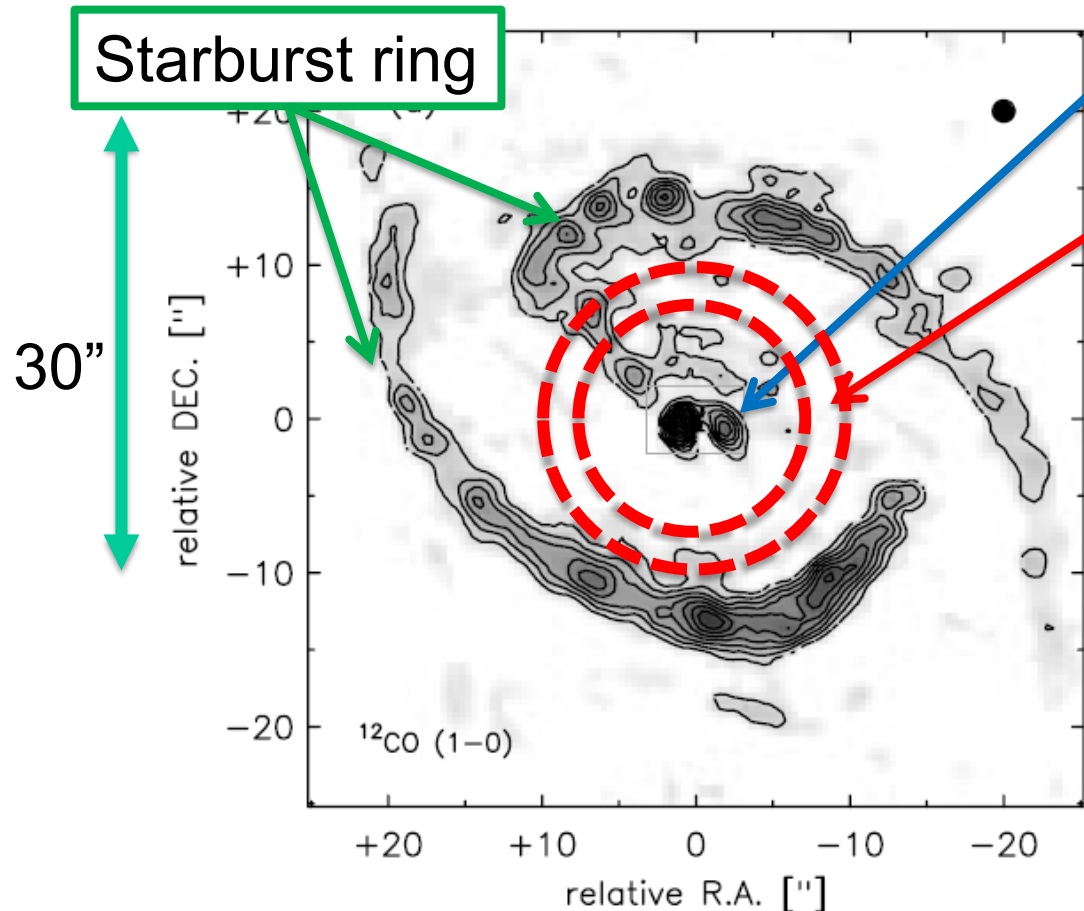
Credit: NASA, ESA & A. van der Hoeven

→AGNやSBは珍しくない現象
→ 分子組成、反応への影響
は？ 良いプローブ分子は？

- 距離4500万光年
- **中心部** 巨大ブラックホールによる活動性で有名
 - **X線**などを放射する「活動的な中心核」
Active Galactic Nucleus (以下 **AGN**)
 - 「中心核付近のガス」
Circumnuclear Disk (以下 **CND**)
- **その周囲のリング状**の部分
 - 重い星が形成し、**紫外線**を放射する「爆発的星形成」領域
Starburst (以下 **SB**) ring

NGC 1068の構造

- ^{12}CO 1-0 (Shinnerer et al. 2000) IRAM電波干渉計: 空間分解能 $1.4''$



中心部 (AGN, CND): 2つのピーク(knots)

45m 望遠鏡の空間分解能 (15~19秒角)

