

双極分子流天体のアンモニアスペクトル線観測

——西ドイツ滞在記に代えて——

鷹野 敏 明*

1. はじめに

1983年12月から85年9月まで、アレキサンダー・フォン・フンボルト財団の奨励研究員として西ドイツケルン大学第一物理学研究所、ギスベルト・ヴィネヴィッサー教授のグループで研究に従事した。目的は、ケルン大学で建設している3mミリ波、サブミリ波電波望遠鏡に、名古屋大学での1.5m, 4m鏡建設の経験を生かして貢献することと、ボンのマックスプランク研究所(MPI)100m電波望遠鏡を使って双極分子流天体の観測をすることであった。

2. ケルン大学の電波天文グループ

ケルンはライン河沿い、ボンの北約50kmに位置する大都市である。ケルンで最も有名なのはオーデコロンと中央駅の前に黒々とそびえ立つ大聖堂である(図1)。はじめてケルン駅に着き駅舎を出て大聖堂と向かい合った時、その大きさに本当に圧倒されたものだ。ケルンは第二次世界大戦で最もひどく破壊された町で、大聖堂も、高くそびえ立つ尖塔こそ残ったものの、被害はひどかったようで、今でも外壁には点々と弾痕が残っている。

大聖堂から南へ車で10分、町を取り囲む緑地帯に接してケルン大学がある。学生数5万人のマンモス大学である。ヴィネヴィッサー氏のグループは理学部にある4つの物理学研究所の1つに属していて、実験室でミリ波及び赤外レーザーを用いて分子分光を行っているグループと3m鏡建設を行っている天文グループから成っている。このグループはヴィネヴィッサー氏が5年前にボンのMPIから移って来て創設したグループで、歴史は浅いが大変アクティブである。私が行った当時の陣容は、実験室グループは7人(その内、日本で言う大学院生4人、これについては後述)、天文グループは受信器フロントエンド5(4)人、分光系などのバックエンド4(4)人、エレキ専門家2(1)人、ソフトウェア2(2)人、コンピュータハードウェア2(1)人、天文屋3(1)人という構成で、ドイツの大学の一研究グループとしては例外的に大きく、また予算総額もとび抜けて大きいグループである。

グループの陣容を書いたところでドイツの大学のシス

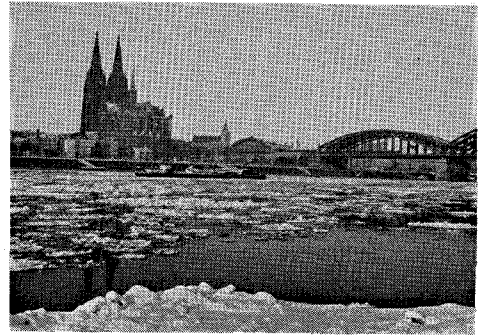


図1 氷の浮かぶ冬のライン河とケルン大聖堂(絵はがきより)。去年の冬は記録的な大寒波だった。

テムについてふれなければならないだろう。ドイツでは大学院という制度はない。修士号を取りたい学生は大学で4~5年学び必要な単位を取った後、希望する研究室の門をたたく。研究室はその学生を受け入れるかどうかを口頭試問などで決める。受け入れが決まれば研究室はその学生を給料を払って雇う。給料の額は修士号を取る準備を進めている人で助手の4分の1、博士号の準備をしている人は2分の1程度で、その出所は大学の助手のポストを分割して使ったり、ドイツ科学協会から獲得した科研費のうちの人件費分である。だから科研費を多く獲得しているグループは日本で言う大学院生も多いわけである。修士号及び博士号を取得するのに必要な年限は特に決められてはいないが、だいたい日本と同じである。私の滞在中に修士号を取った人は5人、博士号は8人であり、そのうちの3分の2は企業や他の研究機関に転出して行った。

