

銀河でのさまざまな分子スペクトル線の観測

高野 秀 路

〈国立天文台野辺山宇宙電波観測所 〒384-1305 長野県南佐久郡南牧村野辺山〉

e-mail: stakano@nro.nao.ac.jp



私たちの銀河系の中にはところどころにガスや塵が多い場所があり、そこではいろいろな分子が存在している。また、私たちの銀河系の外にある銀河（系外銀河）でも、やはり多くの分子が存在している。これらの分子は、銀河でのガスの分布や運動を調べるのに役立ち、また、化学反応の研究にも使われている。今回、系外銀河でのさまざまな分子の観測の主に化学的な側面での進展について、私たちの研究にも触れながら最近の状況を報告したい。

1. はじめに：宇宙にある分子

宇宙には分子がたくさんあると言うと、驚かれる方もいるかもしれない。しかし、実際に星々の間の広大な空間には、ところどころにガスや塵があり、星間分子とか、星間物質と呼ばれている。宇宙空間に分子があることは、1940年代に初めてわかった。その後の多くの人の研究によって、私たちの銀河系の中で約130種類もの分子が見つかっている¹⁾。

さらに、これらの分子を利用して、銀河系内でのガスの分布や運動が調べられ、そこでの暗黒星雲の分布、星の形成、および化学反応などの研究が進み、大きな成果を上げてきている。

例えば星の形成は、ガスや塵が集まり、高密度な状態となることで開始する。このようなガスは10 K（摂氏マイナス263度）程度と極低温なため光を出すことはできないが、そこに含まれる一酸化炭素（CO）などの分子がぐるぐると回転することによって電波を出すことができる。したがって光の観測では調べるのが難しいが、電波の観測では様子をうかがい知ることができる。具体的

には、電波の観測により、星ができるときにガスが回転しながら中心に落ち込んだり、一方、ガスの一部が外側へ吹き出す場合もあることなどがわかってきている。

このように、特に電波の観測（電波天文学）では、分子を用いて天体物理的な研究が進められている場合が多い。したがって、宇宙の化学の理解が、観測結果の解釈に重要となる場合がある。各学問分野の相互関係のイメージをあえて図にすると、図1のようになると考えている。

また、多くの分子が見つかってきているので、どのような反応でそれらが作られるのかを調べる研究も進んできている。その結果、宇宙空間は地上と比べると希薄で極低温なため、低温でも進む特殊な化学反応によって、いろいろな分子が作られることがわかってきている。また、塵の表面に吸着した原子および分子による表面上での反応も、重要であることがわかってきている。宇宙での化学反応は、極端な環境（地上と比べて低密度、極低温）、および極めて長いタイムスケール（～100万年）で行われ、地球上では再現が困難な場合も多い。そのため、宇宙は天然の特殊な化学

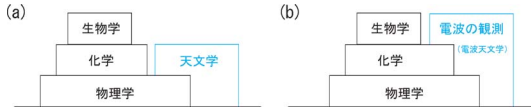


図1 各学問分野の相互関係のイメージ。

(a) 天文学一般の場合, (b) 特に電波での観測 (電波天文学) の場合

実験室と考えることができる。もちろん、宇宙的規模で見れば、地上の環境も (のほうが?) 特殊であり、地球上での化学を宇宙での化学の特殊な一例として、相対化して見る観点が生まれたとも言えるだろう。そのため、宇宙の化学の研究は、一般の化学や物理の研究にもよい刺激となり、学際的分野で新しい研究を展開するきっかけともなっている。

それでは銀河系の外にある多くの銀河 (いわゆる系外銀河) での分子の観測の状況はどうだろうか。銀河系で行われた研究は、その後系外銀河でも進められる運命にある。より遠くではどうなのだろうか、という自然な発想である。銀河にはかなり多様なものが存在するので、星間物質の世界をより豊かに (複雑に?) する方向であると予想される。ガスが多い銀河、少ない銀河、爆発的星形成銀河 (重い星が短期間に多数形成されている)、衝突を起こしている銀河、遠方の銀河、などさまざまな銀河がある。それぞれの銀河に、特徴のある星間物質の世界があるはずである。

系外銀河は遠いために観測は難しくなる。観測には高い感度が必要なので、大型の電波望遠鏡を用いることが多い。長野県野辺山高原にある国立天文台の直径 45 m 電波望遠鏡 (図2) は重要な位置を占めている。