- 45m望遠鏡
 - 中心部を観測
 - 構造は分解できない

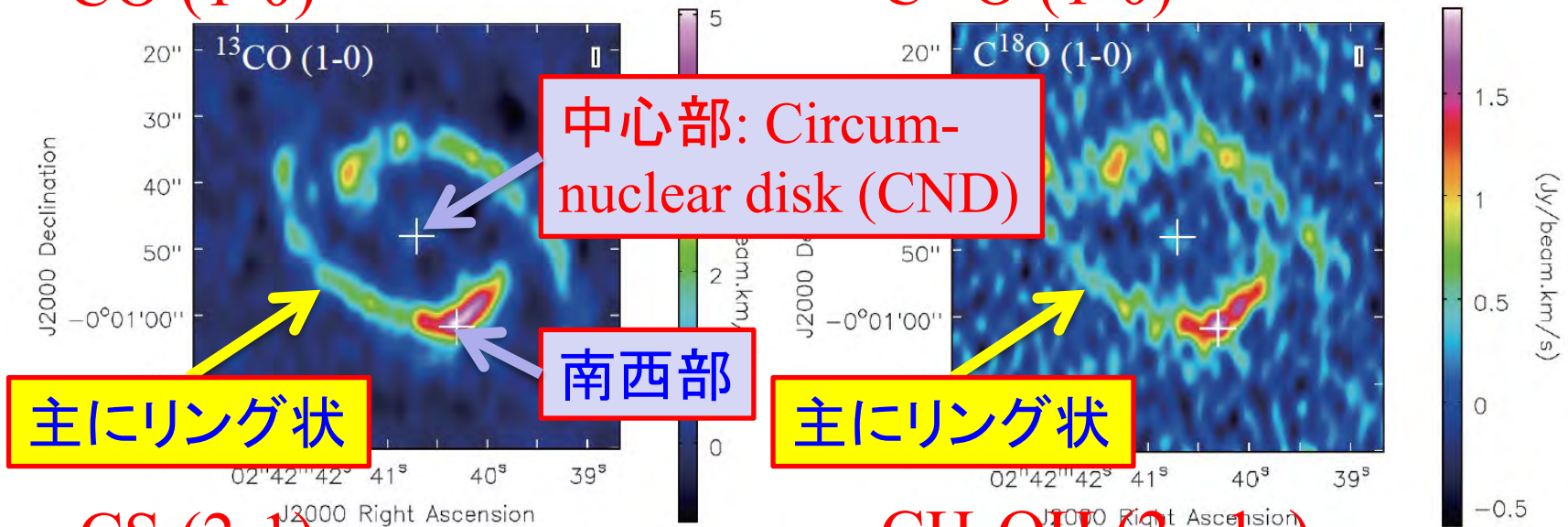
- **ALMA**
 - 空間分解能が良い: < 5 秒角
 - 構造を分解できる

NGC 1068での各分子の分布

Takano et al. 2014

^{13}CO (1-0)

C^{18}O (1-0)



主にリング状

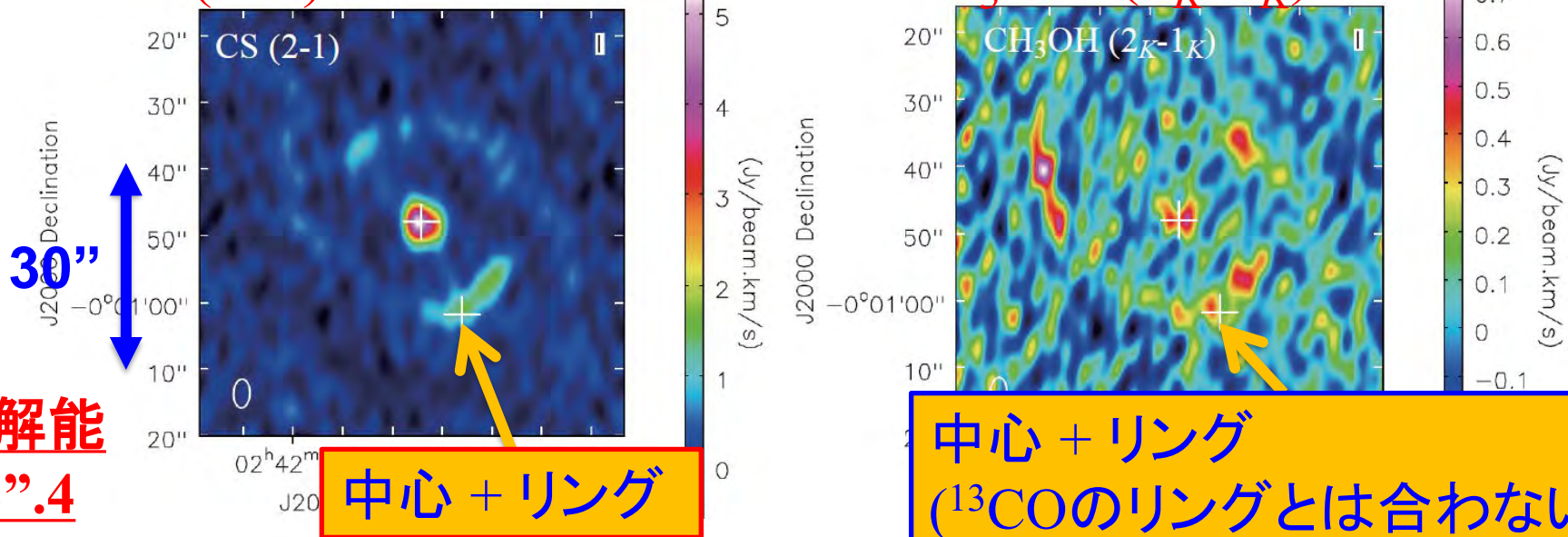
中心部: Circum-nuclear disk (CND)

