

サブミリ波天文最前線

—テキサス大学グループの広域 CI 観測—

立松 健一

茨城大学理学部物理 〒310 水戸市文京 2-1-1

e-mail: kt@orion.sci.ibaraki.ac.jp

2年間のテキサス大学滞在のまとめとして、世界で初めて行なわれた炭素原子輝線の広域マッピング観測について報告します。従来から知られていた大質量星生成領域に加え、暗黒星雲からもまぎらざる強度の炭素輝線を検出しました。暗黒星雲の雲の薄い部分では、炭素原子がCO分子と同程度あることがわかりました。

1. はじめに

「海外留学」というのは、時代を越えて若人(?)の血をかき立てるものです。私も例に漏れず、いつかは海外に長期滞在し、日本では得られない何かを得たいと考えていました。

4年ほど前、私が長野県にある野辺山宇宙電波観測所で研究員をしていたときに、アメリカのテキサス大学からダン・ジャフィという天文学者が観測にやってきました。私はその観測のサポーターをしていたのですが、そのとき、「2-3年テキサスに滞在できるいい口があったら、是非連絡してほしい」、なんてことをちょっと彼に話したわけです。運よく、1992年9月から1994年5月までの2年間弱、テキサス大学オースティン校天文学教室のジャフィの研究室でポスドク研究員として働くことになりました。

テキサス大学天文学教室は、CSO (カルテク・サブミリ波望遠鏡)の観測時間の10%を、その運営費の一部負担することにより、もっています。CSOは、口径10.4m、世界で最も天文観測に適した場所と言われているハワイのマウナケア山の山頂(標高4200m)にあります。望遠鏡は、夜間のみオープンされています。理由は、日射による鏡面変形によりビーム幅や指向精度がかなり悪化するから、また、一般に昼間はサブミリ波帯での「透

明度」がよくない(特に午後)からです。

2. 炭素原子(CI)輝線について

地上でのサブミリ波が本格的にはじまったのは1988年頃ですが、それ以前から注目されていたものに炭素原子(CI)輝線があります。CI輝線がなぜ重要かと言うと、まず炭素が水素・ヘリウム・酸素について宇宙で4番目に多い元素であること、そしてこの輝線が星間ガスの冷却機構で重要な役割を果たしているらしいということ、にあります。同じく冷却で重要な役割を果たしている一酸化炭素分子(CO)は、輝線がミリ波帯にあることから20年ほど前からさかんに観測されてきましたが、CIの方の観測はサブミリ波観測の技術的困難さもあり本格的観測はずいぶん立ち遅れています。宇宙空間でのCI輝線の役割を正しく捕えるためには、ある程度広い範囲での輝線分布をしらべ、それを既存の各種観測データと比べなければなりません。しかしながら、これまでになされたCIのマッピング観測はせいぜい数分角程度のエリアにしか過ぎませんでした¹⁾。その理由は、492GHzのCI輝線に対し、CSO、JCMTといった地上のサブミリ波望遠鏡のビーム幅は10-15秒角程度と大変に細く、広い天空をおおうには多くの観測点が必要なことにあります。そして、マウナケア山頂ですらCI観測の可能な夜はせいぜ

い 30%程度であり、典型的な観測日数は1件あたり3日程度です。観測できる点数は自ずと限られてくるわけです。

星間空間での熱収支、化学反応、光解離現象、等を明らかにするうえで広域CI観測が必要であることは、「業界関係者」の間では広く認識されていました。そして実際に、現在、南極点に建設中の1.7m望遠鏡AST/RO、SWAS衛星などが広域CI観測を目標にかかげています。我々はこれらの観測を待たなければならないのでしょうか？

3. CSO+フォーカル・リデューサー

ジャフィは、広域CI観測の重要性を認識していましたが、望遠鏡を新たに作るには多額のお金がかかります。そこで彼が考え付いたアイデアがこれです。CSOに、フォーカル・リデューサーをつけてビーム幅を10倍に広げてはどうか。ビーム幅が10倍になれば昼間でも観測できるではないか、昼間は通常の観測は割り当てられていないので観測時間の融通がきくのではないか。なかなかいいアイデアです。CSO台長のトム・フィリップスの理解・協力も得られ、このアイデアが実現することになります。ジャフィは、大学院生のリネー・ブルームとCSO用のフォーカル・リデューサーの作成にとりかかりました。わたしがテキサス大学に来たのはこのころでした。

