

## 60 cm サブミリ波望遠鏡

—サーベイ時代の新望遠鏡—

林 正彦\*・長谷川 哲夫\*・半田 利弘\*  
 阪本 成一\*・砂田 和良\*・海部 宣男\*\*

カール・シンダーマン著の「続サイエンティストゲーム」(学会出版センター刊)の中には、科学におけるプロフェッショナリズムに対する見解をまとめあげるための設問例というのがあって、これがなかなか面白い。その中に、「あなたはサイエンティフィックハイを経験したことがありますか?」という質問があるが、私たちはこの質問には「Yes」と答えられると思う。新しいものを作って初めてデータが取れたときには、そのようなハイステートになるのである。特に、これから紹介する 60 cm サブミリ波望遠鏡(表紙写真参照)の場合には、最初からすべて自分たちの手で作ったため、うまくいったときの喜びは何物にも代えがなかった。

## 1. 大型装置がひしめくサブミリ波帯

サブミリ波は波長が 100  $\mu\text{m}$  (周波数 3 THz) から 1 mm (300 GHz) の電磁波で、遠赤外線と言ってもよい。実際は、地上から観測できる波長 300  $\mu\text{m}$  より長い電磁波がサブミリ波と呼ばれ、それより波長が短くなると遠赤外線と呼ばれることが多いようだ。

サブミリ波が地上から観測できるとはいっても、それは場所を選んでの話である。ハワイのマウナケアの頂上でさえも、波長が 750  $\mu\text{m}$  以下になると、せいぜい 50% の透過率を得るのが限度である。マウナケアでは、「10 日間ねばってわずか 1 時間の観測しかできなかった」という観測者に会うことがある。サブミリ波帯の観測がまだあまり多くやられていないために、たった 1 時間の観測でも他では得られないオリジナルなデータを取ることができるのだ。

地上からの観測がむずかしいので、上空や宇宙からサブミリ波の観測をする人もたくさんいる。日本では名古屋大学の松本さんたちのグループが、観測的宇宙論でのサブミリ波の重要性を考えて、ロケットを使った観測をしてきた。また最近、宇宙研の奥田さんたちは、気球を使った星間 [C II] (波長 158  $\mu\text{m}$ ) の観測がうまくいって意気盛んである。

ここ数年、サブミリ波帯でできるサイエンスを、少なくとも地上から観測できる波長帯 (350  $\mu\text{m}$ –1.3 mm) については、一気に進めてしまおうという大型装置が建設されてきた。マウナケアにある JCMT 15 m (イギリ

ス/カナダ/オランダ) や CSO 10 m (キヤルテク/テキサス大) などは、本格的な大型サブミリ波望遠鏡だ。また現在でも、いくつかのサブミリ波望遠鏡が建設段階にあり、さらにサブミリ波帯の干渉計 (ハーバード大 CfA) も近い将来作られるようだ。

こうした大型装置では、各テーマごとに得られる観測時間が限られているため、サーベイのように長時間を要する観測は不可能である。サーベイは地味だが重要な仕事だ。たとえば IRAS によるサーベイは、あらゆる分野で欠くことのできないデータベースとなっている。また CfA サーベイは、銀河の赤方偏移を測って宇宙の大規模構造を明らかにした。Palomar Observatory Sky Survey という写真を役立てている天文学者も多いことだろう。こうしてみると、サーベイ観測は天文学の研究上で非常に重要な位置を占めていることが分かる。

表紙の写真に載せた 60 cm サブミリ波望遠鏡は、このような大規模サーベイ観測をやりたいと考えて、国立天文台野辺山宇宙電波観測所のキャンパス内に私たちが作ったものである。サブミリ波帯での基本的なサーベイは、まだほとんどされていないのが現状だ。大型装置はできても、どこを掘ったら宝が出てくるのかは良く分かっていない。その場所を探し当てるためには、小回りのきく 60 cm 望遠鏡のような装置が役にたつだろう。もちろんこの宝は、空間、周波数、感度などからなる広大な原始林に埋まっていて、60 cm 望遠鏡でも探し当てるのは容易ではない。