南西部

主にリング状

CS (2-1)

CH_3OH (2_K-1_K)



30''

空間分解能
 $4''.2 \times 2''.4$

中心 + リング

中心 + リング
(^{13}CO のリングとは合わない)

NGC 1068での各分子の分布

Takano et al. 2014

^{13}CO (1-0)

C^{18}O (1-0)



中心部: Circum-nuclear disk (CND)

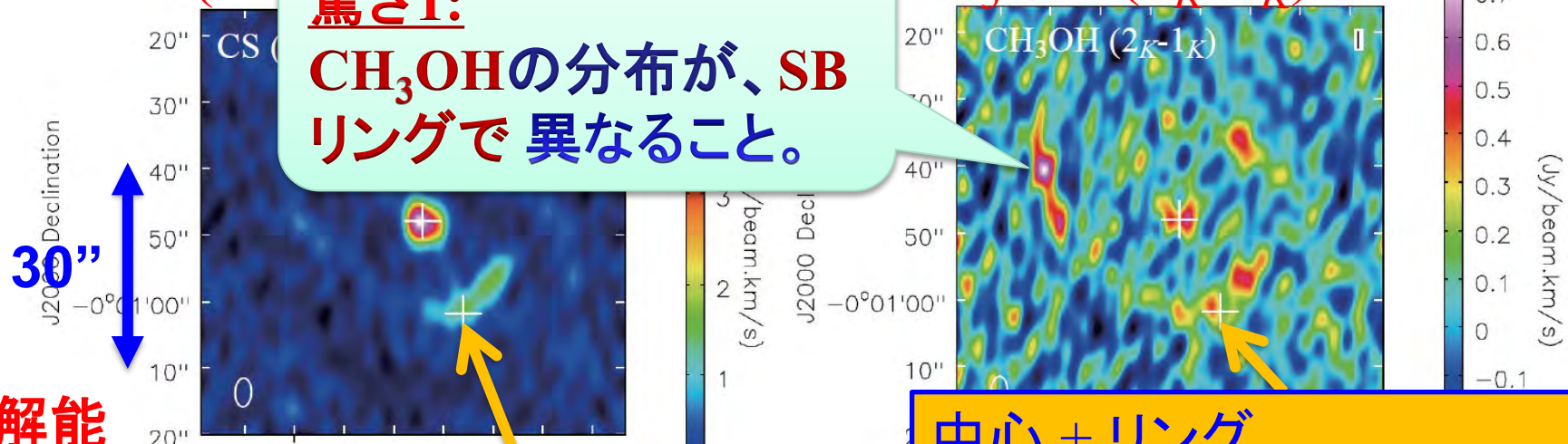
南西部

主にリング状

主にリング状

CS (2-1)

CH_3OH (2_K-1_K)



驚き1:
 CH_3OH の分布が、SB
リングで異なること。

30''

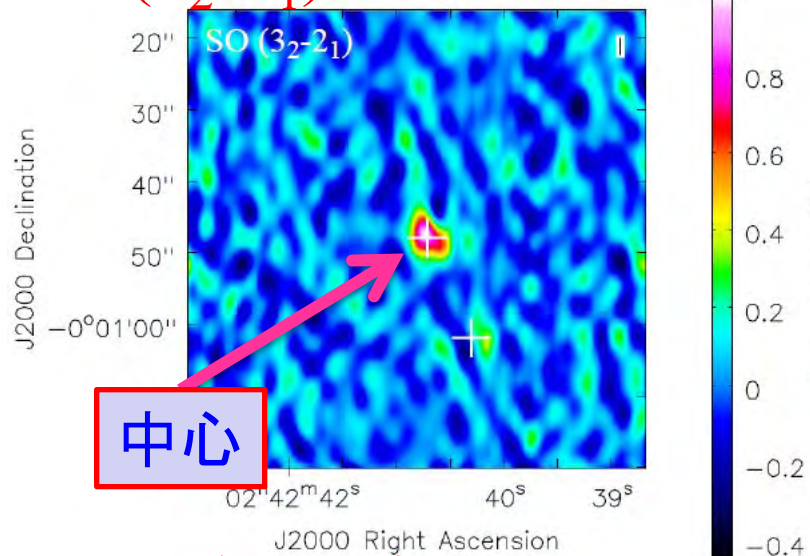
中心 + リング

中心 + リング
(^{13}CO のリングとは合わない)