日本の大学院生にあたるこのような人達が給料をもらって研究を行っているというドイツ特有の事情があるにしても、装置関係の仕事に専門にしている人の比率が高いことに驚かされる。日本の天文関係の研究室あるいは研究所で、これほどの率で装置の専門家を配置しているところがあるだろうか。装置関係の仕事の多くは天文屋が行っているのが現状だろう。しかしケルンで驚くのはまだ早い。ボンのMPIでは200人近いスタッフのうち天文屋は5分の1程度で、あとは皆アンテナ、受信器などの専門家である。観測装置の自家開発が腰を落ち着けてやれる所以である。

ケルンのグループの主プロジェクトは3mミリ波、サブミリ波望遠鏡である(図2)。この望遠鏡は名古屋大学の4m望遠鏡と同じく1983年頃に建設が開始され、当

* 東京天文台 Toshiaki Takano: Observations of Bipolar Flow Sources in Ammonia lines—As a Report on a Stay in Germany—



図2 ケルン大学 3m ミリ波、サブミリ波望遠鏡。

初から双方が協力し合って進められている。83年末には名古屋大学の協力により音響光学型分光計が導入された。名古屋大学在籍中、私は1.5m及び4m鏡の音響光学型分光計の製作を行ったので、ケルンでもその導入に貢献する予定だったが、前述したようにそれを専門にする大学院生がいて、バックアップはほとんど必要なかった。

3m鏡には現在周波数70-90GHzのショットキーダイオードミキサーを使った受信器が搭載されている。その他に実験室で115GHz用のダイオードミキサーと140GHz用の超伝導を利用したSISミキサーの実験が行われつつあり、1年後にはこれら受信器を使った観測が始まる予定である。さらに230GHzのミキサーと300GHz、450GHzのポロメータの開発が進められている。

このような高い周波数の観測を行うにはケルンはあまりにも天気が悪い。なにしろ一年中実中小雨の日が多いのである。冬などは丸1ヶ月間太陽にお目にかかれないことがある。これはヨーロッパ中(南欧以外)だいたいそうで、私はケルンに住んで本当にヨーロッパの人達はこんなところでよくミリ波観測をやってるなあと感心し、その執念に敬服した。そのようなわけでサブミリ波観測までを目指しているケルンの3m鏡は1985年秋から86年春にかけてアルプスの標高3000mのピーク、ゴナグラートに移される。ゴナグラートでは、山頂付近にあるホテルの一部を借りて屋上のドームに3m鏡を入れる予定である。そこは晴天日数が年間300日で標高が高いため空気中の水蒸気量は大変少なくなり、サブミリ波観測には条件の良い場所である。付近がスキー場なので、冬でももちろんツェルマットからロープウェイ

で上がることができる。向かいにはマッターホルンをはじめアルプスの山々が見渡せるということで、まだ私は行ったことがないが、完成したら是非訪れたいと思っている。

ケルンのグループを紹介する最後に、3m鏡の立ち上げについて日本での電波望遠鏡立ち上げと比較して感じたことを書いておきたい。まず私が最も強く感じたことは、製作した装置の特性評価を実にしっかりやっているということである。例えば音響光学型分光計では、我々が名古屋でやったのよりかなりきびしい雑音劣化の制限を課して、その達成に向けて特性測定と電源安定化、アンプの改良などを重ねていた。これは名古屋が一酸化炭素(CO)、シアン化水素(HCN)などの比較的強い分子線による銀河系内星間分子雲の広域観測を主なねらいとしているのに対し、ケルンでは未発見の弱い分子線の検出をも想定しているからではある。だがその背景には、やはり装置の専門家が開発、製作を行っているということがあるだろう。日本のように天文屋が装置作りをやる場合、どうしても早く観測したいがために、詳しい特性測定などを省略したりする。その点ドイツでは装置の専門家がやるので、彼らの成果は装置の性能として表現されるわけで、特性測定を省いたりはない。