星間分子として水素分子の次に多い CO 分子については、多数の銀河で検出されている。その他の分子も合わせて、これまでに計 30 種類近い分子が検出されている。この数は知られている星間分子種のほぼ 4 分の 1 にあたる。

これから、銀河でのさまざまな分子の観測につ



図2 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の直径 45 m 電波望遠鏡 (長野県野辺山高原) (見学コースがあり、構内は毎日公開されている。<http://www.nro.nao.ac.jp>)

いて、私たちの観測結果にも触れながら、多少研究の舞台裏も交えて紹介したい。さまざまな分子の観測については、すでに天文月報の 2001 年 12 月号で紹介させていただいたことがある。まず、その続編的な話を、他の研究者の成果も紹介しながら少ししたい。その後は、私たちがよく観測を行っているアンモニア分子 (NH_3) の話に移らせていただきたい。アープ 220 という銀河で、アンモニアの特異な吸収スペクトル線が観測されたので、その話が中心となる。

2. 銀河でのさまざまな分子の観測： これまでの研究と最近の進展

2.1 銀河 M 82 での特異な分子組成

電波望遠鏡で銀河の中心部を観測した場合、中心を含むある程度の広さの視野内を平均した電波が観測される。例えば、距離が約 1,000 万光年 (3

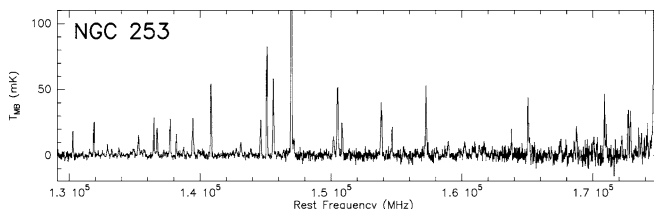


図3 銀河 NGC 253 での波長 2 mm 帯でのスペクトル線⁵⁾ [アメリカ天文学会 (AAS) の許可を得て転載]. 横軸は周波数で、129–175 GHz の範囲を表示している. 縦軸は電波強度に対応している. 各種の分子が回転する際に出す電波が、多数検出されている.

Mpc) で、電波望遠鏡の空間分解能 (ビームサイズ) が 20 秒角である場合、約 1,000 光年の範囲の平均的な電波が観測される. この範囲内には、多くのさまざまな天体 (暗黒星雲、星、超新星残骸など) が含まれるため、いろいろな銀河を観測したとしても、それらの分子組成はある程度平均化され、大きな違いはないと予想することもできる. しかし、実際には銀河によって分子組成が異なる場合があることがわかっている.

比較的近くにあって (約 1,000 万年), かつガスが非常に多い爆発的星形成銀河の M 82 がその代表例である. すなわち、M 82 では CO の量が多いにもかかわらず、SO、SiO (一酸化ケイ素)、NH₃ (アンモニア)、HNC、CH₃OH (メチルアルコール)、CH₃CN (シアン化メチル) の存在量が、比較的近くにある他の銀河に比べて明らかに少ない (文献 2, およびその中の引用文献参照). その理由を解明するために、前回の天文月報の解説記事が出た後に、いくつかの研究が主にヨーロッパの研究者によって行われた. その結果、M 82 で当時検出されていなかった SiO および CH₃OH が、スペインおよびフランスにある電波望遠鏡で弱めではあるが検出された^{3), 4)}. しかし、上記 6 分子の M 82 での存在量が低いという状況は変わっていない.

なぜ M 82 では分子組成が明らかに異なるのかについて、上記の研究者たちは、これらの分子が M 82 中心部の強い光によって、選択的に分解 (光解離) されやすいためではないかと主張してい

る. 一方、私たちは、これらの分子の生成に塵が関与している可能性が高いことから、何らかの理由で塵上での分子生成、およびそこから気相への分子の脱離が阻害されているのではないかと考えている.