フォーカル・リデューサーは2枚のオフセット・パラボラ鏡と1枚の平面鏡で構成されており、副鏡からの電波をエレベーション軸方向に曲げる第3鏡のかわりにこれを挿入します(図1, 2)。CSOの主鏡は数多くの六角形パネルでできています。受信機側から見ると、フォーカル・リデューサーを通すことによりビームは(単体としての面精度のよい)パネル1枚のみを照射しています。これで口径60cmのオフセット・パラボラCI望遠鏡のできあがりというわけです。リデューサーは常設され、第3鏡との切り替えは1分程度で行なえます。

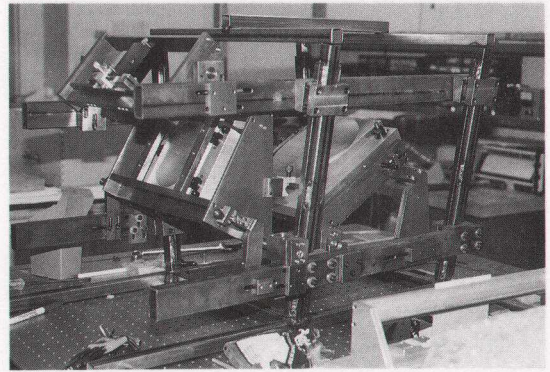


図1 製作されたフォーカル・リデューサー。望遠鏡に取付ける前。

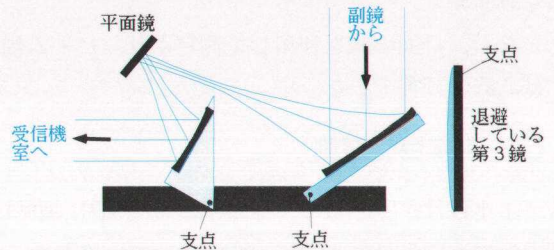


図2 フォーカル・リデューサーの構成図。通常は2枚のパラボラ鏡が受信機室側に倒れており、かわりに第3鏡が入っている。

4. 観 測

観測を開始したのは1993年の2月でした。ジャフィは講義等でテキサスを長期間空けられないので、彼の大学院生ブルームが観測をもっぱら担当しました。この観測は、彼の博士論文のテーマです。しかし観測は2-3カ月が予定されており、彼一人ではなかなかしんどいものがあります。ジャフィから私に、このプロジェクトに興味はないかと聞かれ、テキサスでCI観測をぜひ経験したいと考えていた私は、もちろん観測の手伝いを引受ました。

昼間観測可能と言っても、さすがに鏡面に日射をあてるわけには行きません。日射が直接鏡面に当たることによる熱変形は我々の観測にも影響大ですが、夜間の観測者に多大な迷惑を与えること

になるからです。CSOはドームをもっており、シャッターを半開状態にして、観測するわけです。開度はコントロール室のシャッター開閉ボタンで、15分に一度程度、マニュアル制御で調整します。観測天体は、日射を考えて選択します（これはパズルのようでなかなか難しい）。

CI観測の結果を解釈するとき、同一空間分解能の他の輝線の観測と比較することは重要です。空が悪くてCIが観測できない日は、周波数の低い220 GHzの一酸化炭素の同位体分子 ^{13}CO 、 C^{18}O からの輝線を観測しました。フォーカル・リデューサーを用いた場合、ほぼ同一のビームサイズが得られます。

なお、月面の縁を利用して測定されたビーム幅は、約4分角でした。

5. 1年目の観測

1年目は、主として、電離水素星雲(HII領域)近傍の大質量星生成領域の観測を行ないました。以前の狭い領域の観測から、このような領域では比較的強いCI輝線が出されていることがわかってきたからです。星雲の励起星からの強い紫外線が、分子雲表面でのCO分子の光解離現象を起こし、炭素原子を生成するわけです。

このような領域では、典型的な輝線強度は3度程度以上と強く、各天域で30分角ないし1度角平方程度のマッピング観測が可能でした。5つの天域を観測しましたが、例として表紙にS140とNGC2024でのCI輝線の積分強度分布^{2),3)}の疑似カラー地図を示します。重ねてある等高線は ^{13}CO 輝線の積分強度分布です。CI分布はかなり広がっており、基本的には ^{13}CO の分布と似ています。しかし、詳しく見ると色々違いが見えてきます。またスペクトルの形(ドップラー速度を含めて)も概ね似ていますが、顕著な違いがあることもあります(後で例をお見せします)。

