

ガスが多い近くの銀河でのいろいろな分子の観測

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

宇宙空間にはさまざまな物質がただよっていて、星間物質と呼ばれる。星間物質は、宇宙での物質循環において重要な役割を担っている。すなわち重力によって収縮し星の原料となることで消費され、赤色巨星や超新星によって再び供給される。星間物質は、原子、分子、塵などからなり、豊かで独特な化学反応の世界を築いている。このような星間物質の世界を研究することによって、その組成、反応、そして天体物理現象との関連などがわかってきている。今回、我々の銀河系の外の銀河（系外銀河）での星間物質の研究を、その舞台裏も交えて取り上げたい。特に近くの系外銀河 M82 で、生成反応の観点から見て系統的に特異な分子組成を見出したので紹介する。

1. はじめに

星々の中の広大な空間には、ガスや塵がただよっていて、星間物質と呼ばれている。この約 30 年にわたる多くの人の研究によって、宇宙にあるガスや塵についての理解が進み、我々の銀河系の中で分子としては約 120 種類のものが見つかってきている。これらの分子を使って、まず銀河系内で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、及び化学反応などが研究され、大きな成果を上げてきた。

それでは銀河系の外にあるいわゆる系外銀河ではどうであろうか。銀河系を出ると、多くの銀河が存在し、その形態は渦巻き型、楕円型、そして不規則型など様々で興味深い。それぞれの銀河に、ガスや塵などの豊かな星間物質の世界があるはずである。系外銀河は、さすがに遠いために観測は容易ではないが、星間分子として水素分子について多い CO 分子は、これまで 600 個以上の銀河で検出されており、ガスの分布や運動を調べるのに欠かせない分子である。その他の分子を含め、これまでに合計 24 種類もの分子が検出されている。



図 1：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（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>）

この数は知られている全ての星間分子のほぼ 5 分の 1 にあたる。これだけの種類の分子が系外銀河で見つかったことで、そこでの分子組成及び化学反応の研究も可能となってきた。CO 以外の多くの分子については、ガスが多い近くの銀河 NGC 253, IC 342, 及び M 82 など、ある程度限られた銀河で検出されている。電波観測などでは、主に分子スペクトル線を用いて銀河のガスの運動、進化、及び星形成の研究を行なっている。その場合に、

銀河の分子組成と銀河の性質との関係がわかれば、基礎的で重要な情報となる。

銀河は比較的近いものでも実距離としては遠くにあるため（数千万光年）、観測には非常に高い感度が求められ、大型の電波望遠鏡が必要である。長野県野辺山にある国立天文台の直径 45 m 電波望遠鏡（図 1）は重要な位置を占めている。

我々は 10 年ほど前から断続的に近くの系外銀河の分子組成を研究しており、今回その様子を舞台裏も交えながら紹介したい。私が系外銀河観測を始めるきっかけとなったのは、10 年程前に野辺山の中井直正さんと 45 m 電波望遠鏡の観測室で交わした会話だったと思う。詳しい内容は忘れたが、銀河系内天体では分子ごとの特徴を生かして、その進化段階、化学反応の情報を得ているが、それを系外天体に適用できないかという議論だったと思う。中井さんは銀河の専門家、私は星間分子屋ということで、その後、望遠鏡の観測時間を得るための観測提案書（プロポーザル）を、野辺山（当時）の川口建太郎さんも入り共著で作成することとなった。その後、特にアンモニア分子についての経験も豊富な千葉大の鷹野敏明さんが加わった。また、総合研究大学院大学の学生（当時）の大池知子さんとも関連の研究を行なったが、その結果は別の機会に紹介されるであろう。また、ドイツで観測を行なった際は、ケルン大学の Winnewisser さん、マックスプランク電波天文研究所の Schilke さんと共同で行なっている。

2. 近くの系外銀河の“両横綱” NGC 253 と M 82 での分子組成 の違い

研究を始めた 1990 年代はじめ頃は、ドイツ・ボンのマックスプランク電波天文研究所のグループが、ガスが多く存在し近くにある銀河について、いくつかの観測結果を発表していた。観測装置としては、スペインのグラナダ近郊にある直径 30 m の電波望遠鏡を使っていた。その結果、銀河の分