ただしドイツのやり方にも欠点はある。仕事は着実に進んで行くのだが天文学的結果を得られるようになるまでが長いのだ。私がケルンに行った当初、すでに70-90GHzの受信器は稼動していて、フィルターバンク型の分光計が使用でき、対象を選べば星間分子雲の観測が可能であった。しかしその後の音響光学型分光計の導入と受信器の改良などで、それに伴う試験的観測は行ったが、結局私が帰るまでとうとう天文学的結果が引き出せるような本格的観測には至らなかった。しかし考えて見れば、彼らはケルンをテストサイトと思っており、ゴナグラートに移した後に、色々な周波数帯域で対象に合わせて自由に分光計を選択して、本格的観測を行うつもりでいるわけで、むしろこちらの方がせっかちなかも知れない。

3. 西ドイツでの双極分子流天体の観測的研究

双極分子流天体は生成初期の星から反対方向に高速度で噴出する2つの分子雲を伴う天体である(天文月報1984年第77巻第11号、川辺らの記事を参照)。双極流天体に関して重要な問題はどのように双極分子流は高速度に加速されるのか、そしてなぜ双極方向に収束されているのかということである。加速の機構について観測的にわかっていることは、中心星から放射されている光のエネルギーで双極分子流のエネルギーをまかなうことができるが、光の輻射圧で分子流を加速するには運動量が

足りないということだ。従って分子や原子のガスが直接効率良く加速されるような何らかの機構が期待されている。

一方、双極流の収束機構については、最近いくつかの双極分子流天体についてその中心星のまわりに発見されて来た高密度分子雲が手がかりになりそうである。メキシコのトラレスらは、米国ヘイスタックの 37 m 鏡を用いて、いくつかの双極流天体についてアンモニア (NH_3) の回転準位 (J, K)=(1, 1) での 24 GHz 反転遷移線を空間分解能 1'4 で観測した。 NH_3 のこのスペクトル線は、分子雲のうち水素分子密度が 10^4 個/cm³ 以上の比較的高密度領域でのみ輻射を出すことから、分子雲中のどこが高密度なのかを知ることができる。観測の結果、ほとんどの天体で NH_3 の分子雲は双極流に垂直方向に伸びていることを発見し、この高密度分子雲が中心星からの分子流の赤道方向への流れを妨げ、双極方向に収束していると考えた。

これに対して我々の結果は違っていた。我々は 1983 年に行われた東京天文台野辺山の 45 m 鏡第一次共同利用観測で、一硫化炭素 (CS) の回転準位 $J=1 \rightarrow 0$ 遷移線の観測を空間分解能 30" で行った。そして NGC 2071 と GL 490 で双極流に垂直方向に伸びた CS の高密度分子雲が存在するものの、その質量は小さく、双極流を収束しているなら当然見えるはずの反作用が小さいことから、この高密度分子雲は収束に寄与していないことを示した。

さて、双極分子流天体におけるこのような問題を解くためには、まず中心星のまわりの高密度分子雲の質量、温度、運動などを詳しく調べることが重要である。MPI ボンの 100 m 鏡を使って NH_3 線の観測を行うことは、現時点で最もこの目的に適した有効な方法だろう。なぜ

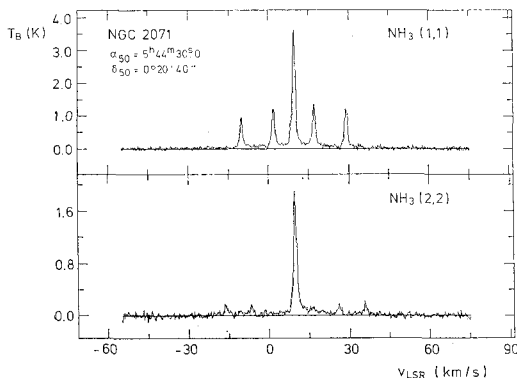


図 3 マックスプランク研究所ボンのエッフェルスベルク 100 m 電波望遠鏡で観測した、双極分子流天体 NGC 2071 のアンモニア (NH_3) 回転準位 (J, K)=(1, 1) と (2, 2) の反転遷移線スペクトル。速度幅 20 km s^{-1} に及ぶ弱い輻射が認められる。

