

気球搭載望遠鏡 BICE による 遠赤外 [C II] スペクトル線サーベイ観測

中川 貴雄^{*1}・土井 靖生^{*1,2}・望月 賢治^{*1,2}・油井由香利^{*1,2}・
奥田 治之^{*1}・芝井 広^{*1}・矢島 信之^{*1}・成田 正直^{*1}・
油井 正生^{*1,2,3}・西村 徹郎^{*4,5}・F. J. Low^{*4}

Survey Observations of the Far-Infrared [C II] Line with the BICE

By

Takao NAKAGAWA, Yasuo DOI, Kenji MOCHIZUKI, Yukari Y. YUI,
Haruyuki OKUDA, Hiroshi SHIBAI, Nobuyuki YAJIMA, Masanao NARITA,
Masao YUI, Tetsuo NISHIMURA and F. J. LOW

Abstract : The far-Infrared [C II] $158\mu\text{m}$ line is the dominant coolant of neutral interstellar gas. We made survey observations of the [C II] line with a dedicated system called BICE (*Balloon-borne Infrared Carbon Explorer*). We made two successful balloon campaigns : one to the United States, and the other to Australia. We observed various kinds of objects, including the Galactic plane ($255^\circ \leq l \leq 78^\circ$, $|b| \leq 3^\circ$), the Cygnus-X region, the ρ Ophiuchi dark cloud, and the Large Magellanic Cloud. The observational results are briefly discussed.

概 要

星間ガスのエネルギー収支に最も重要な役割を果たす遠赤外[C II]スペクトル線を、広い領域にわたってサーベイ観測するために、専用機 BICE (*Balloon-borne Infrared Carbon Explorer*) を開発し、これを用いて海外観測遠征実験を2回行った。これらの実験により、銀河面の広い範囲 ($255^\circ \leq l \leq 78^\circ$, $|b| \leq 3^\circ$), Cygnus-X 領域, ρ Ophiuchi 暗黒星雲, 大マゼラン雲などが、[C II]輝線によりマッピング観測された。観測の結果、光解離領域に代表されるようなあたたかな星間物質の、様々な存在形態が明らかになった。

1. はじめに

遠赤外からサブミリ波にかけての波長帯は、天文学に残された最後のフロンティアの1つである。多くの天体

^{*1} 宇宙科学研究所

^{*2} 東京大学理学部

^{*3} (現在所属) 東芝

^{*4} アリゾナ大学シュワード天文台

^{*5} (現在所属) 国立天文台

が、この波長域において最大のエネルギーを放出しているために、天文学的に貴重な情報がこの波長帯に数多く含まれていることが、古くから期待されていた。しかし、地球大気がこの波長域で全く不透明であるために、観測的にはこの波長域は全くの未開拓域として残されてきた。

我々は、この波長域でも最も重要なスペクトル線の1つである[CⅡ]スペクトル線に着目した。電離炭素(C⁺)の放射する遠赤外[CⅡ]スペクトル線($^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$, 波長157.7409 μ m)は、中性星間雲の冷却に最も重要な役割を果たす最も明るいスペクトル線であることが従来から理論的には期待されてきたからである[1]。ただし、そのことを広い範囲にわたって観測的に実証した例は今まではなかった。

我々は、[CⅡ]観測を含む多種の遠赤外分光観測を行うことを目的として、汎用の気球搭載赤外線望遠鏡BIRT (*Balloon-borne Infrared Telescope*) [2]を、京都大学との共同のもとに開発してきた。特に、昭和63年には、この望遠鏡に「超流動液体ヘリウム冷却型ファブリ・ペロー分光器」[3]を搭載し、[CⅡ]スペクトル線を広げた領域にわたって直接検出することに成功した[4]。この観測により、広領域にわたる[CⅡ]観測の重要性が再確認された。ただし、この観測では、観測器の制約により、観測領域が狭い範囲に限られていた。

この成果を基に、我々は、[CⅡ]スペクトル線のサーベイ観測に最適化した気球搭載観測器を用いて、高感度でかつ広領域にわたる完全なサーベイ観測を行うことを計画した。

2. 観測器 BICE

我々が、[CⅡ]サーベイ観測専用に開発したのが、BICE (*Balloon-borne Infrared Carbon Explorer*) と呼ぶシステムである。観測システムとしての仕様の概要を表1に示す。