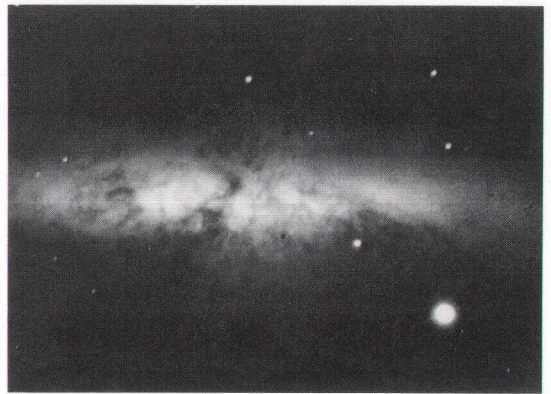
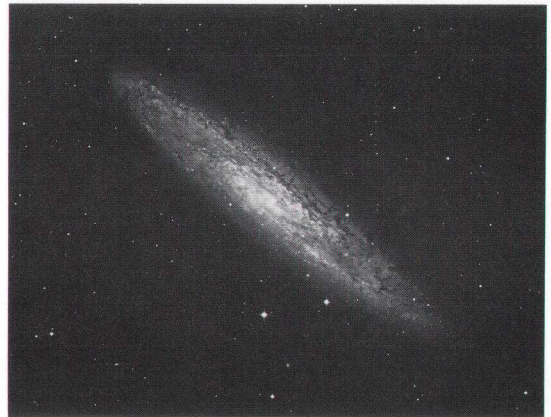


図 2：系外銀河 NGC 253（上）及び M 82（下）の光で見た姿[上の写真は Anglo-Australian Observatory (Photograph by David Malin) によるもの]

子組成は、銀河によって異なる場合がある可能性が出てきた。一般に単一の電波望遠鏡の視野は大きく、近くの銀河の中心部は十分に含まれてしまうことが多い。そのため、視野内には様々な天体が入ることになる。それらの平均的な電波が観測されるので、大まかな考えとしては、銀河の分子組成には大きな差はないという先入観を持っていた。しかし、実際はそうではないようである。

この種の研究では、まず近くにあつてスペクトル線強度が大きい（ガスが多い）銀河が観測対象となる。そのような銀河の東西の両横綱は NGC 253 及び M 82（図 2、関係ない人には呪文のような名前だが、慣れると忘れられなくなる）である。野辺

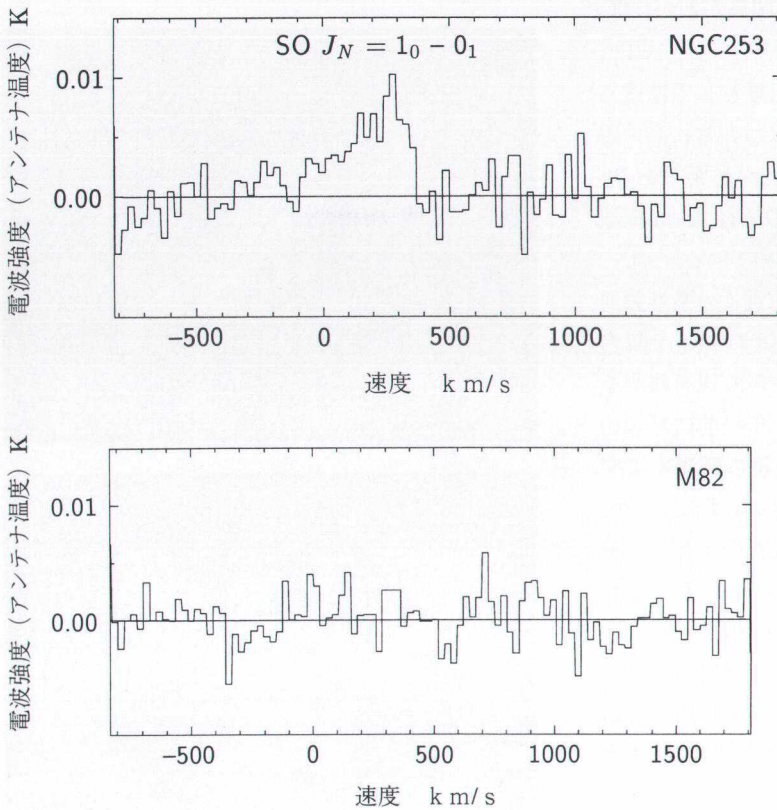


図3：系外銀河 NGC 253 (上) 及び M 82(下) での SO 分子のスペクトル線⁵⁾
 横軸は周波数に対応するが、ドップラー効果を利用して我々に対する速度として表示している。縦軸は電波強度である。NGC 253 でのみ検出されている。