なら、(i) アンテナ口径が大きいので、空間分解能が 40" と高い、(ii) NH_3 線は前述したように分子雲の高密度領域から放射される、(iii) 窒素 (N) の核スピンによって、5 本の超微細構造線が観測され (図 3)、それらの強度比から NH_3 線の光学的厚みが精確に決定でき、 NH_3 分子の柱密度が算出できる、(iv) すべての回転準位 (J, K) において反転遷移線が周波数 24 GHz 付近に来るため、いくつかの回転準位の線、とりわけ 100 m 鏡では (J, K)=(1, 1) と (2, 2) の線 (図 3) を同時に観測することが可能で、その強度比から分子雲の温度が決定できる、(v) 100 m 鏡の 24 GHz 帯の受信器は世界で最も雑音温度の低い、すぐれた性能を持っている、からである。特に (iii), (iv) は NH_3 特有の性質から来るもので、CS などで柱密度や温度を決めるためには、全く異なった周波数帯にある複数の線を観測しなければならないのに対して、 NH_3 では 1 つのアンテナによる 1 回の観測で求められるわけだ。そこで我々は 83 年 12 月に 100 m 鏡での双極分子流天体 NGC 2071, GL 490, HH 7-11, CRL 2591 の観測申し込み書を提出した。

西ドイツでは双極分子流天体に注目している天文屋は多いが、その観測に集中しているのはハイデルベルク MPI のムントら光学天文の人達ぐらいで、電波天文屋ではあまり専念している人はいない。一般的に言ってそれまでの自分のテーマを大切に、新しい話題に皆が殺到するようなことはないように私には感じられた。そのようなこともあって、我々の観測申し込みは 1 月の審査会で受諾された。

次の関門は待ち時間であった。ケルン大学でやはり 100 m 鏡を使って観測を行っているトム・ポールスやユルゲン・シュトツキに聞くと、23 GHz は特に観測申し込みが混雑していて、審査委員会で受諾が決定してから実際に観測時間が来るまで、うまく行って 10 カ月、普通は 1 年以上待たされると言う。これは本当にショックだった。1 年経ったら帰る頃になってしまう。ところが幸いにして、2 月にケルン大学のハンス・ウンゲレヒツが観測時間をもらったのだが、彼はちょうどその頃にコロンビア大学の 1.2 m 鏡で観測するためにニューヨークに行かなければならないと言う。そこで我々の観測を割り込ませることができた。こうして我々は 84 年 2 月、10 月、85 年 2 月、3 月と計 60 時間の観測を行うことができた。

4. 観測の成果

一連の観測でわかったことを簡単にまとめると次のようになる。

4.1. 高密度分子雲の役割

まず問題の、双極分子流天体中心星周囲に見つかって

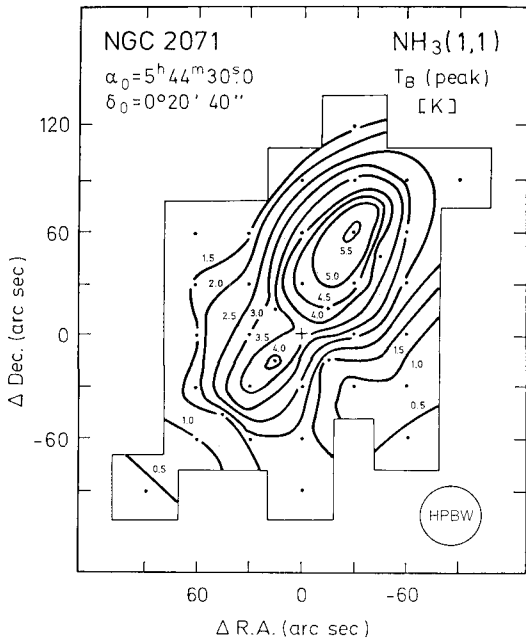


図4 NGC 2071 の NH₃ (1,1) 線の強度分布.