2.2 最近特に注目したこの分野の研究

M 82 と並んでよく取り上げられる比較的近くにある銀河として、NGC 253 が挙げられる. この銀河もガス量が多く、また M 82 と同様に爆発的星形成銀河である. ガスが多いので、さまざまな分子が検出される. スペインを中心とする研究者たちは、その点に目をつけ、この銀河での波長 2 mm 帯 (約 129 から 175 GHz) の電波を丹念に記録し、どのようなスペクトル線が受かるかのカタログを作ってしまった⁵⁾ (図 3). このような観測は“ラインサーベイ”とも言われ、これまではスペクトル線がよく受かる銀河系内の天体を対象に行われてきた. それが系外銀河を対象に行われたので驚きであった. この観測の結果、25 分子の 111 本のスペクトル線が確認された. このカタログは分子組成の基礎データとして重要である.

また、もう一つ驚かされたのはアメリカの研究者が行った研究で、電波干渉計を用いた高い空間分解能での分子の分布の観測結果である. IC 342 という比較的近くにある銀河で、まとめて 7 分子 (C₂H、C³⁴S、N₂H⁺、CH₃OH、HNC、HNC、HC₃N) の分布の結果が出版された⁶⁾. 図 2 のような単一のパラボラアンテナでは、空間分解能はあまり高くできない (野辺山 45 m 電波望遠鏡では、

CO 分子の 115 GHz での観測時に 14 秒角程度となる)。しかし、パラボラアンテナを何か組み合わせ、協力してデータを取得し電波干渉計として用いると、空間分解能を向上することができる。この研究では、空間分解能は 5 秒角であった。

分子によって、かなり分布の違いが見られた。分布に基づいて、濃いガスをトレースする分子 ($C^{18}O$ など)、中心部の光が強いところで多い分子 (C_2H , $C^{34}S$)、そして中心近くの棒状の構造によってショックが発生している領域で多い分子 (CH_3OH , $HNCO$)、などのように分類されている。興味をもたれた方は、是非原論文の図を見ていただきたい。この研究は、分子の分布を捕らえながら、銀河の構造と比較することによって、分子組成が決まる要因を追求した点で重要である。

電波干渉計を用いた観測は、1-2 個の分子を扱ったものも含めるとかなりの数が出ており、今後さらに発展していくと考えられる。ほかにも面白い結果がいくつも出されているが、またの機会に紹介したい。

3. アンモニア観測の最近の進展

私たちは、さまざまな分子の中でも、特にアンモニアに興味をもって観測を続けている。その主な理由は、下記のとおりである。

- 比較的存在量が多い基本的な星間分子である。
- 低い周波数帯 (23-24 GHz, 波長 1.3 cm 帯) にエネルギー的に異なるスペクトル線が多く存在し [(J, K) = (1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4) など, J, K は回転の量子数], 温度などの物理量や, 存在量を求めやすい。
- 前述のように M 82 で存在量が少ない分子の一つであり, 銀河での分子組成を特徴づけると考えられる。
- 周波数が低いので, 受信機の性能も比較的良く, また多少の悪天候でも観測ができる。

3.1 アンモニアの空間分布

2.2 節で, 分子の空間分布を電波干渉計で明ら

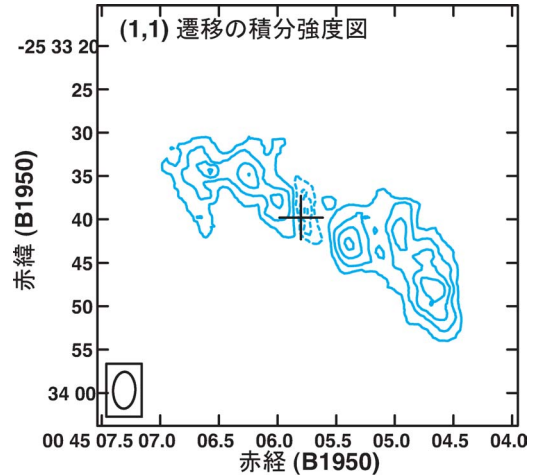


図4 銀河 NGC 253 でのアンモニア (1, 1) 遷移の電波の分布。
強度を等高線で表している (点線は吸収線)。中央近くの“+”は、銀河の中心位置であり、また、左下隅の楕円はこの観測での空間分解能 (ビームサイズ) である。