望遠鏡は大きければ大きいほどいい、と思うのは大きな間違いである。私たちが観測する天体はビームサイズより広がっていることが多いが、こういう天体を回折限界で決まるビームで観測する場合、感度(単位時間に受けられる光子の数)は望遠鏡の大きさにはよらない。回折限界で使えば、望遠鏡が大きいほど小さなビームが作れ、高い空間分解能を得やすい。もちろん、高い空間分解能で広大な領域を観測するのは重要なことだが、それには莫大な時間(≥100年)がかかる。大きな領域を観測して大局的構造を見たい場合には、口径が大きい必要はないのである。

## 2. 60 cm サブミリ波望遠鏡はどのような装置か?

表紙の写真は、野辺山宇宙電波観測所の構内に設置してある 60 cm 望遠鏡である。この写真を見ると、60 cm

\* 東大理 Masahiko Hayashi, Tetsuo Hasegawa, Toshihiro Handa, Sei'ichi Sakamoto, Kazuyoshi Sunada, \*\* 国立天文台 Norio Kaifu: The 60 cm Submillimeter Telescope—A New Telescope for Surveys—

望遠鏡はおよそ電波望遠鏡らしからぬ格好をしている。地面に固定した四角い箱（受信機室と言う）の上に、方位角 (AZ) 方向に回転する水平回転台があり、ここに主鏡や副鏡などの光学系が載っている。水平回転台には CFRP（炭素繊維強化プラスチック）のできたエアロフォームのスライディングカバーがついており、雨や雪から主鏡を守るために閉まるようになっている。写真はこのカバーが開いていて、天体を追尾して観測するときの状態だ。

そもそもこのような望遠鏡を作ろうと私たちが考えたのは、3年前の 1987 年秋のことである。当時は東大理学部に天文学教育研究センターを設立する動きがあり、天文学教室も含めて東大に電波天文学のグループを作れそうな気配があった。せっきく電波のグループができるなら、何か新しい観測装置を作って新しい研究を始めたいと考えていたが、何分お金がない。そんなところにふってわいてきたのが、教育研究特別経費である。ある日内田さんから、2000 万円以下で作れるもので何か面白いものはないかと言われ、とっさに思いついたのが 60 cm 望遠鏡だ。さっそく書類を書いて出したところ、いろいろ理由があって翌 1988 年度に 1200 万円もらえることになった。こうしてできたのが、60 cm 望遠鏡である。

60 cm 望遠鏡の中身がどうなっているのかを描いた絵が図 1 である。電波はまず、天体から見て直径 60 cm ある主鏡（オフセット放物面）で反射され、さらに副鏡（オフセット双極面）で再び反射された後に、カセグレン焦点を結ぶ。この焦点位置には平面鏡が置いてあり、

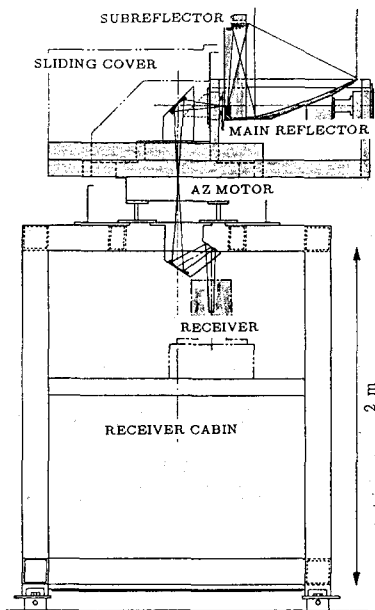


図 1 60 cm 望遠鏡の光学系。右上部に主鏡 (main-reflector)、中央付近最上部に副鏡 (sub-reflector) がある。

電波は高度 (EL) 軸方向に反射される。その後 2 枚のオフセット楕円鏡により、AZ 軸に沿って受信機室に導かれ、平面鏡で反射された後に受信機に入る。電波を EL 軸と AZ 軸の両方を通すことにより、受信機室にはクーデ焦点ができる。つまり、受信機は地球に対して動くことがない。