一様密度の分子雲が外部からの紫外線に照らされる時、CIは分子雲の表面に局在しているはず

です。これに反し、観測されたCI分布は分子ガスと共存していることを示唆しています。特に、S140ではCI強度ピークが、理論の予想に反して(^{13}CO 強度ピークに対して)星雲の励起星[座標(-5,-5)に位置する]からより離れた所にあります。観測結果が示唆することは、分子雲は非常にクランピーであり、紫外線をその内部まで良く通しているらしいということです。S140領域では、CI/COの個数比は強度のピーク位置で0.11、観測領域全体を平均すると0.5でした。(CO/ ^{13}CO の存在比を50と仮定し、 ^{13}CO データを用いました。)

6. 2年目の観測

メイン・プロジェクトは、暗黒星雲と銀河面サーベイとしました。そのうち、暗黒星雲の観測は、私が主に担当することになりました。また、ブルームと私に加え、大学院生リーも観測に参加することになります。暗黒星雲でのCIは、これまでほとんど観測されることがない対象です。また、銀河面サーベイは、COBE衛星による7度角分解能の極めて粗いデータ⁴⁾はあるものの、渦状腕スケール構造を調査できる分解能の全く初めての試みです。

3つの代表的な暗黒星雲を観測しましたが、そのうち有名な暗黒星雲「TMC-1(おうし座分子雲1)」で得られたCIスペクトルの天空上での分布を図3に示します。暗黒星雲でのCI輝線強度は1度程度と弱く、世界最高の空と世界最高の受信機をもってしても1点あたり1時間程度の積分が必要です。ですから本格的なマッピング観測はあきらめ、クロススキャン的観測を行ないました。

TMC-1では高密度ガスのリッジの存在がよく知られていますが、(^{13}CO の場合と同様に)CIではこのようなリッジは見えずにほぼ一様の強度で広く広がっています。これはCIの臨界密度が、 ^{13}CO のそれとほとんど同じであることにより自然に理解されます。TMC-1のシアノポリイン・ピー

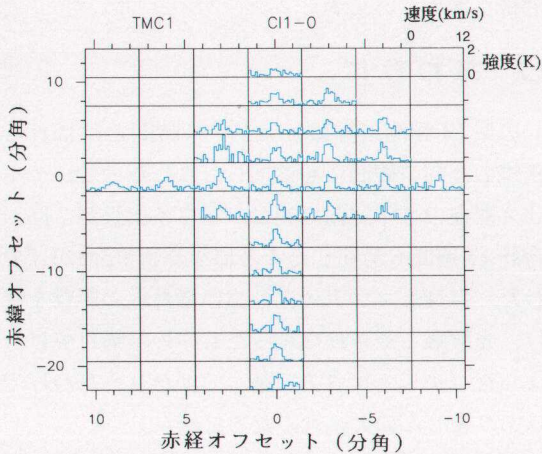


図3 おうし座分子雲 TMC-1 方向での CI のスペクトル分布。小さい箱が各観測点でのスペクトル(座標軸は右上の箱に記入)で、それを天球上での位置に対応させ並べたもの。(0, 0) 点はシアノポリイン・ピーク。

クと呼ばれる場所で得られた ^{13}CO 、 C^{18}O 、CI のスペクトルを図4に示します。 ^{13}CO の2山のプロファイルは所謂「自己吸収」的に見えますが、 C^{18}O とCIの速度が異なっています。この領域の構造の複雑さを垣間見ているようです。

暗黒星雲でのCI存在量はどうなっているのでしょうか？今回観測した3つの暗黒星雲 TMC-1, L 134 N, IC 5146 ではCI/COの個数比が0.1ないし1という値が得られました。ここでもCO/ ^{13}CO の存在比を50と仮定し、 ^{13}CO データを用いました。場所によってはCO分子と同数程度の炭素原子があるわけです。外部からの紫外線の弱い暗黒星雲でどのようなメカニズムで出されているかは興味もたれます。Le Bourlot らが、(紫外線がなく)宇宙線のみがある場合の暗黒星雲の化学モデルを作りましたが⁵⁾、2つある安定解でのCI/CO比は、0.2と0.002でした。観測された存在比に比べ、CIが若干足りません。