かにした例を紹介したが、アンモニアの空間分布についてはどのぐらい観測例があるのだろうか。実際は、最近まで IC 342 の 1 例しかなかった⁷⁾。

私たちは以前、NGC 253 と M 82 において、野辺山 45 m 電波望遠鏡でアンモニアの観測を行い、その存在量を比べたことがあった²⁾。その際に、NGC 253 でのアンモニアの各遷移のスペクトル線の形が左右対称ではなく、肩があったり、細いものがあったりなど特徴があった。銀河のスペクトル線の線幅や形は、一般に銀河の回転によるドップラー効果を反映している。したがって、形に特徴があるということは、分布に特徴があると推定することができる。

そのため、私たちはこの推定を確かめるために、NGC 253 でのアンモニアの分布を、アメリカにある主にセンチ波用の電波干渉計 (VLA) を用いて観測した⁸⁾。45 m 電波望遠鏡で得られた (1, 1) 遷移のラインの形は非対称であり、銀河の平均的速度よりも速度的に大きい (遠ざかっている) 場所で、スペクトルの強度が強めだった。VLA で得

られた (1, 1) 遷移の電波の分布を図 4 に示した。

図 4 を見ると、分布は NGC 253 中心部に存在することが知られている棒状構造に沿っているが、中心に対して対称ではなく、右下方向（南西方向）に少し片寄っていることがわかる。右下方向は速度的に大きい（遠ざかっている）場所であり、45 m 望遠鏡での結果と合う。なぜ、右下方向に片寄るのかはわかっていない。(2, 2) 遷移の電波の分布も同じ傾向である。分布が得られたことで、中心部の構造、温度分布、また吸収もあることなど、多くの情報が得られた。

実は電波干渉計を用いた NGC 253 でのアンモニアの観測は、オーストラリアで稼動を始めたコンパクトアレイと呼ばれる電波干渉計（直径 22 m のパラボラアンテナが 6 台から構成される）でも行われていて、彼らと私たちの論文は近い時期に独立に出版された^{8),9)}。油断できないものである……。

3.2 銀河アーブ 220 でのアンモニア¹⁰⁾

3.2.1 アーブ 220 とは

これまで私たちは、比較的近く（距離 1,000 万光年前後）にある銀河での観測を進めてきたが、かなり観測を行ったため、さらに遠い銀河での観測を試みることにした。今回取り上げたアーブ 220 は、距離 2.5 億光年のところにあり、ガスが多い銀河である（図 5）。

この銀河は非常に強い赤外線を出しており（およそ太陽光度の 10^{12} 倍），“ultraluminous infrared galaxy” と呼ばれる銀河の代表的なものである。また、電波観測などから、中心部に二つの核が見つかっており¹¹⁾、二つの銀河が合体している途中であると考えられている。この大きな赤外線光度の起源として、爆発的星形成、またはブラックホールに落ち込むガスからの重力エネルギーの解放、の二つが考えられている。

2004 年 5 月に 45 m 電波望遠鏡を用いて、この銀河でアンモニアの検出を試みた。遠いので、受かるとしてもかなり弱い輝線になると予想した。

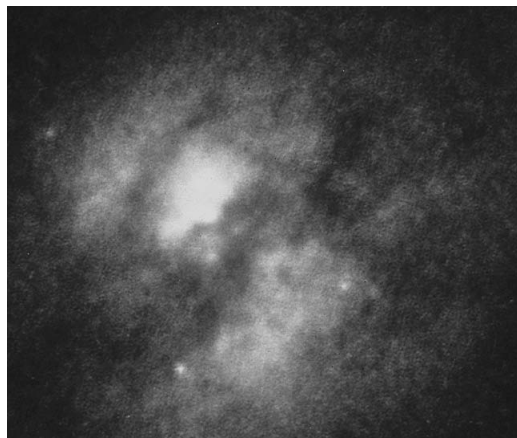


図 5 光で見た銀河アーブ 220。

銀河によく見られる渦巻状の腕ははっきり見られず、特異な形をしている。この写真は NASA のハッブル宇宙望遠鏡で撮られたもの。

提供：STScI (Space Telescope Science Institute: 宇宙望遠鏡科学研究所) [E. Shaya, D. Dowling (メリーランド大学), WFPC (広領域および惑星用カメラ) チーム, および NASA]

(正直に言えば何も受からない可能性も高いと思っていた。)