BICEの最大の特徴は、観測目的を[CⅡ]サーベイ観測に限定することにより、観測効率を極めて高くすることができたことである。具体的には、

- (1) 軸はずしオーバーサイズ光学系を採用した「超低背景放射望遠鏡」
- (2) 全光学系を超流動液体ヘリウムで冷却した「ファブリ・ペロー分光器」

の2つの特徴的なサブシステムの採用が、観測効率の向上に大きく貢献した。

一方、観測機全体としては、目的を限定し汎用化をはからないこととした。これにより、システムとしてはで

表 1 観測器 BICE 仕様

望 遠 鏡	形式 主鏡	オフセット・オーバーサイズ光学系 軸外し放物面鏡 物理的有效径 $\phi 350\text{mm}$ 幾何光学的有效径 $\phi 200\text{mm}$
分 光 器	形式 検出器 光学系温度 $R = \lambda / \Delta\lambda$ 空間分解能 NEP_{SYS}	Tandem Fabry-Perot Spectrometer Stressed Ge:Ga Photoconductor 約 2K 1750 $\phi 12.4\text{arcmin}$ $6 \times 10^{-16} \text{W Hz}^{-1/2}$
姿 勢 制 御	形式 制御方式 制御補助 位置決定	方位角のみの一軸制御 よじれリアクション 振り子運動ダンパー 地磁気センサー スターセンサー 傾斜計 ジャイロ
ゴ ン ド ラ	大きさ 重量	$1.1 \times 1.3 \times 2.3 \text{m}^3$ 350kg

きる限り簡素化し、信頼性の向上に努めた。具体的には、例えば、望遠鏡の姿勢制御は方位角のみに限定し、その制御には、コンパクトで安定した動きを示すよじれリアクション姿勢制御装置[5]を採用した。

実際の観測での[CII]検出限界が $I_\nu = 1.5 \times 10^{-5} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ (3σ)であり、同じく[CII]観測を行っている KAO (Kuiper Airborne Observatory) の分光システムでの単位時間当たりの検出限界[6]と比べると、一桁以上の向上である。

BICE システムの詳細については、参考文献[7]を参照されたい。

3. 観測遠征

3. 1991年アメリカ遠征

BICE を用いた初観測実験を、1990年5月に、宇宙科学研究所三陸大気球観測所からの気球飛翔により行った。しかし、この時には気球自身の不調により、高度10km までしか気球が上昇せず、実際の観測に至らなかった[8]。

BICE より第2回目の観測実験を、1991年春季に、米国テキサス州パレスティンの NSBF (National Scientific Balloon Facility) より行った[9]。この実験は、日本側宇宙科学研究所と米国側アリゾナ大学スチュワード天文台との間での日米共同実験であり、NASA の支援を受けた。大陸での実験の場合、飛翔後の観測器の陸上回収が可能であり、1991年の実験では、1 観測遠征に2回の飛翔を行うことができた。

2回の気球飛翔実験の概要を表2に、航跡を図1に示す。1回目の飛翔実験では、上空風が遅かったために、極めて長時間の観測が可能になった。水平飛行時の高度も安定していた。2回目の観測では、水平飛行時の高度がやや不安定であった。