紫外線を入れたモデルでは、どうでしょうか？図5に、CIの相対存在量(CI/ ^{13}CO)を ^{13}CO の柱密度の関数で表したものを示します。黒の記号が

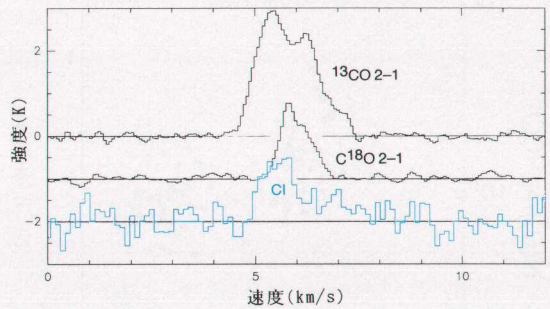


図4 TMC-1の(0, 0)点での各輝線のスペクトル。

観測値で、van Dishoeck と Black のモデル計算の結果⁶⁾を白抜き記号または×で示しました。観測データは、輝線が光学的に薄いものと仮定し、また(理論モデルにあわせて)励起温度25度を仮定しています。暗黒星雲(TMC-1, L 134 N, IC 5146)はお互いに非常に似た性質を持っていますが、HII領域に隣接するオリオン座分子雲では暗黒星雲とかなり様子が違うことがわかります。モデルによれば、CI/ ^{13}CO 比は、紫外線強度にあまり強くはよらず、 ^{13}CO 柱密度に応じて変化しています。ここでは、分子雲のクランピーな性質や、輝線が光学的に厚い可能性⁷⁾、等は考慮されていませんが、その点を加味すればまずまず観測データをよく説明していると思われる。暗黒星雲からのCIは太陽近傍程度の強い紫外線で十分説明可能であることがわかります。一つ指摘しておきたい点は、暗黒星雲で雲の薄いところ(^{13}CO 柱密度の小さなおとこ)でCI/ ^{13}CO が大きくなるような傾向がみられることです。この傾向は紫外線を入れた理論モデルでは説明可能ですが³⁾(図5)、宇宙線だけのモデルでは説明できません。

なお、CI/CO比の計算でCO/ ^{13}CO の存在比を50と仮定しましたが、これは大丈夫でしょうか？今回暗黒星雲に対して得られた ^{13}CO 柱密度範囲 $10^{14}\text{--}10^{15}\text{cm}^{-2}$ あたりでは、van Dishoeck と Black の計算ではCO/ ^{13}CO が20程度にまで下がっています。もしこの値を採用できるなら、暗黒星雲でのCI/CO比は上で求めた0.8-5よりもさ

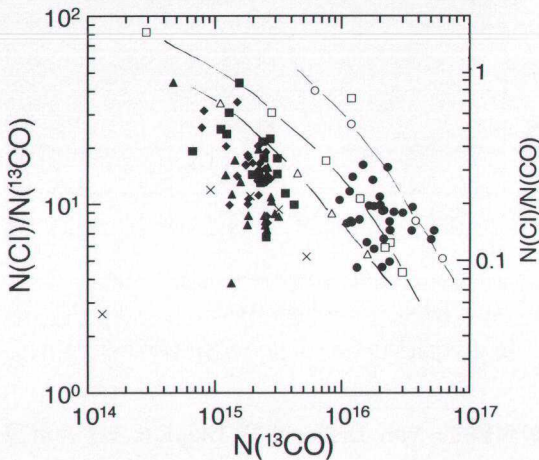


図5 CI/¹³CO比を¹³CO柱密度の関数で表したものの、黒の記号は観測データで、黒い三角がL134N、黒い四角がIC5146、黒い菱形がTMC-1、黒丸がオリオンA。白抜き記号および×印はvan Dishoeck & Blackの光解離領域のモデルで、三角、四角、丸がそれぞれ太陽近傍の紫外線強度の0.5倍、1倍、10倍の場合。×印は、紫外線強度は太陽近傍程度だが、炭素がダストへ吸着されずに残っている割合が標準値の40%に対し10%と少ない場合。

らに大きくなることとなります。

暗黒星雲IC 5146に関しては、最近Ladaらがミリ波CO同位体分子観測と近赤外の撮像データを用いて、これまでにない精度で、ガスの柱密度とダストによる吸収量の相関を取りました⁸⁾。基本的にはきれいな比例関係が出るのですが、興味深いことはダストがゼロのところでも分子ガスがまだあるという「げた=切片」があることです。Ladaらはこの原因を考えましたが、現時点ではお手上げのようです。今回Ladaらのデータに入っていない原子ガスの寄与がけっこうあることがわかり、この「げた」の量がまた増えそうです。どんな物理的解釈が可能なのでしょう？