3.2.2 驚きの観測結果

意外なことに、4 本の遷移とも電波の吸収で観測された。(ただし、(4, 4) 遷移はデータの質が低めなので、仮の検出である。) これは、アーブ 220 の中心部（約 1 秒角の範囲¹²⁾ から出ている電波（連続波）を、手前にあるアンモニアが吸収しているためと考えられる。

線幅は遷移によって異なり、(3, 3) および (1, 1) 遷移において通常の銀河の輝線の場合よりもかなり広がった。

これに関連するが、オーストラリアの電波天文台 (ATNF) では、年に何回か近況などをまとめたニュースレターを発行していて、私も送ってもらっている。そのころ届いたニュースレターを見たら¹³⁾、前述のコンパクトアレイの成果として、たまたま銀河でのアンモニア観測の結果が紹介さ

れていた。その中に、アープ 220 の結果も含まれていたのである！やはり吸収線で受かっていた [そこでは (1, 1), (2, 2) 遷移のみの結果が紹介されていた]。単一望遠鏡と電波干渉計という違いはあるが、同じような観測がたまたま別のところでも行われていることにびっくりするとともに (よくあることだが……), 論文を早くまとめなければとお尻に火がついた思いだった。私たちの論文は、ある程度休日返上をしたりして急いで書き上げたのだが、紆余曲折があって遅れ、2005 年 10 月の日本天文学会欧文誌 (PASJ) に掲載された¹⁰⁾。

また、上記ニュースレターとはほぼ同じ時期に、赤外線天文衛星 (ISO) でのアープ 220 の観測結果が、論文として出版されているのに気づいた¹⁴⁾。この論文を見ると、いろいろな分子の赤外領域のスペクトル線が受かっているが、アンモニアや水のスペクトル線は吸収線となっている。そのため、この銀河の中心部の手前にアンモニアが存在することが、赤外觀測からもわかった。

3.2.3 データの解析と考察：中心部に高速ガスが存在

(1, 1) および (2, 2) 遷移を用いて、ガスの温度を求めたところ 42 K となり、近傍の銀河での値 (約 30 K が多い) と比べると比較的高めであった。また、アンモニアの存在量 (柱密度) は、約 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ と求まった。これは系外銀河ではこれまでで最大の値であり、ガス量が多いことを意味している。

全線幅がかなり広いこと、また吸収線として観測されたことから、連続波が出ているアープ 220 の中心部のコンパクトな領域で、激しいガスの運動が起こっていることがわかった。その起源としては三つの可能性があると考えている。(1) 別の銀河 NGC 4258 では、銀河の中心速度から $\pm 1,000 \text{ km/s}$ に相当する超高速の水蒸気のメーザーが発見され、ブラックホールの周りを回るガス円盤から放射されていることがわかってい

る^{15), 16)}。アープ 220 においても (アンモニアを含む) 回転ガス円盤があれば、吸収線の幅が大きくなることが考えられる。したがって、ブラックホールおよびその周りを回るガス円盤 (active galactic nucleus) の存在が考えられる。(2) 中心部からの高速ガスの放出 (jet), または中心部へのガスの落下。光および X 線の観測からは、そのような原子ガスがあると考えられているが^{17), 18)}, アンモニアのような分子が存在するかどうかは不明である。(3) 二つの核が合体している途中であるので、その周囲で激しい乱流が発生する可能性がある。

以上の可能性をさらに検討するためには、高い空間分解能でアンモニアの動きを観測する必要があり、前述のアメリカにある電波干渉計 (VLA) を用いて観測を行っている。

今後、アンモニアの吸収線は銀河の中心部の運動を調べるための良い手段となる可能性がある。これまでに水蒸気メーザーが中心部の運動を調べるために使われてきているが、この場合はメーザーを検出するために、ガス円盤をほぼ真横から見る必要がある。しかし、アンモニアの吸収線はメーザーではないため、銀河の中心部にある電波の連続波源をある程度隠せば観測される。したがって、水蒸気メーザーの場合よりはゆるい条件であると考えられる。そのため、いくつかの銀河においてアンモニアの (吸収線の) サーベイ観測を開始している。

3.3 最も遠い銀河でのアンモニアの検出

昨年、ドイツとアメリカを中心とするグループが、赤方偏移 (z) が 0.68 という遠方の銀河 B0218 + 357 で、アンモニアを吸収線で検出した [z というのは、銀河が遠ざかることによって、スペクトル線の波長が長くなることを示す値である。もし、波長が 2 倍になったら $z=1$ である。 $z=(\text{観測波長}/\text{静止しているときの波長})-1$]¹⁹⁾。この天体は、電波の連続波が強いこともあり、いろいろな分子の吸収スペクトル線が検出されることで知ら