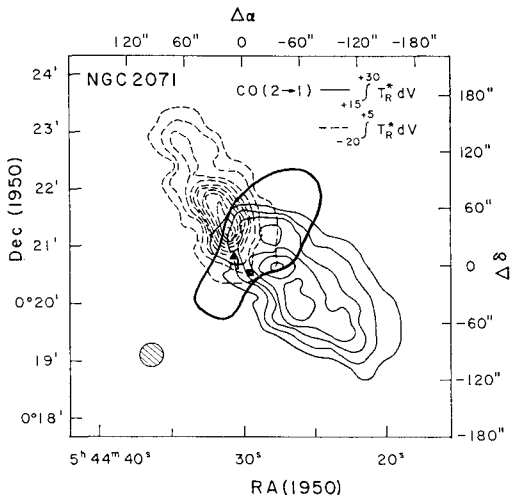


図5 一酸化炭素 (CO) 線で観測した NGC 2071 の双極分子流の分布 (Snell ら, 1984 による). NH₃ (1,1) 線で見える高密度分子雲 (太線) は双極分子流に垂直方向に伸びている.

来ている高密度分子雲であるが、観測した4つの天体のうち、GL 490を除く3つで見つかり、NGC 2071 と HH 7-11 ではそれが双極分子流に垂直に伸びた構造をしていることがわかった (図4, 5, 6, 7).

それではこの高密度分子雲がトラレスらが主張するように双極分子流を収束しているのだろうか。答えはノーである。なぜなら NGC 2071 で NH₃ 線を詳しく解析した結果、双極流の作用でこの高密度分子雲から引きはがされて拡散しつつある分子雲が見えたからである。この

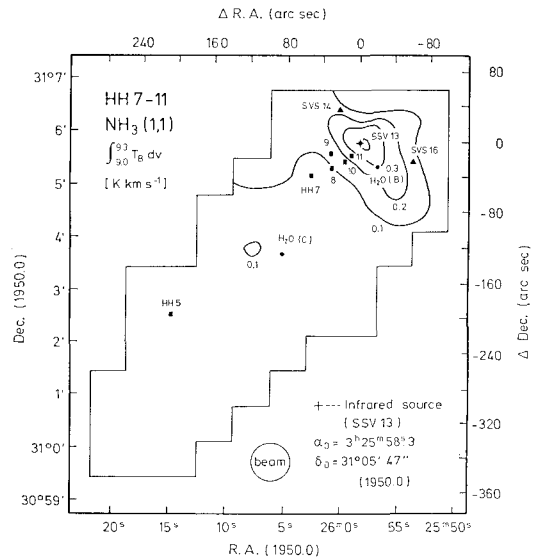


図6 HH 7-11 の NH₃ (1,1) 線 9.0 km s⁻¹ 成分の分布.

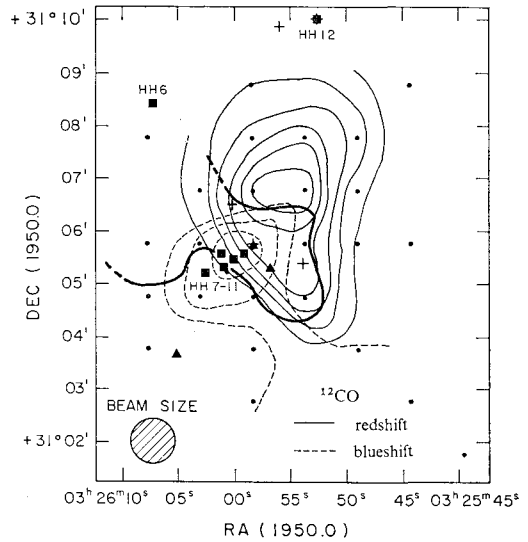


図7 HH 7-11 の CO 双極分子流の分布 (Snell and Edwards, 1981 による). NH₃ (1,1) 線で見える高密度分子雲 (太線) は、やはり双極分子流に垂直方向に伸びている.