ここでは結果は割愛しますが、銀河面サーベイでは、銀経8度から42度の範囲を6分角または12分角のスペーシングで観測しました。銀河系スケールでの星間ガスの性質の変化について、現在

解析を進めています。

8. おわりに

広域CI観測以外にもテキサス時間と呼ばれる正規の夜間の観測にも参加したりしたので、テキサス滞在の2年間弱の間に、ハワイ出張が7回、合計17週間も滞在したことになります。おかげでわたし自身もマウナケアの強い紫外線の影響を受け、光解離こそされなかったものの結構日焼けしました（決してビーチで遊んでばかりいたわけではありませんので、念のため）。

我々は、従来に比べ画期的に広い天空領域の観測をおこなってきました。それでも、CIは我々のマッピング範囲におさまらないくらい広く分布しています。特に、暗黒星雲では、輝線強度の弱さのために観測領域がずいぶん限られてしまいました。今後建設されるサブミリ波専用の小口径の望遠鏡によりさらに観測が進められるでしょう。日本では、斉藤修二さん、山本智さん、等のグループが、富士山頂にサブミリ波専用望遠鏡を建設を計画しています。また、逆に高分解能観測では、国立天文台の次期大型電波干渉計の目玉として、サブミリ波が検討されているという話を聞きました。日本のサブミリ波天文学の進展が楽しみです。

最後に、CSOのスタッフで、常に我々を助けてくれたラリー・ストロムさんが亡くなったことを、日本に帰国してすぐ知らされました。あの年でのマウナケア勤務は、肉体的にかなり厳しかったと思います。この場を借りて、心からご冥福を祈ります。

本研究は、D. T. Jaffe, R. Plume, J. Keene, T. G. Phillips, W. Li, N. J. Evansとの共同研究として行なわれました。

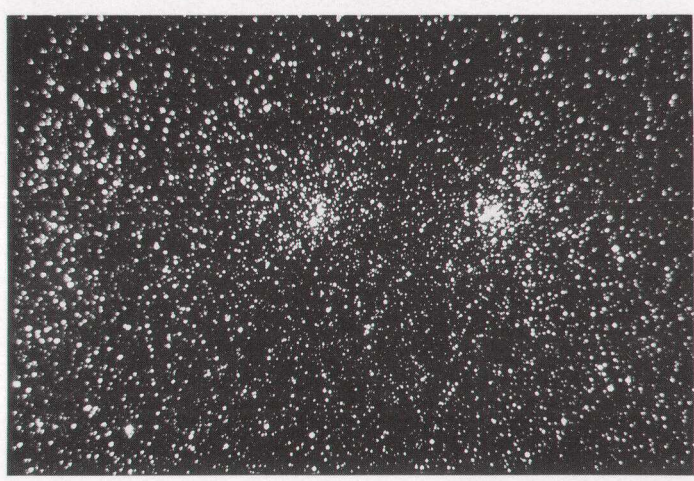
参 考 文 献

- 1) White G. J., Padman, R. 1991, Nat 354, 511
- 2) Plume R., Jaffe D. T., Keene J. 1994, ApJ, 425, L49

3) Plume R., Jaffe D. T., Tatematsu K., Keene J. B. 1994, Proc. of the 2nd Zermatt conference, Physics and Chemistry of Interstellar Molecular Clouds, in press
 4) Wright E. L., et al 1991, ApJ 381, 200
 5) Le Bourlot J., et al. 1993, ApJ 416, L87
 6) van Dishoeck E. F., Black, J. H. 1988, ApJ 334, 771
 7) Phillips T. G., Huggins P. J. 1981, ApJ 251, 533
 8) Lada C. J., et al., 1994, ApJ, in press

**The Frontiers of Submillimeter Astronomy :
 Extensive CI Mapping Observations by the
 University of Texas Group**

Ken'ichi TATEMATSU
Department of Physics, Ibaraki University
 Abstract: I summarize the results of our extensive mapping observations of atomic carbon, which were carried out for the first time. We mapped the atomic carbon emission from three dark clouds as well as from several massive star forming clouds. In dark clouds, the CI/CO abundance ratio reaches the value of 1.0 at low column density regions.



ペルセウス座二重星団 秋



M52
 (カシオペア座散開星団) 秋

日本天文学会発行スライド集「遙かなる宇宙へ」[©]より