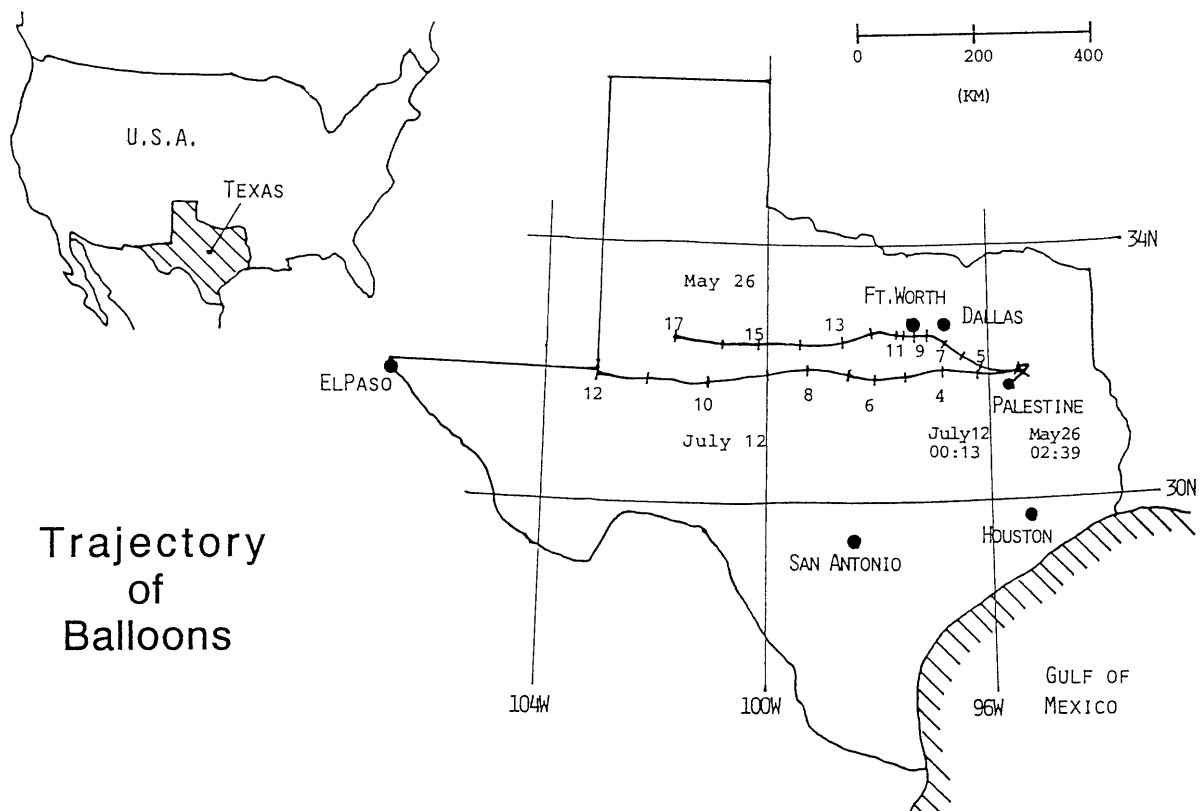


図1 1991年アメリカ遠征における気球航跡図

表 2 1991年 BICE 気球飛翔実験

- ・放球所 米国テキサス州 National Scientific Balloon Facility
- ・使用気球 11.3million cubic feet

Flight #	1499P	1501P
放 球 日 時	1991年 5 月26日 2時39分 (UT)	1991年 6 月12日 0時13分 (UT)
水平浮遊高度	38.5～39km	36.5～38.5km
水平浮遊時間	12時間	8 時間
備 考	観測成功。 ただし、検出器に超過ノイズあり。	観測成功。

表 3 1992年 BICE 気球飛翔実験

- ・放球場所 オーストラリア北部準州アリススプリングス気球基地
- ・使用気球 11.3million cubic feet

Flight #	330N	332N	333N
放 球 日 時	1992年 4 月27日 7 時32分 (UT)	1992年 5 月 8 日 7 時 8 分 (UT)	1992年 5 月24日 7 時45分 (UT)
水平浮遊高度	17km (最大到達高度)	38～38.5km	38～38.5km
水平浮遊時間	—	13時間	12時間
備 考	カラー異常離脱の衝撃により メインカッター誤動作	気球梱包袋がゴンドラに からまり姿勢制御できず	観測成功

ただし、第1回目のフライトでは、検出器に原因不明の超過ノイズがみられ、検出限界が設計値よりもかなり悪化した。第2回目のフライトではすべての観測器が、ほぼ正常に作動し、極めて良質のデータを大量に取得することができた。

3.2 1992年オーストラリア遠征

1992年には、南天銀河面およびマゼラン雲の観測を主目的として、南半球での観測を行った[10]。表3に気球飛翔実験の緒元をまとめる。

飛翔実験は、オーストラリア北部準州アリススプリングス気球基地から行った。気球飛翔作業は、米国 *National Scientific Balloon Facility* (NSBF) がオーストラリアに出張して行った。NSBF は、1987A 出現以後、頻繁にオーストラリア遠征を行っており、今回もその NSBF Australian Campaigns の一環としての遠征であった。我々は、その Campaigns に参加する形をとった。

我々の観測器を搭載した気球飛翔は合計3回行われたが、最初の2回は、気球自身の事故のため、観測には至らなかった(表3)。

しかし、3回目の実験は、正常に行われ、大量のデータを取得することができた。ただし、放球時期が当初の予定よりも遅くなったため、Turn Around の時期を過ぎてしまい、気球は東方へ非常に速く流された。そのため、データ受信・コマンド送信は、アリススプリングスでのみならず、東方に約1,000km 離れたクイーンズランド州ロングリーチでも行った。観測後、観測器はアリススプリングスの東方約1,200km で回収された。図2に、3回目実験の気球航跡、およびデータ受信・コマンド送信基地の位置を示す。