分子雲の存在は双極流と高密度分子雲の相互作用を示す直接の証拠であるが、CS の場合と同様に高密度分子雲が双極流を収束している反作用には吹き飛ばされ方がまだ少なすぎるのである。

ではなぜこれらの高密度分子雲は双極分子流に垂直に伸びているのだろうか。これについて我々は高密度分子雲のもっと内部、おそらく中心星の近傍で既に何らかの機構により双極方向に収束された分子流が、この星を生んだ母体である周囲の高密度分子雲を破壊して行った結果、赤道面上に高密度分子雲が残ったのではないかと考

えている。

4.2. HH 7-11 の大分子流

高密度分子雲と関連して興味深いのは、HH 7-11 でハービックハロー天体 11-7 の延長線上に長く伸びた NH_3 の構造である (図 8=表紙)。ハービックハロー天体 11-7 は中心星 SSV 13 から $30\text{-}150\text{ km s}^{-1}$ の速度で飛び出した小さなガスの塊りであることがわかっている。それをほぼ覆うようにして一酸化炭素 (CO) の紫方偏移した。つまり $10\text{-}20\text{ km s}^{-1}$ の速度で我々の方向に向かって飛び出して来る分子流があり (図 7)、さらにそれと同じ方向に NH_3 分子雲が長く伸びている (図 8)。これだけ同一直線上に伸びた構造が並んでいると、やはりこの NH_3 分子雲も中心からの噴出物、あるいはそれに伴って引き起こされた分子流と考えたくなる。もしそうだとするとこの双極分子流天体について今まで CO 分子流だけから得られていた物理量をずいぶん書き改めなければならないことになる。 NH_3 分子流の速度は $1\text{-}2\text{ km s}^{-1}$ と CO 分子流に比べて遅いから、分子流全体のエネルギーは 10% 程度増えるだけだが、運動量は 2 倍に、そして何よりも変化するはこの分子流の年齢が一挙に 50 倍も伸びることだ。遅い分子流を速く今まで飛ばすには時間がかかるからである。今までだいたいの双極流も発生してから 10^4 年程度と考えられていたが、 10^6 年となると加速機構そのものも根本から考え直さなければならないかも知れない。今後の研究が是非とも必要な天体である。

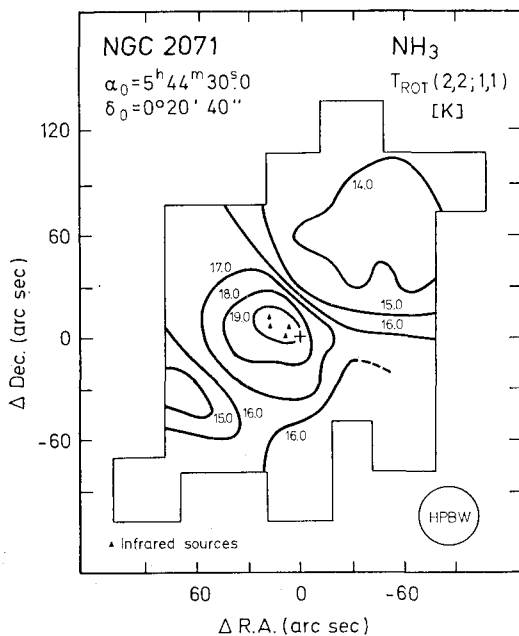


図 9 NH_3 (J, K)=(1, 1), (2, 2) 線から決めた NGC 2071 の温度分布。▲印は中心赤外線星の位置。中心星によって周囲の高密度分子雲が暖められていることがわかる。