60 cm 望遠鏡の最大の特徴は、オフセット光学系を採用したことだ。これについては、今年天文月報 8 月号の長谷川の記事 (Vol. 83, p. 250, 天文観測技術の最前線 (8)) を参照されたい。回折限界で波を受けている場合は、通常のカセグレンのように主鏡の真ん中に穴があいていると、強い回折リングができる。これでは天体から来た貴重な光の一部が、回折リングに使われてしまうのもったいない。オフセット光学系だと、真ん中に穴があいていないので回折リングが非常に弱くなり、天体から来た光はほとんど一点に集中して明るくなるのである。次の節で説明するように、同じ明るさの天体でも、その天体が 8 分角 (ビームサイズ) 以上広がっていれば、60 cm 望遠鏡は通常のカセグレン望遠鏡に比べて、約 2 倍の強さでサブミリ波を受信することができる。

オフセット光学系は、今や衛星放送受信アンテナとして街のあちこちで多く見かけるが、通信の分野でも電波天文学の分野でもずいぶん昔から使われていた。3K 放射を発見したベル研のアンテナも、オフセット望遠鏡だった。その後ベル研では直径 7 m のミリ波用オフセット望遠鏡を作り、非常に質の高い高感度のサーベイ観測を続けている。大きなオフセット鏡を作る技術が進めば、電波望遠鏡に限らず、今後作られる望遠鏡の多くがオフセット望遠鏡になるだろう。実際 NRAO (アメリカ国立電波天文台) では、直径 100 m のオフセット望遠鏡を作る計画が進んでいる。また、CfA が 1994 年に打ち上げを予定している SWAS (サブミリ波天文衛星) も、主鏡は直径 55 cm のオフセット鏡である。

60 cm 望遠鏡のもうひとつの特徴として、クーデ焦点を使えるようにしたことだ。60 cm 望遠鏡の最終デザインが決まるまでにはいろいろと紆余曲折があったが、最終デザインの一つ前にはナスミス焦点を使うことにしていた。こうするとアンテナ全体がたいへん小さく作れる。主鏡も小さいし、全体をコンパクトにまとめてポータブル望遠鏡にし、将来野辺山よりもっと大気透過率の良い場所へと、移動させやすいように作ろうと思っていた。そのかわりこのデザインでは、受信機を入れるスペースは小さく、人が受信機室に入って作業することは不可能だった。このデザインで製作を開始しようとしたところ、平林さん (宇宙研) から「AZ モータに穴が開いているなら、そこにビームを通していっそクーデにしたら」と言われ、まさにその通りだと同感し

た。さっそく AZ モータに開いている直径 15 cm ほどの穴を通して、受信機室までビームが通るかどうか計算したら、何とかぎりぎり行けることがわかり、写真で見ると最終的な形へと大幅に変更した。

ナスミス焦点からクーデ焦点を使うように変更したことで、アンテナ全体としてはかなり大きくなってしまった。全体として望遠鏡とは思えないような形になったが、人が入って作業できるような大きな受信機室を作ったのは良かったと思っている。また、AZ 駆動部分を小さくしたことで、動力性能も向上して駆動スピードを速くすることもできたし、野辺山の強風に対する対策も楽だった。こうして作った 60 cm 望遠鏡の主要性能 (表 1) は、今のところ期待通りである。

