

## シリーズ

「宇宙と原子」  
 第六回 星間分子  
 —希薄で冷たい宇宙空間にもさまざまな分子がある—

市川行和

yukitikawa@nifty.com

平成 24 年 12 月 25 日原稿受付

星と星の間の空間は、決して真空ではなく、ガスと固体微粒子から成る星間物質で充たされている。その密度の相対的に大きいところは星間雲と呼ばれている。中でもやや高密度( $10^2$ - $10^6$   $\text{cm}^{-3}$ )で低温(10-100 K)のところは主に水素分子から成っており、星間分子雲と呼ばれて、星形成の現場である。星は星間物質が自己重力で収縮することにより形成されるが、収縮に伴う圧力の上昇を抑えるには原子分子(特に分子)による放射冷却が欠かせない。また厳密にいうと星間雲ではないが、ある種の星のまわりにはその星から放出された物質や、星の形成の際に取り残されたガスや微粒子が取り巻いており、星周外層(circumstellar envelope)と呼ばれている。ここにも分子が存在し、その振る舞いは星間分子雲の場合と同じであり、しばしば一緒に議論される。

分子雲には水素分子のほかにもさまざまな分子が見つかった(現在 180 種程度が確認されている) [1]。温度が 10 K 程度でも励起可能なのは分子の回転状態である。分子の回転状態間の遷移に伴うマイクロ波(主としてミリ波)の吸収・放出を観測することで、分子の検出が行われる。これには地上の電波望遠鏡が用いられる。軽い分子(水素分子や水)の低い励起状態の検出にはサブミリ波や遠赤外光の観測が必要になる。その場合は大気中の水蒸気による吸収を避けるために、高地にいかか、人工衛星などを用いて地球大気の外へ出なくてはならない。なお、一部の分子は赤外や可視光の観測でも確認されている。

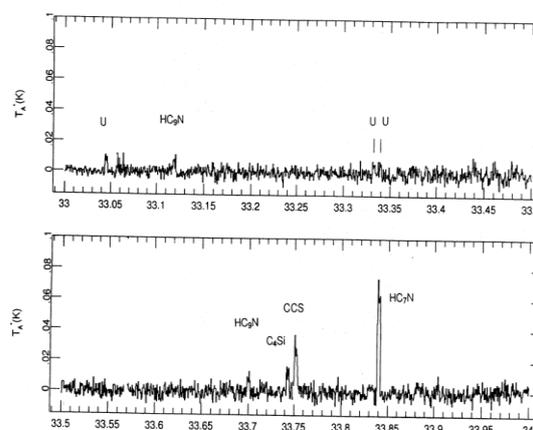


図 1: 野辺山電波望遠鏡を用いて観測された星 IRC+10216 の外層の電波スペクトル(の一部)。いくつかの分子輝線が記録されている。記号 U は観測当時未同定だったもの。横軸は周波数(GHz 単位)、縦軸はアンテナ温度で受信波の強度に相当する。(文献 [2] より転載)

星間分子のスペクトルの一例を図 1 に示す。これは星周外層 IRC+10216 の分子スペクトルで国立天文台野辺山の電波望遠鏡を用いて 28-50 GHz を掃引観測したものの一部(33-34 GHz)である [2]。いくつかの分子の輝線が見えるが、対応する分子が観測当時不明のものもあり図では U と書いてある。これについては後で述べる。

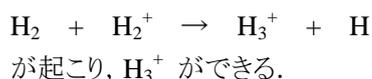
星間雲中で分子を作るには次の条件が必要である:

- ① 密度が低いので 2 体衝突に限る
- ② 発熱反応で、活性化エネルギーがゼロあるいはきわめて低いもの

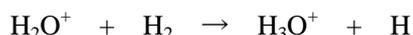
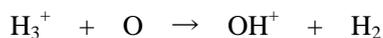
これらの条件をみたすのは2体のイオン・分子衝突であるが、一部の中性原子分子反応(特にラジカルの関与するもの)も低温で大きな反応速度定数をもつ。現在主流になっている星間分子生成のシナリオは次のようなものである:

- (1) 圧倒的に多い水素原子が後述の方法で水素分子になる。
- (2) 宇宙線粒子との衝突で水素分子がイオン化する。

- (3)  $\text{H}_2$  気体中で  $\text{H}_2^+$  ができると直ちに



- (4)  $\text{H}_3^+$  を種にしてさまざまな分子の形成が行われる。たとえば,



により水分子が作られる。

水素分子を水素原子から2体衝突でつくることは不可能ではないがきわめて効率が悪い。そこで現在では、星間雲のなかでの水素分子生成は固体微粒子の表面で行われると考えられている。この反応は効率が良く(一種の3体衝突)、微粒子の量は少なくとも十分な数の水素分子を作ることができる。なお現在では、水素分子以外の分子(たとえば上記の水分子)でも固体表面での反応が重要であるとされている(詳しくは文献 [1] を参照)。