4.3. 双極分子流の温度

NGC 2071 のスペクトル (図 3) を見ると、(J, K)=(1, 1) 線で 5 本の超微細構造線の間に弱い輻射が見える。(2, 2) 線を見るとこれが視線速度 $0\text{-}20\text{ km s}^{-1}$ にわたって存在する速度幅の広い成分であることがわかる。このような 20 km s^{-1} にもわたる速度幅の広い成分を NH_3 で見つけたのはオリオン KL 領域のほかでは始めてである。この成分は中心集中が強いことから CO で見える高速双極流の根元にあたる、密度の高い部分と考えられる。

3 節で述べたように、 NH_3 線の観測から分子雲の温度を決めることができた。そこで我々は NGC 2071 の速度幅の広い成分について温度を算出してみたところ、約 45K となった。これは中心星周囲の高密度分子雲の温度、約 20K に比べて著しく高い (図 9)。今までの CO 観測では、双極流の温度は周囲の分子雲と同じか、あるいは少し低いと考えられていたから、この結果は双極流がおそらくは分子同士の間衝突によって加熱されていることを示す初めての証拠である。ところでなぜ CO で見る双極分子流の温度は低くて、 NH_3 では高いのだろうか。おそらく NH_3 では高密度領域が見えるため、中心星に近く、双極流の加速現場により近い部分を見ることができると考えられる。

4.4. 高密度分子雲の温度決定

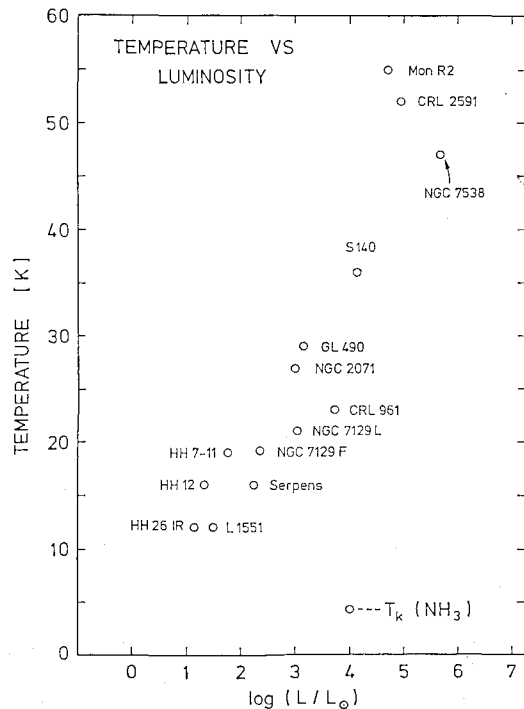


図 10 双極分子流天体周囲の高密度分子雲の温度と中心星光度との関係。両者の間に強い正の相関がある。

双極分子流中心星の周囲にある高密度分子雲の温度はどうなっているのだろう。図9はNGC 2071の温度分布である。これを見ると温度のピークは赤外線源の場所に一致し、その外側で下がって来る。これは赤外線源が周囲の高密度分子雲を暖めていることを示唆している。この加熱機構が何なのかを調べるために、10数個の双極分子流天体についてNH₃線を使って温度を出し、それを中心星の光度に対してプロットして見た(図10)。これを見ると両者の間に強い正の相関がある。つまり中心星の光度が明るいほど周囲分子雲の温度が高いということだ。

中心星が周囲分子雲を加熱するには2つの機構が考えられる。一つ目は4.3.で述べた中心星から噴出される双極分子流を通して周囲分子雲を加熱する機構である。ところが双極分子流を伴わない星の周囲分子雲について同様に温度を決定したところ、双極流天体と同じ相関を示した。従って双極流を介しての加熱はあまり有効ではないといえる。するともう一つの機構、すなわち中心星からの光を星間塵が吸収して暖まり、これが分子と衝突して加熱したり、星間塵から放射される赤外線輻射が分子雲中にわずかに含まれている水分子を通じて他の分子を加熱する機構が有効であることになる。この機構は間に