れている。これが現在のところ、アンモニアが検出できた最も遠い天体である。

4. 今後に向けて

アープ 220 のようなアンモニアの吸収線については、どのくらい普遍的な現象であるのかの調査を引き続き行っていきたい。

また、銀河内での分子の分布を明らかにしていくことは、銀河の分子組成の本質を理解し、また天体物理との関連を深めていくために不可欠である。今後はその方向の研究をかなり進める必要があると考えている。現在、チリの標高 5,000 m の高地に建設中のアタカマ大型ミリ波サブミリ波電波干渉計 [略称 ALMA (アルマ)]²⁰⁾ が使用できるようになると、このような観測は飛躍的に実行しやすくなる。

ただ、アンモニアのようなセンチ波帯の周波数の観測については、アルマでは低すぎてできない。現在計画中のスクエアキロメートルアレイ (SKA)²¹⁾ という比較的low周波の大型電波干渉計では、可能となるだろう。

謝 辞

今回、私たちの研究をいくつか紹介させていただいたが、それらの共同研究者は、P. Hofner 氏 (New Mexico Tech), G. Winnewisser 氏 (ケルン大), 中井直正氏 (筑波大), 川口建太郎氏 (岡山大), 中西康一郎氏 (国立天文台), 鷹野敏明氏 (千葉大) です。また、観測には野辺山 45 m 電波望遠鏡、および VLA を用いました。望遠鏡の維持、性能向上、および運用に携わっている関係者に感謝いたします。

参考文献

- 1) 理科年表, 国立天文台編 (丸善), 天文部参照
- 2) Takano S., Nakai N., Kawaguchi K., 2002, PASJ 54, 195
- 3) García-Burillo S., Martín-Pintado J., Fuente A., Neri R., 2001, ApJ 563, L27

- 4) Martín S., Martín-Pintado J., Mauersberger R., 2006, A&A 450, L13
- 5) Martín S., Mauersberger R., Martín-Pintado J., Henkel C., García-Burillo, S., 2006, ApJS 164, 450
- 6) Meier D. S., Turner J. L. 2005, ApJ 618, 259
- 7) Ho P. T. P., Martín R. N., Turner J. L., Jackson J. M., 1990, ApJ 355, L19
- 8) Takano S., et al., 2005, PASJ 57, 549
- 9) Ott J., Weiss A., Henkel C., Walter F., 2005, ApJ 629, 767
- 10) Takano S., Nakanishi K., Nakai N., Takano T., 2005, PASJ 57, L29
- 11) Norris R. P., 1988, MNRAS 230, 345
- 12) Sopp H. M., Alexander P., 1991, MNRAS 251, 112
- 13) Ott J., Weiss A., Henkel C., Walter F., 2004, ATNF News, No. 54, 14
- 14) González-Alfonso E., Smith H. A., Fischer J., Cernicharo J., 2004, ApJ 613, 247
- 15) Nakai N., Inoue M., Miyoshi M., 1993, Nature 361, 45
- 16) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 373, 127
- 17) Heckman T. M., Armus L., Miley G. K., 1990, ApJS 74, 833
- 18) McDowell J. C., et al., 2003, ApJ 591, 154
- 19) Henkel C., et al., 2005, A&A 440, 893
- 20) アルマのホームページは, <http://www.nro.nao.ac.jp/alma/J/>
- 21) スクエアキロメートルアレイのホームページは, <http://www.skatelescope.org/>

Observations of Various Molecules in External Galaxies

Shuro TAKANO

Nobeyama Radio Observatory, Nobeyama, Minamimaki, Minamisaku, Nagano 384-1305, Japan

Abstract: In our Galaxy there are gas and dust grains in interstellar space, and various molecules have been found. In addition, molecules exist also in galaxies outside of our Galaxy (external galaxies). These molecules are used to study distributions and kinematics of gas in galaxies, and they are also used to study chemical reactions. This time we are going to introduce studies of various molecules in external galaxies (including our studies) mainly in the aspect of astrochemistry.