これまでに多数の分子が星間雲(および星周外層)で発見されているが、その中には分子の正イオンも相当数含まれている。しかし、負イオンは見つかっていなかった。分子の中には電子親和力が大きいものがあり、自由電子も存在するので、当然負イオンがあることが予想されていた。見つからなかったのはひとえに負イオンが出す電波の波長が正確にわかっていなかったからである。しかし2006年, McCarthyら [3] は先に紹介した IRC+10216 で負イオン  $\text{C}_6\text{H}^-$  を見つけた。彼らはまず実験室で  $\text{C}_6\text{H}^-$  を作ってその回転スペクトルを詳しく測り、その波長のところを NRAO(アメリカ国立電波天文台)の電波望遠鏡で観測することにより初めての負イオンをみつけたのである。

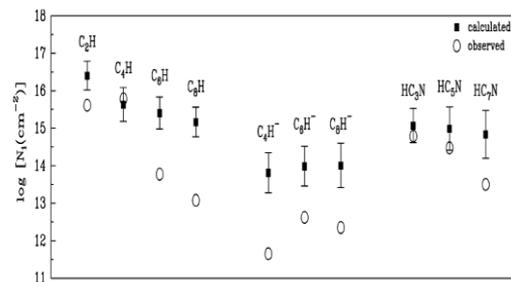
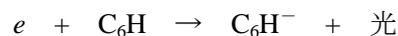


図 2: 化学モデルによる計算と観測値との比較の例。星周外層 IRC+10216 で観測されたいくつかの分子および負イオンについて比較したもの。縦軸は柱密度を表す。○は観測値, ■は化学モデルの値。詳細は文献 [1] を参照。(文献 [1] より転載)

実験室で決めた  $\text{C}_6\text{H}^-$  の回転定数は 1336.86 MHz で、それを使うと図 1 で未同定であった輝線のいくつか(たとえば、図 1 の上図左端 33.04 GHz にあるもの)を説明できる。つまり約 10 年前に Kawaguchi らが発見していたものであった。この負イオンの生成は放射性電子付着



によると考えられている。実際  $\text{C}_6\text{H}$  の電子親和力はかなり大きく(3.8 eV)、この反応速度定数は計算 [4] によると 10 K で

$$k = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

である。なお、実験値はまだ報告されていない。現在ではほかにもいくつかの負イオンが観測されている。

星間雲中の分子は互いの反応を通じてその組成を変化させる。その時間変化を、反応方程式を時間的に解くことでシミュレートすることを、星間雲の化学モデルと呼ぶ。化学モデルは分子雲の構造を理解するうえで重要な役割を果たすが、さらには、星間雲から星形成に至る過程の研究の一部となる。世界中でいくつかのグループが組織的に化学モデルの研究を行っている [1]。たとえば、マンチェスター大学のグループは 420 の分子種(原子やイオンを含む)について 4600 程度の反応式を考えそれらを連立して解くことができる。また、オハイオ州立大学のグループのモデルの最新版は 468 の分子種について約 6000 の反応式を考慮する。ただし、これらのモデルで使われる反応速度定数のうち実験で求められたも

の(特に分子雲に必要な 10 K 程度での値)は極めて少ない. 理論値もそれほど多くはなく, かなりものは経験的(“chemical intuition” と称する)に決められたものである. 特に微粒子表面での反応についてはほとんどが推定値である.

モデル計算と観測値の比較の例を図 2 に示す. これは前述の IRC+10216 での観測の一部を説明するもので, 観測値とモデル計算の値を比べている. 計算には上述のマンチェスター大学のモデルを用いた. 図には, 観測値と較べやすいように, 密度を視線方向に積分したいわゆる柱密度(単位面積当たり)を示している. 計算値の方に誤差棒がついているのは, 使われた反応速度定数の精度を考慮して決められた計算結果の不確かさである. それを考慮しても観測との一致は良くない. その原因は, 用いた反応速度定数の精度の見積もりが悪いのか, 考慮されていない重要な反応があるかであろう. 関連する原子分子研究の一層の進展が望まれる.

最後に昨年完成したアルマ望遠鏡について触れておこう. これはチリの標高 5000 m にあるアタカマ高地にあるもので, 66 台のパラボラアンテナを組み合わせた電波干渉計である. 日本の国立天文台などが参加する国際プロジェクトである. ミリ波, サブミリ波で観測し, 高い感度と高精度の位置分解能を誇る. 分子輝線や固体微粒子の熱放射を使って天体の微細構造を調べるのが主な目的である. また場所による存在分子の違いから, 物質の進化についての情報が得られる. 今まで見えなかった世界が, 星間分子を通じて見えるようになることが期待される. 関連する原子分子の研究の役割も増すに違いない [5].

[5] アルマについては <http://alma.mtk.nao.ac.jp> を参照のこと.

## 参考文献

- [1] V. Wakelam et al., *Space Sci. Rev.* **156**, 13 (2010). 化学モデルについての総説であるが, 星間分子の一覧表も掲載されている.
- [2] K. Kawaguchi et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **47**, **853** (1995).
- [3] M.C. McCarthy et al., *Astrophys. J.* **652**, L141 (2006).
- [4] E. Herbst and Y. Osamura, *Astrophys. J.* **679**, 1670 (2008).