星間塵が入っているので、中心星光度と分子雲温度が図10のようなきれいな相関を示すためには星間塵の温度も中心星光度ときれいな相関を持っている必要がある。一方、分子雲の冷却の方は主に分子線の放射によって起こるが、その効率は分子線の光学的厚みで決まる。ところが観測の結果からNH₃線の光学的厚みは図10に示した天体間で大きくばらついていることがわかっている。このようなばらつきにもかかわらず、分子雲の温度が中心星の光度ときれいな相関を示すためには、星間塵の温度が分子雲の温度と等しい、つまり星間塵と分子が熱平衡状態になっていることが必要である。

5. おわりに

名古屋大学での経験と野辺山45m鏡を使って行った結果を持って行き、100m鏡でこのようにいくつかのおもしろい成果を出すことができた。この2年間は私にとって人生で大変重要な、実り多い期間であった。このような機会を作って下さった名古屋大学の福井康雄さん、河鱈公昭教授、及びケルン大学のヴィネヴィッサー教授に感謝すると共に、博士号を取ったばかりの若い人に海外に行くことを強くお推しめして、本稿の終わりとしたい

書 評

アストラリスシリーズ 10

天体画像——写真のデジタル化とビデオ技術——

富田弘一郎編 (恒星社厚生閣, ¥2,600)

「最近の技術革新は、アマチュアが撮影する天体写真の内容を非常に向上させた。その中には、天文学をより発展させるための情報が山と入っている。それらの情報を引きだすための方法についての適切な手引書は、今までほとんど見当らなかった」(編者はしがき)。最近のエレクトロニクスの発達、マイコンの普及により、専門家に限られていた天体観測の定量的研究が今や一般の観測家にも充分可能となってきている。原理から実践までの平易な解説書が求められているが、本書は時宜に叶った出版である。全編次の6章で構成されている。第1章、天体写真の応用と画像処理、第2章 天体写真計測、第3章 天体写真測光、第4章 画像電子技術、第5章 ビデオ技術、第6章 TV技術による天体観測。これらのうち、特に第2章、第3章は充実している。第2章では、天体写真上の星像の位置計測について、計測技法、比較星表の選定及び標準座標を用いての位置計算等の詳細が述べられている。第3章では、天体写真による測光について各種の測定機の概説が試みられ、銀河や星雲等のひろがった天体についての電子計算機を用いたデジタ

ル表面測光についての詳細が述べられている。また、新しい写真処理法として、脚光をあびているコンタクト・エンハンスメント法とアンシャープマスキング法の原理と方法も説明されている。まだまだ写真によるアナログ処理も捨てたものではないと思わせるものであり、簡単な装置があれば容易にできるので是非試みられるとよい。第2章、第3章ともに、マイコンを自在に用いているが、用いられた整約プログラムのソースが公開されているのは、プログラム作成の参考にもなって嬉しい。

近年、電子撮像技術が急速に発展してきており、天文観測にも今後、更に応用されるようになるだろう。第4章～第6章は、それらの技術の概説としてはまとまっているが、天体観測に適用するに当たっての技法等の具体的な詳説が説明されていないのが悔やまれる。光電子増倍管は数万円で入手でき、エレクトロニクスの心得と良い解説書があれば装置の自作も可能である。アマチュア観測家にとって、専門の天文研究者の仕事に比肩する情報を提供する装置となろう。もう少し詳しい解説が欲しいところである。

天文研究に应用されている先端技術、手法を一般向けに平易に解説することは、天文研究の層を広げる上で重要である。アマチュア観測家の方々の仕事が専門の研究者の仕事と比肩するようになることを期待したい。索引は完備しており、知りたい項目をすぐ引けることは、本書の利用価値を高めよう。(佐々木敏由紀)