ベル研ではアメリカ東海岸の大学と協力して、直径 1.7 m のアンテナを南極点に持って行く計画 (ASTRO) が実行されつつある。大気の透過率が非常に良い南極点で、主に波長 609  $\mu\text{m}$  の [C I] を観測するつもりらしい。2 年ほど前にベル研の Bally と会ったとき、彼がこの計画について説明してくれたことがある。彼は南極点に置かれた望遠鏡のポンチ絵を持っていたが、そこに描かれた彼らの望遠鏡のデザインは、60 cm 望遠鏡とそっくりだった。当時はちょうど 60 cm 望遠鏡の最終図面ができたところだったので、さっそくその図面を Bally に見せたところ、彼はこのような形のアンテナがもう図面になっており、本体が製作寸前であることに驚いていた。全く独立したふたつのグループが、ほとんど同じデザインにたどりついたわけだから、60 cm 望遠鏡のデザインは小型望遠鏡のデザインとしては的を得たものであろう。

さてこのように、望遠鏡は好きなように作れたが、受

表 1 60 cm 望遠鏡の主要性能諸元

口径	60 cm
形式	オフセットカセグレンクーデ
主鏡面精度	15 $\mu\text{m}$ (rms)
ビームサイズ	8' (230 GHz)
主ビーム能率	83%

信機や分光計まではまだ新しいものを製作する余裕がなかった。幸い、野辺山宇宙電波観測所が数年前に買った 230 GHz 帯の受信機があまり使われていないようだったので、当面これを借り受けて使おうと思っていた。この受信機は度々 45 m 鏡に載せてテスト観測に使われたが、それまでスペクトル線が受けられた例はなく、なんとなく不安だったが、「45 m 電波望遠鏡の鏡面精度では 230 GHz をやるのはちょっと無理だよ」ということで納得していた。

この受信機が結局最大の曲者になるとは知らず、望遠鏡が野辺山に設置された昨年 (1989 年) 春に、さっそく受信機を載せて手で太陽を受けてみたら、簡単に受信できた。ビームサイズは予想したとおり 8' の直径で、きれいであった。

さて、中間周波数増幅系や分光計はというと、ひとまず三鷹の 6 m ミリ波望遠鏡 (現水沢 6 m 鏡) で使っていたものを少し改造することにした。改造した音響光学型分光計は、250 MHz のバンド幅で、300 kHz 程度の分解能が得られ、なんとか作動するようになった。一方、望遠鏡制御用のプログラムもできて、60 cm 望遠鏡を計算機コントロールできるようになった。ポインティングを補正をして、観測したい天体の方向へ  $\pm 1'$  くらいの精度で望遠鏡を向け、追尾できるようになった。

いよいよ日本で初めて CO ( $J=2-1$ ) 輝線を受信する

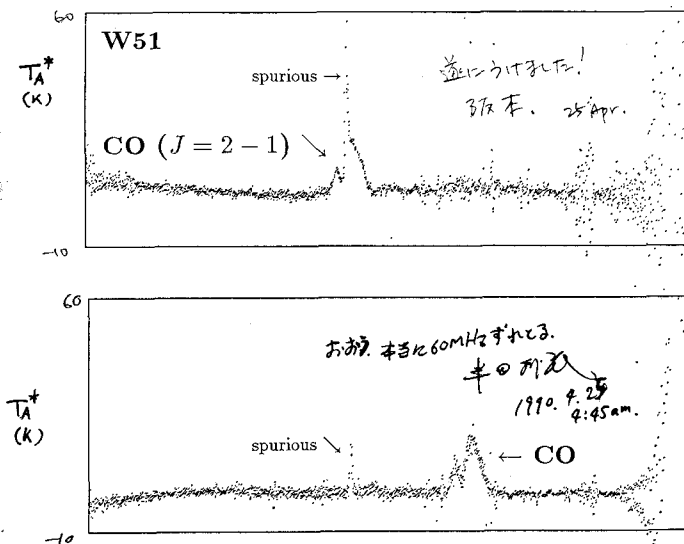


図 2 今年 4 月 25 日に初めて受信できた W51 からの CO ( $J=2-1$ ) 輝線 (上図)。局部発信周波数を 60 MHz だけずらすと、スペクトルもそれに応じてずれるので、これが天体からの信号であることを確認した (下図)。中心付近に鋭く出ているのは中間周波数増幅系のスプリアスで、局部発信周波数をずらしてもその位置は変化しない。