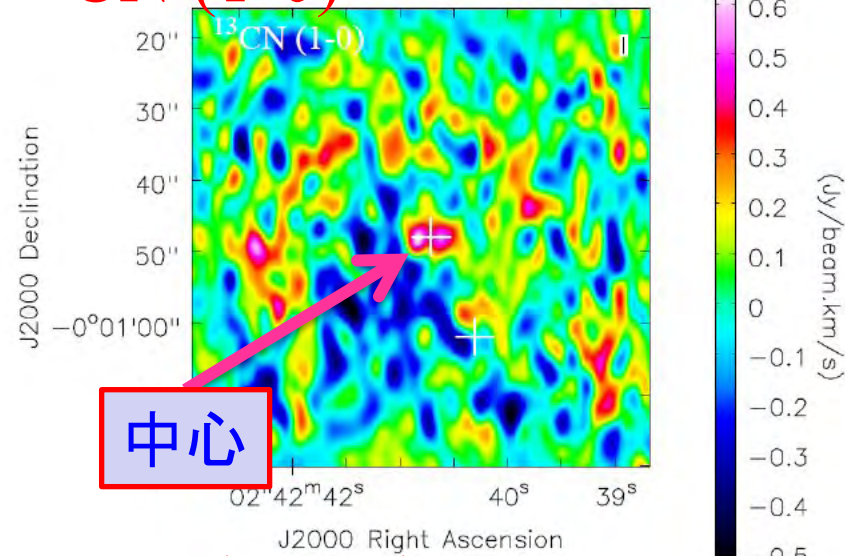
空間分解能
 $4''.2 \times 2''.4$

各分子の分布： 主に中心に分布(*First images*)

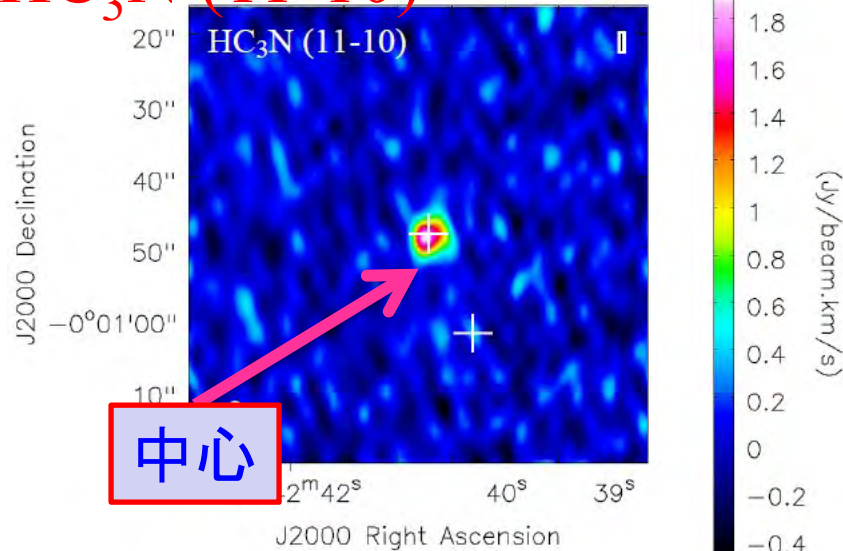
SO (3_2-2_1)



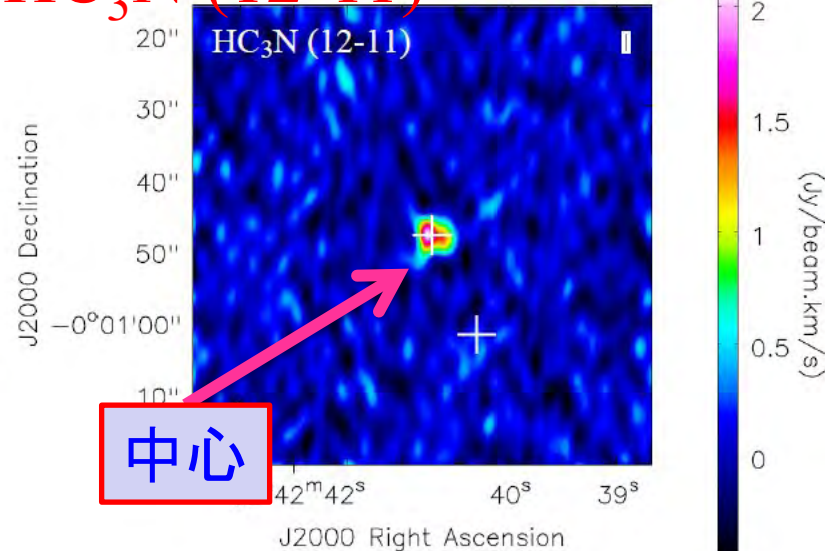
^{13}CN (1-0)