山から見て NGC 253 は南の空低くに、M 82 は北の空にあり、実際は“南北の両横綱”である。NGC 253 及び M 82 は新しい星が激しく形成（爆発的星形成）をしていて近くにある銀河（距離約 1000 万光年）として、この業界では有名である。

我々が野辺山での観測を始めるころ、NGC 253 で検出されるにも関わらず、同程度の感度で観測しても M 82 で見つからない分子として、4 つが報告されていた。それらは SiO（一酸化ケイ素）、HNC、CH₃OH（メチルアルコール）、CH₃CN（シアン化メチル）であった^{1)~4)}。これらの分子に何らかの共通点があれば分子組成の違いの原因解明の糸口となる。星間分子の研究をやっている者（少なくとも私）にとって、これまでの銀河系内

の研究結果などに基づく知識から、これらの分子は一般に高温環境でガスとして多く存在しているという認識がある。これには 2 つの要素があり、(1) 高温環境において気相反応で直接に生成しやすくなるということ、そして (2) 塵の上で生成しやすく、塵から蒸発してガスになる際に、高温環境だと有利であるということ、である。ボンのグループはこれら 4 つの分子について、特に統一的な認識を持っていないようであった。我々はそのような分子が NGC 253 で多く、M 82 では少ないことをさらに確かめるために、高温環境でガスとして多く存在すると考えられる他の分子として、SO とアンモニア (NH₃) 分子を取り上げて、野辺山 45 m 電波望遠鏡で観測を行なった⁵⁾。我々のもくろみが正しければ、両分

子とも NGC 253 では検出され、同程度の感度で観測しても M 82 では検出されない（存在量が少ない）可能性が高かった。観測の結果、両分子とも NGC 253 でははっきりと検出されたが、M 82 では検出されず、もくろみは当たった。SO のスペクトル線を図 3 に示す。

両銀河の銀河系からの距離、及びガス量はほぼ等しい。従って、分子組成の違いは、改めて意外であった。この違いは、定量的にもはっきりしていることが、分子の存在量を計算してみて確認できた。また、両銀河の分子組成は数十秒角の広い視野（～ 3000 光年に相当）で観測しても、異なっていることがわかり、その原因の解明は銀河の分子組成の研究において最重要な課題である。

表1 NGC 253 及び M 82 に関連する各分子の主な生成反応による分類⁵⁾

主な生成反応		分子	NGC 253	M 82
低温においても 速い反応	1. イオンと中性分子の反応	CN, CS, C ₂ H, HCN, HNC, HCO ⁺ , N ₂ H ⁺ , cyclic-C ₃ H ₂ , HC ₃ N, CH ₃ CCH	検出	検出
	2. 中性分子どうしの反応 [反応に必要なエネルギー (活性化エネルギー) が無いか, 小さいもの]	CO, CS, HC ₃ N	検出	検出
高温でのみ 速い反応	3. 中性分子どうしの反応 [反応に必要なエネルギー (活性化エネルギー) が大きいもの]	SO	検出	未検出
	4. 塵の上で生成し蒸発, または塵の破壊	SiO, NH ₃ , HNCO, CH ₃ OH, CH ₃ CN, (HCN)	検出	未検出

表2 NGC 253 で検出され M 82 で検出されない6 分子についてのガスが多い近くの銀河での検出状況
(yes : 検出, no : 未検出, — : データなし)

銀河	SO	SiO	NH ₃	HNCO	CH ₃ OH	CH ₃ CN
NGC 253	yes	yes	yes	yes	yes	yes
M 82	no	no	(no)	no	no	no
NGC 6946	no	—	—	—	yes	—
IC 342	no	no	yes	yes	yes	—
Maffei 2	—	no	yes	yes	yes	—
M 51	—	—	yes	—	—	—
Cen A	—	no	—	yes	no	—
NGC 4945	—	no	—	yes	yes	—

[文献5の表6を, その後の我々の観測及び Huettemeister, Mauersberger, and Henkel, 1997 A&A 326, 59 に基づいて改訂]