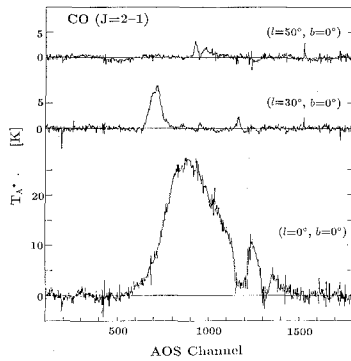


図 3 銀河面サーベイのデータの一部。

ときが来た。そう思ったのだが、どうしてもスペクトル線が出て来ない。最終的に受信機内のミキサーが悪いと分かり、これを取り替えて初めて CO が受かるまで、それから延々と暗い 1 年を要してしまった。

とうとう今年 (1990 年) の 4 月 25 日に、初めて CO ( $J=2-1$ ) 輝線を受けることができた。図 2 に初めて受けた W51 の CO ( $J=2-1$ ) 輝線を示した。スプリアスもあるし、ベースラインもうねっているが、初めて受けたスペクトルにはこれもまたふさわしいだろう。

### 3. 60 cm サブミリ波望遠鏡によるサーベイ

私たちは 60 cm 望遠鏡を使って、最初に CO ( $J=2-1$ ) (230 GHz,  $\lambda=1.3$  mm) 輝線による広域サーベイをやるかと計画している。最終的には CO ( $J=3-2$ ) (345 GHz,  $\lambda=870 \mu\text{m}$ ) まで受けたと思う。例年の気象条件から推定すると、野辺山では 11 月から 4 月までは 230 GHz での大気透過率が 80% 近くあり、また 345 GHz で透過率 50% を達成できる日が 3 カ月程度はある。これより上を狙うとなると、地上ではマウナケアか南極くらいしかないので、できればそこまで持って行きたいものである。

私たちは、CO ( $J=2-1$ ) 輝線の強度分布が CO ( $J=1-0$ ) 輝線とは異なっていると考えている。もちろん、分子ガスのないところではふたつの遷移とも検出できないので、第 0 近似では両遷移ともガスの分布を見ていることには違いない。また、よく言われることだが、電気双極子モーメントの小さい CO は、通常の分子雲内の物理状態では、かなり高い回転励起状態まで熱化されており、どの遷移を観測しても光学的に厚ければ分子雲の温度を表しているだけである。本当にそうなのだろうか。第 1 節に述べたような大型装置を使ったサブミリ波の観測が進むに連れて、CO の回転遷移強度が予想されていたようには簡単に理解できないことが分かってきた。どうも温度の高い分子雲では、光学的に厚くても CO ( $J=1-0$ ) に比べて CO ( $J=2-1$ ) のほうが何割か強く受か

るのである。系外銀河でも CO ( $J=1-0$ ) と CO ( $J=2-1$ ) の強さが違うことは良くあるのだが、まだ両者の強度の違いについての統一した解釈はされていない。CO ( $J=2-1$ ) 輝線強度の正しい解釈、特に  $J=1-0$  輝線と比較したときにどうなるのか、という問題について、系統的な研究をする必要が生じている。

このような問題も考えて、60 cm 望遠鏡で最初にめざすのは銀河面サーベイである。口径を 60 cm にしたのはそのためだ。銀河系の中に巨大分子雲があると分かっただけからすぐに、コロンビア大学の 1.2 m 鏡 (今は CfA にある) は、銀河面のサーベイ観測を始めた。そして、分子ガスからなる天の川の美しい絵を出してみせた。CO ( $J=2-1$ ) を観測するときの 60 cm 望遠鏡のビームサイズは、1.2 m 望遠鏡が CO ( $J=1-0$ ) を観測したときのビームサイズと同じなので、ふたつの結果を詳しく比較しやすい。