HC₃N (11-10)

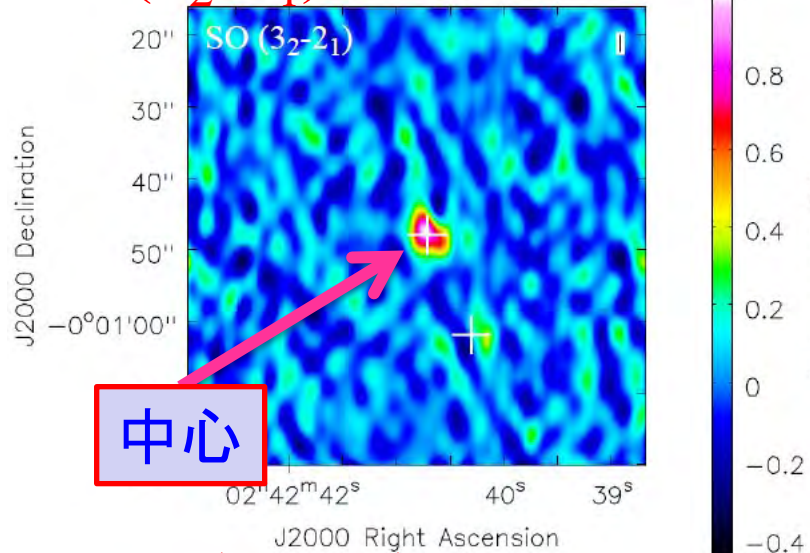


HC₃N (12-11)

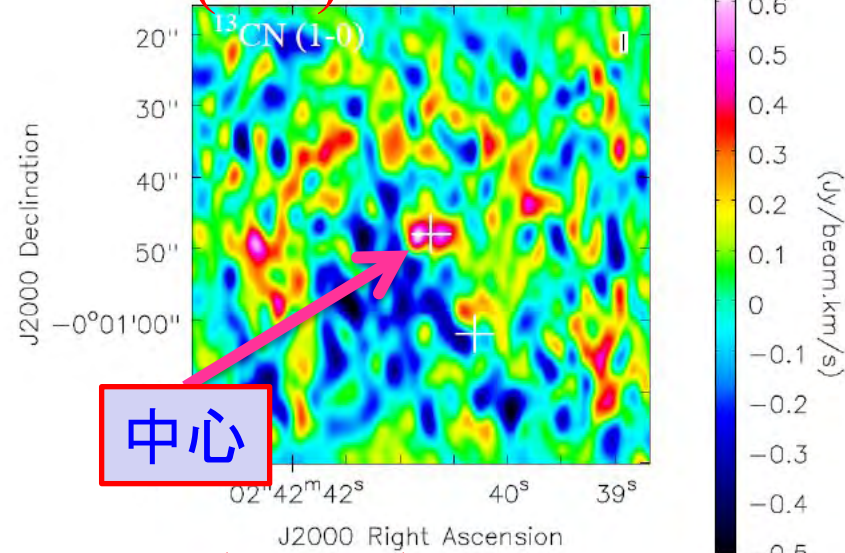


各分子の分布： 主に中心に分布(*First images*)

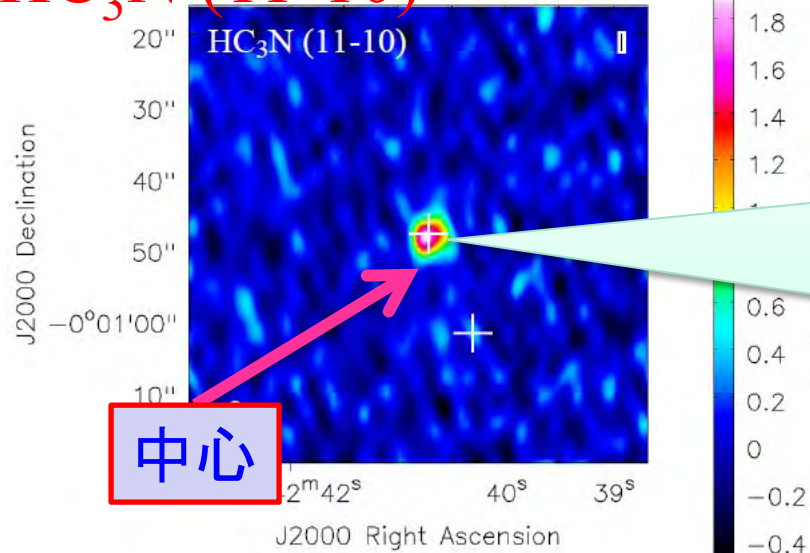
SO (3_2-2_1)