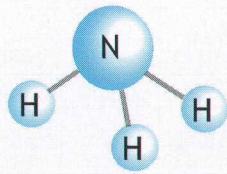


図4：アンモニア分子の模式図

我々は、両銀河に関連する各分子の主な生成反応を全般的に検討してみた。その結果、低温（例えば 10 K）でも速い気相反応で生成する分子は、両銀河で多いことがわかった。一方、高温でのみ速い反応、及び塵の上の反応で生成しやすい分子は、NGC 253 では多く存在するが M 82 では検出されない（存在量が少ない）ことがわかった（表1参照）。このため、NGC 253の方がM 82よりも実際に温度が高いか、または温度に大きな差が無くても、より大きな高温領域を持つ可能性が考えられる。そこで、分子組成の違いの原因を解明するために、ガスが多く存在し近くにある他の銀河の分子組成を調べ、その中でNGC 253の分子組成が特異なのかM 82が特異なのか、を検討した。

3. 近くの銀河の中での M 82 の分子組成の特異性

NGC 253 と M 82 の分子組成の違いを特徴付けている6分子（SO, NH₃, SiO, HNC, CH₃OH, 及び CH₃CN）について、色々な文献からの情報、及び我々の観測に基づいて、ガスが多い近くの銀河での検出状況を表2にまとめてみた。簡潔に示すために、同程度の感度による観測での検出、未検出のみ記した。この表から、M 82 よりも活動度が高いとは言えず、またガス量が少ない IC 342 及び Maffei 2 などで、6分子の検出例があることがわかる。従って、何らかの理由で近くの銀河の中で M 82 の分子組成が特異である可能性が高くなった。



図5：系外銀河 Maffei 2 の波長 2 ミクロンの赤外線であらえた姿

天球上で天の川に重なって見えるので、塵による吸収が少ない赤外線の方がはっきりと見える

(2 Micron All Sky Survey より: NASA 及び NSF の予算によるマサチューセッツ大学と IPAC/カリフォルニア工科大学の共同プロジェクト)

4. ガスが多い近くの銀河 Maffei 2 及び M 51 でのアンモニア観測：M 82 の特異性を支持

M 82 の分子組成の特異性をさらに実証するためには、表2をできる限り完成させることが必要である。その一環として、我々はガスが多い近くの銀河 Maffei 2 及び M 51 などでアンモニア（図4）の観測を行なった。

Maffei 2（図5）の観測は野辺山 45 m 電波望遠鏡で2000年6月初旬に9日間にわたって共同利用観測として行なった。一般に毎年11月ごろから宇宙電波の観測シーズンが始まるが、この6月ごろになると気温、湿度とも上昇し、大気による電波の減衰が大きくなるため、梅雨入りと共に観測シーズンは終了する。アンモニアのスペクトル線は23 GHz という電波天文としては比較的低い周波数にあり、この時期でもベストではないが観測が可能である。

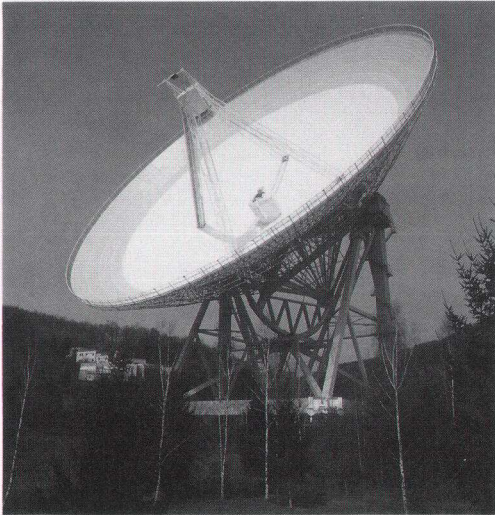


図6：ドイツのマックスプランク電波天文研究所の直径100 m電波望遠鏡
ボン近郊のエフェルスベルクにある

4.1 気長な観測

系外銀河からのスペクトル線は、存在量の多い一部の分子からのものを除いてかなり弱い。大まかに言って、CO分子で電波強度が数K（電波天文では強度を温度スケールに換算して表示するのが一般的である）ある場合でも、我々が観測する分子の場合は高々数十mKである。1日10時間近くの観測時間をもらってデータを蓄積したとしても、スペクトル線がかろうじてあるかなーという程度に終わることが多い。それを何日も繰り返してさらにデータを蓄積し、何とかものになるデータが得られれば成功である。当然ながらものにならない場合もある。このように観測には気長さが求められる。少なくとも私の性格にはあっている部分があるから続けていられるのだろう。