CO ( $J=1-0$ ) による銀河面サーベイによって、銀河系の中で、分子ガスは太陽系より内側に集中しており、厚さおよそ 150 pc で分布していることが分かった。しかし、渦巻構造はどれもはっきりせず、いまだに銀河系では CO が渦巻状に分布しているかどうかをめぐってもめているくらいである。CO ( $J=2-1$ ) の強度分布そのもので見る天の川は、CO ( $J=1-0$ ) で見る天の川と大差ないかも知れないが、もし、両者の強度比で天の川を見てやればどうなるのだろうか。渦巻のように重たい星が多くできているところでは、分子雲が加熱されて暖かくなっており、そのぶんだけ CO ( $J=2-1$ ) の方がより強く受かるようになるのだろうか。CO ( $J=2-1$ ) と CO ( $J=1-0$ ) の強度比の大きいところをたどれば、渦巻模様ははっきり見えてくるかも知れない。

図 3 には CO ( $J=2-1$ ) 輝線による初めての銀河面サーベイから、銀経  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $50^\circ$  の 3 点での輝線プロフィールを示した。このようなプロフィールを、銀河面全体にわたってコロンビアサーベイのデータと比較していく予定である。図 3 で注目したいのは、各スペクトルの強度が、他の望遠鏡で観測した値に比べて大きいことである。この電波強度は、大気や光学系の減衰だけを補正したアンテナ温度 ( $T_A^*$ ) で表してある。たとえば銀河中心の CO ( $J=2-1$ ) のアンテナ温度は、プロフィールのピークで約 25 K である。これは、通常のカセグレンアンテナで銀河中心を観測した場合の、約 2 倍のアンテナ温度だ。これこそオフセット光学系を採用して、貴重なパワーを回折パターンに取られてしまわないようにした最大のメリットなのである。表 1 に示したように、60 cm 望遠鏡の主ビーム能率は 80% 以上もある。通常のカセグレンアンテナの主ビーム能率は約 60% 以下であり、鏡面精度との関係から 40% 程度で使うことも多い。

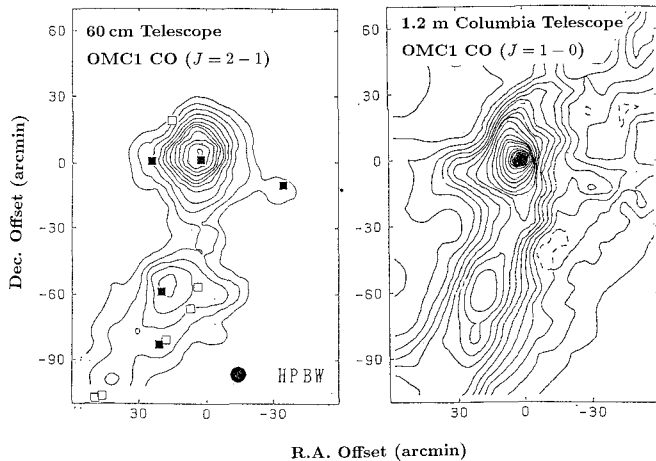


図 4 60 cm 望遠鏡で観測したオリオン座分子雲北部の CO ( $J=2-1$ ) 輝線の積分強度図 (左図) と、コロンビア大学の 1.2 m 望遠鏡 (現 CfA) で観測した CO ( $J=1-0$ ) 輝線の積分強度図 (右図) (Maddalena *et al.* 1986 による). コントアは、左の図では 60  $\text{K km s}^{-1}$  から 30  $\text{K km s}^{-1}$  間隔で、また右の図では 1.28  $\text{K km s}^{-1}$  から 5.12  $\text{K km s}^{-1}$  間隔で引いてある. 白い四角はハービッグハロー天体, 黒い四角は双極分子流天体の位置を示す.