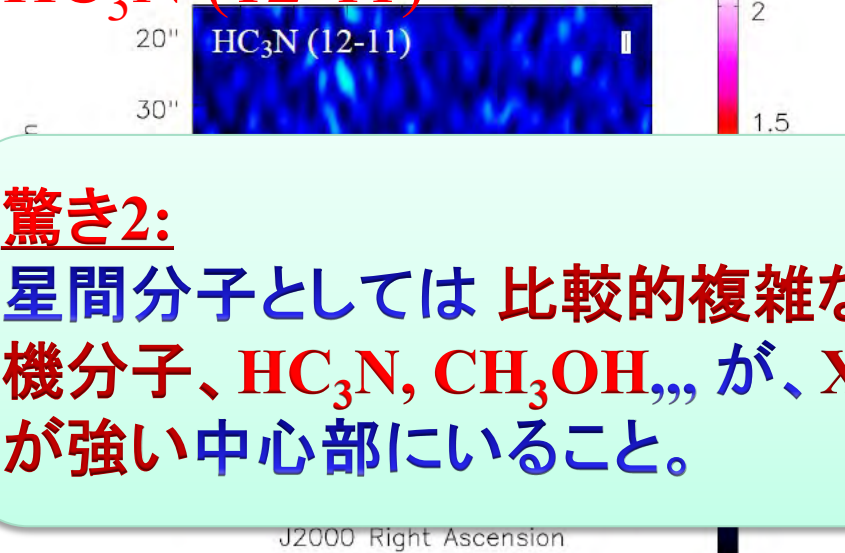
^{13}CN (1-0)



HC₃N (11-10)



HC₃N (12-11)

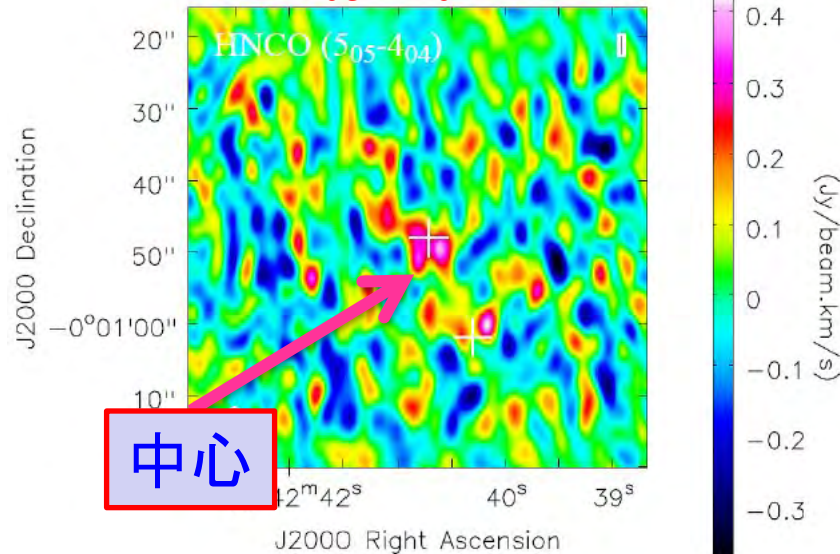


驚き2:

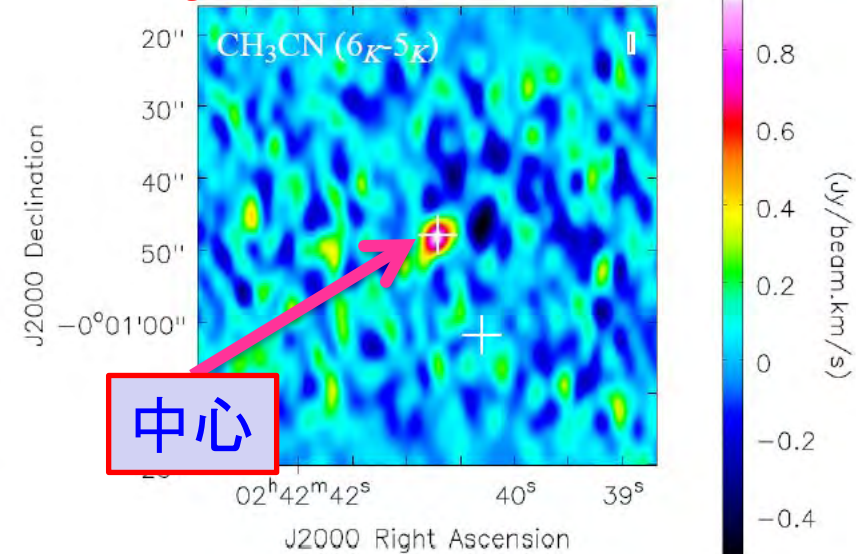
星間分子としては 比較的複雑な有機分子、HC₃N, CH₃OH,, が、X線が強い中心部にいること。