4.2 ボンの研究グループと競合する

Maffei 2での観測は順調に進み、アンモニアのスペクトル線の検出が確認された。ところがその

観測の8日目にとんでもない電子メールがきた。それは、ボンのマックスプランク電波天文研究所の研究者からのもので、彼らのグループで最近Maffei 2のアンモニアをボン近郊のエフェルスベルグにある直径100 m電波望遠鏡（図6）で観測しており、すでに論文を執筆中だという!!! これにはびっくりするとともに、納得できないものを感じた。なぜなら、我々はMaffei 2も含めたいくつかの銀河でのアンモニアの観測をこの直径100 m電波望遠鏡でも行なうことが決まっていた、6月下旬にエフェルスベルグへ出張する予定だったからである。なぜ同じような観測を2つのグループに割り当てたのだろう。

幸い野辺山の観測データはものになり、アンモニアの3本のスペクトル線[$(J, K) = (1,1), (2,2),$ 及び $(3,3)$ と呼んでいる。JとKは回転の速さを示す数]を検出することができた（図7）。そのため、マックスプランクのグループと張り合って、我々でも論文を書くことが可能となり、データを生かせることになった。スペクトル線は弱く、天体上での実質的積分時間として約32時間をかけた。

6月下旬のボン及びエフェルスベルグへの出張は予定通り行なった。目的はMaffei 2以外の銀河でのアンモニア観測、今回の件について現地で所長らとの話し合い、そして競合しているMaffei 2の問題についてどうするかをその研究者と相談、の3つであった。このようなやりにくい仕事のため、重苦しい気持ちでボンに向かった。ボンに着いてみるとかなりの猛暑で、あわてて買ったTシャツを着た。現地の日本人の間では以前から面白い(?)ことが言われていて、ボンは盆地なのだそうである。このような猛暑の時に来ると、無条件に信じたくなる。ボンでは、マックスプランク電波天文研究所の所長、及び望遠鏡時間割り当ての責任者に今回の件で抗議した。プロポーザル内容をデータベース化していないから…などの言い訳をされ、あまり明快な謝罪というものはない（ドイツ人は日常生活で一般になかなか謝らない国民性と言われて