このような高いビーム能率を持つ 60 cm 望遠鏡でオリオン座分子雲を観測すると、アンテナ温度はオリオン KL 方向で 86 K にもなる。こうなると少々受信機の雑音が大きいても観測できる。そうやって作ったオリオン座分子雲北部のマップが図 4 (左) である。オリオン座分子雲については、9 月号の天文月報に立松君たちの詳しい記事が載っているが、図 4 でマップした範囲はだいたいそれと同じ領域である。図 4 (右) には参考のため、同じ領域の CO ( $J=1-0$ ) のマップ (Maddalena *et al.* 1986, *Ap. J.*, **303**, 375) を載せた。一見すると 60 cm 望遠鏡で観測した CO ( $J=2-1$ ) のマップは、CO ( $J=1-0$ ) のマップとよく似ている。CO 強度のピークのあるところは、黒や白の四角形で表した分子流天体やハービッグハロー天体の位置と良く一致している。

CO ( $J=2-1$ ) と CO ( $J=1-0$ ) のマップが似ていることは当然のことだが、両者の強度を比較してみると不思議なことが分かる。強度を比較するときは、アンテナなどに依存するファクターは補正して、ビームで平均化した輝線温度で比較する。こうすると、ビーム以上に広がって熱平衡にある分子雲から出てくる輝線は、光学的に厚ければすべて同じ輝線温度を持つことになり、物理量との対応がつけやすいのだ。前にも述べたが、CO ( $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ ) 輝線はそのような分子輝線の典型だと思われてきた。実際に、図 4 で輝線温度を比較してみると、CO ( $J=2-1$ ) は CO ( $J=1-0$ ) の数倍、ところによっては 10 倍以上もの輝線温度を持つことが分かる。光学的に薄い場合、CO ( $J=2-1$ ) は CO ( $J=1-0$ ) の 4 倍近い輝線温度を持つが、それでもこの比が 4 以上になることは絶対ない。図 3 に示した銀河面サーベイの場合には、CO ( $J=2-1$ ) と CO ( $J=1-0$ ) の輝線温度が比較的良く一致しているので、キャリブレーションがおかしい可能性はない。

では、この結果は何を意味するのか? CO ( $J=2-1$ )

が CO ( $J=1-0$ ) に比べて異常に強いことを説明するためには、もはやこのふたつの輝線が分子雲の同じ場所から出ていると考えるわけにはいかない。実際、 $J=2-1$  の方が  $J=1-0$  より 4 倍ほど光学的に厚いので、分子雲のより外側を見ていることになる。たとえば分子雲がビームサイズ以下の小さな“つぶつぶ”からできているとすれば、 $J=2-1$  を放射する部分の面積の方が  $J=1-0$  を放射する部分の面積よりも大きくなるので、ビームで平均した輝線温度は強くなる。また、たとえば分子雲の温度が外側にいくほど高くなっていけば、より外側を見ている  $J=2-1$  輝線の輝線温度の方が高くなる。このような要因の相乗効果で CO ( $J=2-1$ ) が CO ( $J=1-0$ ) に比べて異常に強くなっていると思われる。

このオリオンの観測結果からひとつ言えることは、系外銀河を観測して CO ( $J=2-1$ ) が CO ( $J=1-0$ ) に比べて強いからといって、必ずしも CO 輝線は光学的に薄いと単純に言うてしまうのは良くないということである。

60 cm 望遠鏡を使った観測によって、早くもこのような問題が明らかとなってきた。今後私たちは 60 cm 望遠鏡によって大規模サーベイを行い、ここで述べてきたような解析に基づいて、分子雲の物理的な状態や、そこで起こっている物理過程を研究していくつもりである。

#### 4. 最後に

60 cm 望遠鏡の製作にあたっては、たいへん多くの方々から協力していただきました。この場をかりて感謝いたします。内田・祖父江の両氏には、東大教育研究特別経費や科研費を得るのに尽力していただきました。また野辺山からは望遠鏡建設費の一部を援助してもらいました。本年度は、東レ科学財団から援助をいただきました。望遠鏡の製作にあたっては雄鳥試作研究所、法月精機、開発工学の各社の皆さんにたいへんお世話になりました。