各分子の分布： 主に中心に分布 (*First images*)

HNCO ($5_{05}-4_{04}$)



CH₃CN (6_K-5_K)



驚き3:

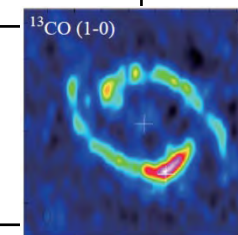
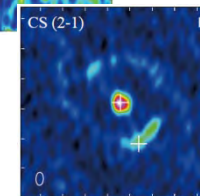
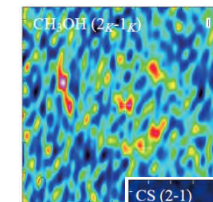
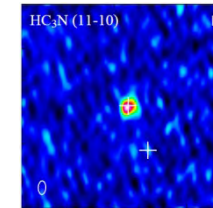
これらの10枚の分布図が、
1~2 時間で、アンテナ数14
~16 台で得られたこと。
→アルマの高い能力

多様な分布の分類

CND: AGN周囲の円盤状のガス(Circumnuclear Disk)

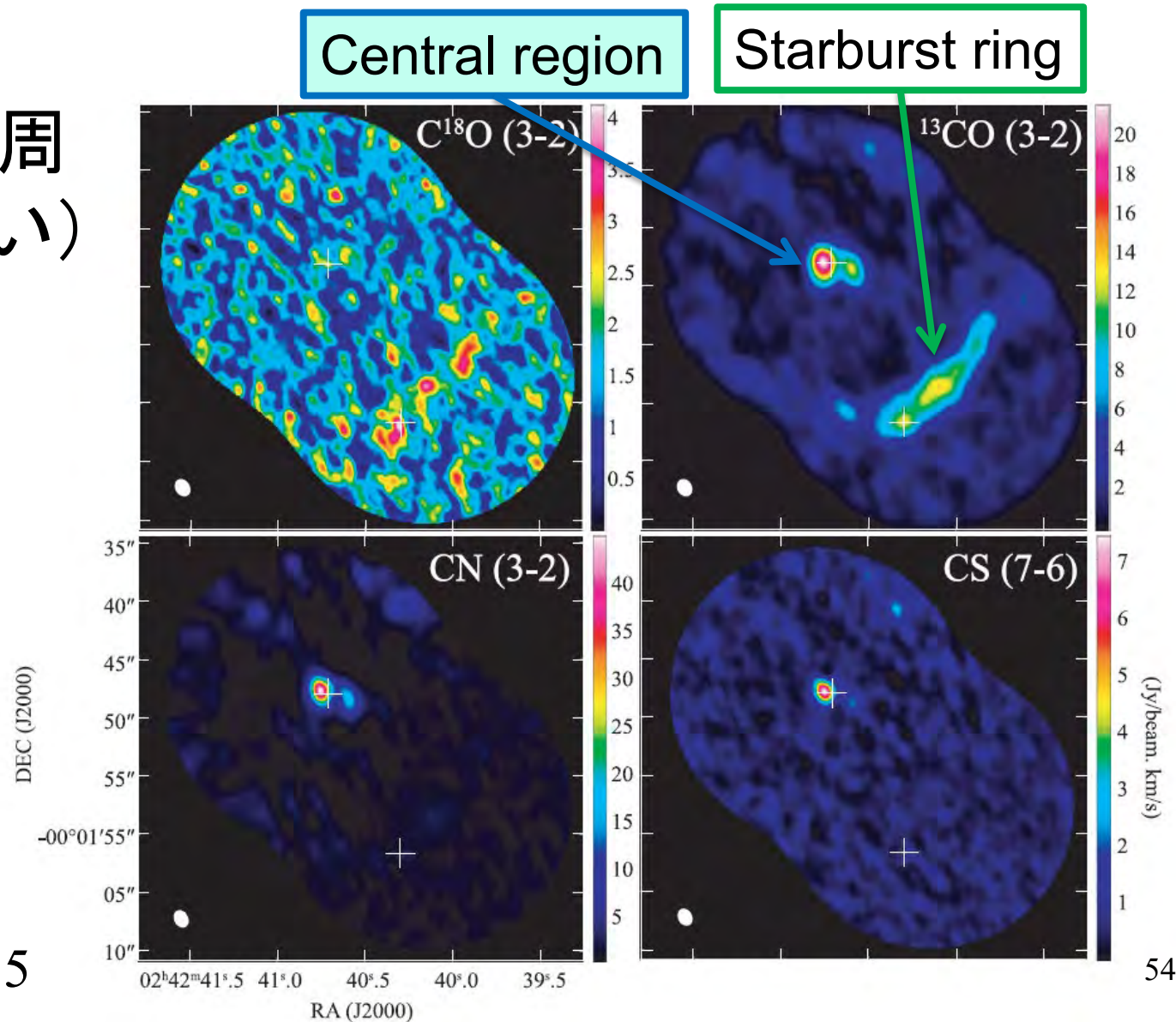
SB ring: 爆発的星形成(Starburst)のring状の領域

CND	両方のknots	^{13}CN ($N = 1-0$) HNCO ($J_{K_a, K_c} = 5_{05}-4_{04}$)
	中心	SO ($J_N = 3_2-2_1$) HC_3N ($J = 11-10, 12-11$) CH_3CN ($J_K = 6_K-5_K$)
CND + SB ring	両方のknots	CH_3OH ($J_K = 2_K-1_K$)
	中心	CS ($J = 2-1$)
SB ring	^{13}CO ($J = 1-0$) C^{18}O ($J = 1-0$)	



高い周波数での画像： 340 GHz帯

- 2 視野を観測（高い周波数では視野が狭い）
 - $C^{18}O$ & ^{13}CO 分布が異なる
- 同位体比の違い？
同位体選択的な光解離による影響？



分子の温度(回転温度)及び存在量

回転温度	CO 同位体種	他の分子
CND (Circumnuclear disk)	14-22 K	< 20-40 K (上限値)
SB (Starburst) ring	~ 8 K	< 12-39 K (上限値)

存在量

- CO 同位体種: CND < SB ring, ~3-5 倍の違い
- 他の分子: CND > SB ring, ~3-10 倍の違い

銀河の観測(ALMA)のまとめ

- 系外銀河NGC 1068での分子の空間分布
 - アルマ望遠鏡: 近傍銀河の弱いスペクトル線についても、短時間で電波画像が得られる。