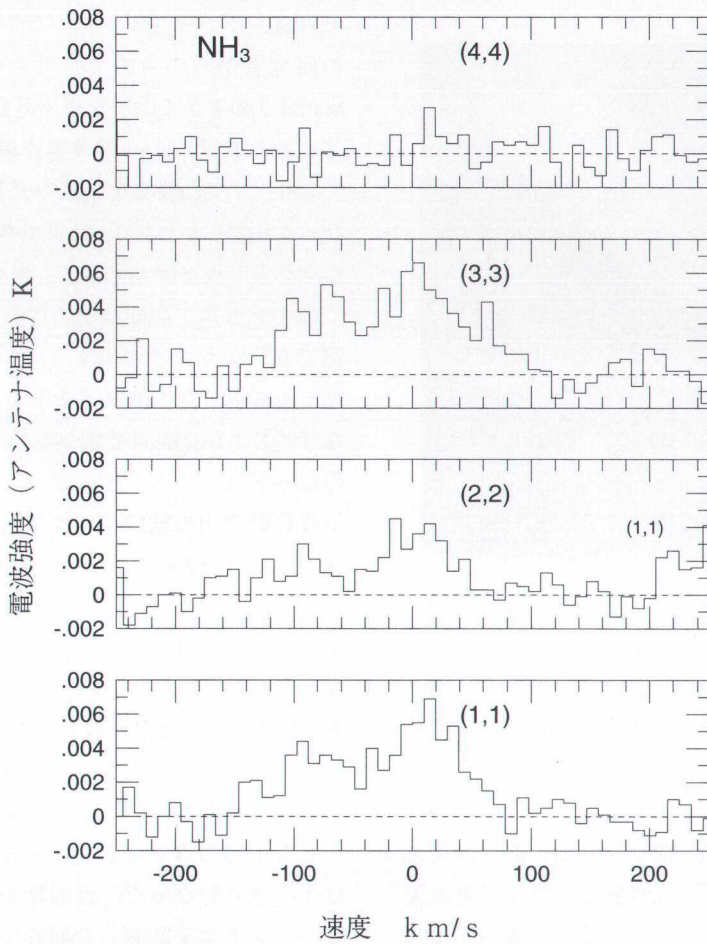


図7：系外銀河 Maffei 2 でのアンモニア分子のスペクトル線⁶⁾
 横軸は周波数に対応するが、ドップラー効果を利用して我々に対する速度として表示している。縦軸は電波強度である。

いるが…。また、ボンの研究者とはお互いのデータの出版についてどうするかを相談した。その結果、独立に論文にすることになり、2000年中に両グループの論文が出版された^{6), 7)}。さらに余談となるが、マックスプランク電波天文研究所は、施設、人員とも豊かな研究所で、これまでに多くの成果を出している。ボンの研究者と話をしているうちに、お互いの研究環境のことも話題になったが、自分の時間のかなりの部分(75%以上)を研究に専念して使えるとのことである。これには、元々少ない

人員が最近さらに減り、やりくりで苦勞している野辺山の状況と比べて率直にうらやましく思った。

4.3 エフェルスベルクで M 51 からのアンモニアを検出する

エフェルスベルクでは Maffei 2 を観測する意味がなくなったので、観測提案書に書いておいた中から結局近くにある M 51 という銀河を主に観測することとした。長時間の観測であったが、望遠鏡のオペレーターの人が 24 時間(8 時間 3 交代)ついて

表3 近くの銀河でのアンモニアの存在量^{a)}

銀河	アンモニアの量 (柱密度 ^{b)}) (cm^{-2})	水素分子に対するアンモニア存在量の割合
NGC 253	6×10^{15}	3×10^{-8}
M 82	$< 2 \times 10^{14}$	$< 1 \times 10^{-9}$ (5×10^{-10})
IC 342	1×10^{15}	3×10^{-8}
Maffei 2	2×10^{15}	1×10^{-7}

a) 我々のデータに基づく。カッコ内の値は文献10による。

b) 断面 1 cm^2 の柱を天体まで伸ばした時に、その中に存在する分子の数を用いて分子の量をあらわしている。

いてくれるので、なんとか進めることができました。その結果、アンモニアははっきり検出されたが、装置の不具合もあり、観測はまだ完結していない。観測継続の提案書が採択されているので、近いうちに再度観測し、完結させたい。

近くの銀河でのアンモニアの存在量をまとめたのが表3である。M 82の上限値は他と比べて有意に小さい。特にMaffei 2でのアンモニアの存在量は、M 82での存在量の上限値よりも2ケタ近く大きく、M 82での分子組成の特異性を支持する結果となった。また、HNCO及び CH_3OH についても、M 82での存在量は低く(表2)、分子の生成反応の観点から見てM 82の分子組成は系統的に特異であると結論した。このように、比較的マイナーな分子を観測することにより、COなどの多量にある分子では窺い知れないM 82の特異な分子組成を明らかにできた。

5. M 82の特異な分子組成の原因

特異な分子組成の原因はまだ十分にはわかっていないが、約2億年前に起きたM 81との接近(相互作用)⁸⁾で大きな影響を受けたことが解明の鍵となると考えている。この相互作用の際にM 82は大量のガスを受け取り、その後爆発的星形成を開始したと考えられている。M 82の分子組成に影響を与えた要因として、我々は密度及び温度(活動性)

の違い、塵の量及び塵のマントル量の違い(塵は核となるシリケートなどの部分と、核を覆っている各種の分子の層からなっていると考えられ、分子の層をマントルと言っている。これが蒸発すると、多くの分子が気相へ放出されることとなる)、分子雲の進化段階の違い、などを検討してきた。表1と2の所で触れたように、もし、M 82の温度(活動性)が、近くの銀河の中で相対的に低いということがあれば、特異な分子組成は説明しやすい。分子組成を見ている限りはそのような結論を出したくなる。または、M 82で塵の上での反応が相対的に活発でないならば、SOを除く他の5つの分子について、M 82での低い存在量が説明しやすい。これは、低密度であったり、塵のマントル量が少ないと起こりうる。塵の量自体がかなり少ない可能性は、観測的な証拠から否定されると考えている。