 - CND(AGN)とSB ringで多様な分布
 - 大きく3つに分類
 - 温度、密度、環境の違い: 各分子の回転励起、生成反応、破壊などで説明できないか。
- 今後
 - アルマ望遠鏡で、さらに高感度、高空間分解能の観測
 - 反応モデル計算との連携
 - 銀河の分子組成を決める要因の追求

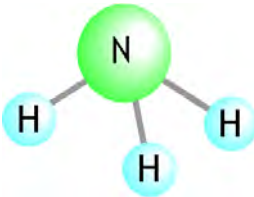
全体のまとめ

- **電波でわかること**

宇宙のガス、チリのような主には**低温の世界**

星の原料 → 星形成の研究 ←

物質の種類や反応（色々な分子の生成）



- **宇宙の物質の研究は学際的**

天文学、物理学、化学（将来は生物学も？）

学問の境は人間が作ったもので、**自然には境はない！**

今後のALMA望遠鏡の成果などにもご期待を！

さらに知りたい方のために

- 国立天文台 ホームページ

<http://www.nao.ac.jp/>

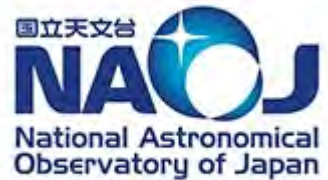
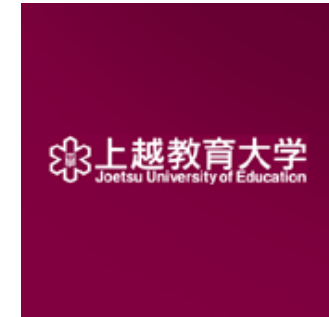
- 野辺山観測所 ホームページ

<http://www.nro.nao.ac.jp/>

などをまずご覧ください。

謝 辞

- 観測プロジェクトのすべてのメンバーに、特に
T. Nakajima, K. Kohno, N. Harada, and
E. Herbst, Y. Tamura, T. Izumi,
A. Taniguchi, T. Tosaki




- 観測所のサポートに

国立天文台 野辺山宇宙電波観測所

ALMA (EA-ARC & ちり観測所)



A photograph of the ALMA radio telescope array in a snowy, high-altitude landscape. Several large, white, parabolic radio telescope dishes are visible, arranged in a line. The sky is clear and blue. A large, white speech bubble with a green border is overlaid on the right side of the image, containing Japanese text.

学際的な知識・協力で宇
宙を観測！
ご清聴ありがとうございました。