6. アンモニアについてもう少し⁹⁾

ここで取り上げているアンモニアには、23 GHz付近に回転の速さが異なる状態のスペクトル線が多く存在する。そのため、温度などの物理量を出すためにも役立つ分子として、電波天文ではよく使われている。Maffei 2の場合、アンモニアから求めた温度は約30 Kであった。一方、低温の暗黒星雲の温度は一般に約10 Kである。今回の観測はMaffei 2の中心領域を十分覆ってしまうほど大きな

視野の観測であるが、そのような大きな領域での平均的な温度として、すでに 30 K あるということは、Maffei 2 のガスが星形成などにより暖められていることを示している。また、今回これまで触れなかったが、アンモニアは等価な水素原子核を 3 つ持つために (図 4)、実質的に 2 種類のアンモニア分子が生じる。オルソ・アンモニアとパラ・アンモニアである (核スピン多重度という値が異なる)。この両者は、衝突及び電磁波による遷移で移り変わらないため、オルソとパラの比はアンモニアができたときの情報を含んでいると考えられる。そのため、オルソとパラの存在量の比を Maffei 2 で求めてみたところ、オルソ/パラ = 2.6 [上限値 3.7, 下限値 1.8 (3 σ)] となった。もし、アンモニアが気相反応で生成しているとする、大きな反応熱が出るため、統計的な比である 1 となることが期待されるが、今回の値はそれより大きく、何らかの低温過程 (塵が生成に関与していると低温である可能性がある) が関わっていることを観測的に示唆している。

7. 再び M 82 のアンモニア

ところで最近、M 82 で弱いながらもアンモニアを検出したという論文が出版された¹⁰⁾。水素分子に対する存在量は 5×10^{-10} であり、表 3 の我々の上限値と矛盾しない小さな値である。この結果も、ボンのグループのエフェルスベルグでの観測によるものである。

8. 今後の課題

今後とも表 2 を埋めていき、近くの銀河での分子組成の全容を明らかにしたい。その過程で M 82 の特異な分子組成の原因についてもさらに明らかになるだろう。また、電波干渉計を用いて高い空間分解能の観測を行ない、銀河内の分子の分布を押さえながら議論することも重要であり、今後進めていきたい方向の 1 つである。多くの分子については強度が弱いので、チリに建設が計画されている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), <http://www.nro.nao.ac.jp/~lmsa/index.html>] の実現に大いに期待したい。

謝 辞

ここに記した研究の全部または一部は、中井直正氏、川口建太郎氏、鷹野敏明氏、Gisbert Winnewisser 氏、Peter Schilke 氏との共同研究であり、感謝したい。また、関連する望遠鏡の運用に携わっている全ての方に感謝する。

参 考 文 献

- 1) Mauersberger R., Henkel C., 1991, A&A 245, 457
- 2) Nguyen-Q-Rieu, Henkel C., Jackson J.M., Mauersberger R., 1991, A&A 241, L33
- 3) Henkel C., et al., 1987, A&A 188, L1
- 4) Mauersberger R., et al., 1991, A&A 247, 307
- 5) Takano S., Nakai N., Kawaguchi K., 1995, PASJ 47, 801
- 6) Takano S., Nakai N., Kawaguchi K., Takano T., 2000, PASJ 52, L67
- 7) Henkel C., et al., 2000, A&A, 361, L45
- 8) Cottrell G.A., 1977, MNRAS 178, 577
- 9) Ho P.T.P., Townes C.H., 1983, ARA&A 21, 239
- 10) Weiss A., et al., 2001, ApJ 554, L143

Observations of Various Molecules in Nearby Gas-rich External Galaxies

TAKANO SHURO

Nobeyama Radio Observatory

Abstract: Among stars various matters are floating. They are called interstellar matter. They are consumed in a process of star formation, and they are supplied by red giants and supernovae. Interstellar matter consists of atoms, molecules, and dusts, which make a rich world of chemical reactions. We can know its compositions, reactions, and relations to astrophysical phenomena by investigating interstellar matter. This time we are going to introduce our researches of interstellar matter in external galaxies. We found systematic peculiarity of molecular abundance in M 82 regarding the formation mechanisms.