4. 観測・解析方法

大気中からの遠赤外線観測の場合、最大の課題は、天体以外(地球大気や観測器自身など)からやってくる強い背景放射を、いかに取り除くかということである。このために一般的に用いられてきた方法は、空間的に信

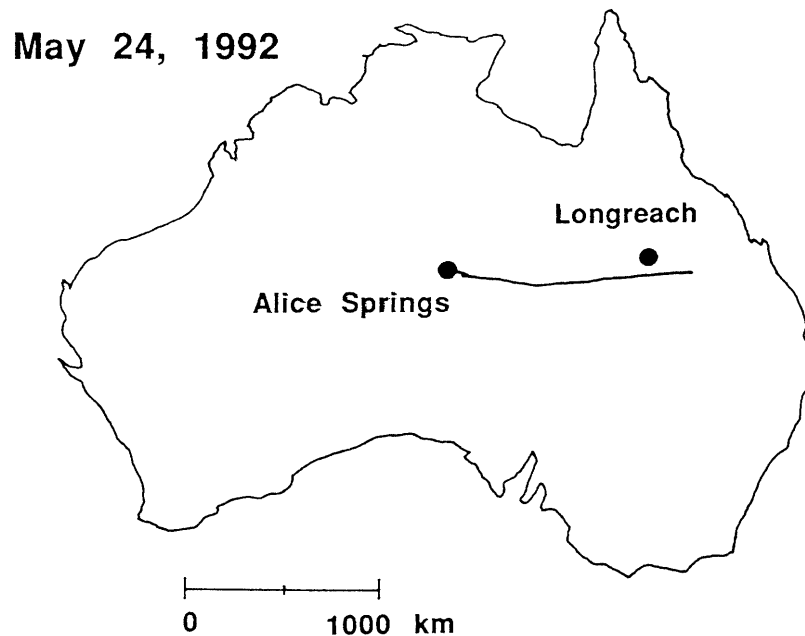


図 2 1992年オーストラリア遠征における3回目のフライトの気球航跡図。Alice Springs と Longreach の2箇所において、データ受信・コマンド送信を行った

号に変調を加えて、その変調された成分のみを取り出す「空間チョッピング方式」である。しかし、空間チョッピングでは、チョッピング幅よりも空間的に広がった成分については、原理的に観測が困難である。空間的に広がった[CII]スペクトル線を観測目的としている我々にとっては、これは大きな問題となる。

そこで、空間的に広がったスペクトル線も効率良く測定するために、「波長スキャン方式」を採用した。これは、信号の変調を空間的にではなく波長方向に行うものである。具体的には、ファブリ・ペロー分光器の二組のエタロンのうち、高次のエタロンを連続的に動かすことにより、透過波長をスキャンする。スキャン幅は[CII]スペクトル線の静止波長に対して $\Delta V = \pm 260 \text{ km s}^{-1}$ 、スキャン周波数は 2.7 Hz である。

また、波長スキャンを行うと同時に、ゆっくりと空間スキャンを行っている。空間スキャン速度は $18' \text{ s}^{-1}$ または $12' \text{ s}^{-1}$ 、スキャン幅はそれぞれ $\pm 6^\circ$ または $\pm 4^\circ$ である。空間スキャンは、方位角方向のみに行き、仰角はスキャン中は固定した。

このようにした得られたスペクトル線に、大気放射の影響の補正を行うために、空間スキャンのある一定の範囲では[CII]スペクトル線の強度はゼロであり、観測されたプロファイルは純粋に「大気+観測機器の熱放射」プロファイルであるという仮定をした。たとえば銀河面の観測では、銀緯の絶対値 $|b|$ が 3° を超えるところでは[CII]強度はゼロとあるとして、 $|b| < 3^\circ$ における各観測点での観測値から差し引いた。

このように大気の補正を加えた観測プロファイルに、Lorentizan + Linear Base Line の最小二乗フィッティングを行った。Lorentzian は、その「高さ」・「線幅」・「線中央の位置」の3つをフリー・パラメータとしており、その各々から、「スペクトル線の強度」・「スペクトル線の中心速度」・「スペクトル線の幅」(Instrumental Profile と Convolution されている)が得られる。このようにして得られた各パラメータを、空間的に $3'$ グリッドにふりわけ、その結果を Gaussian で平滑化し、最終的な空間分解として $15'$ を得た。

スペクトル線強度の絶対値の校正には、我々の1988年の M17 の観測値を用いた[I1]。絶対値の校正誤差は $\pm 30\%$ 以下である。

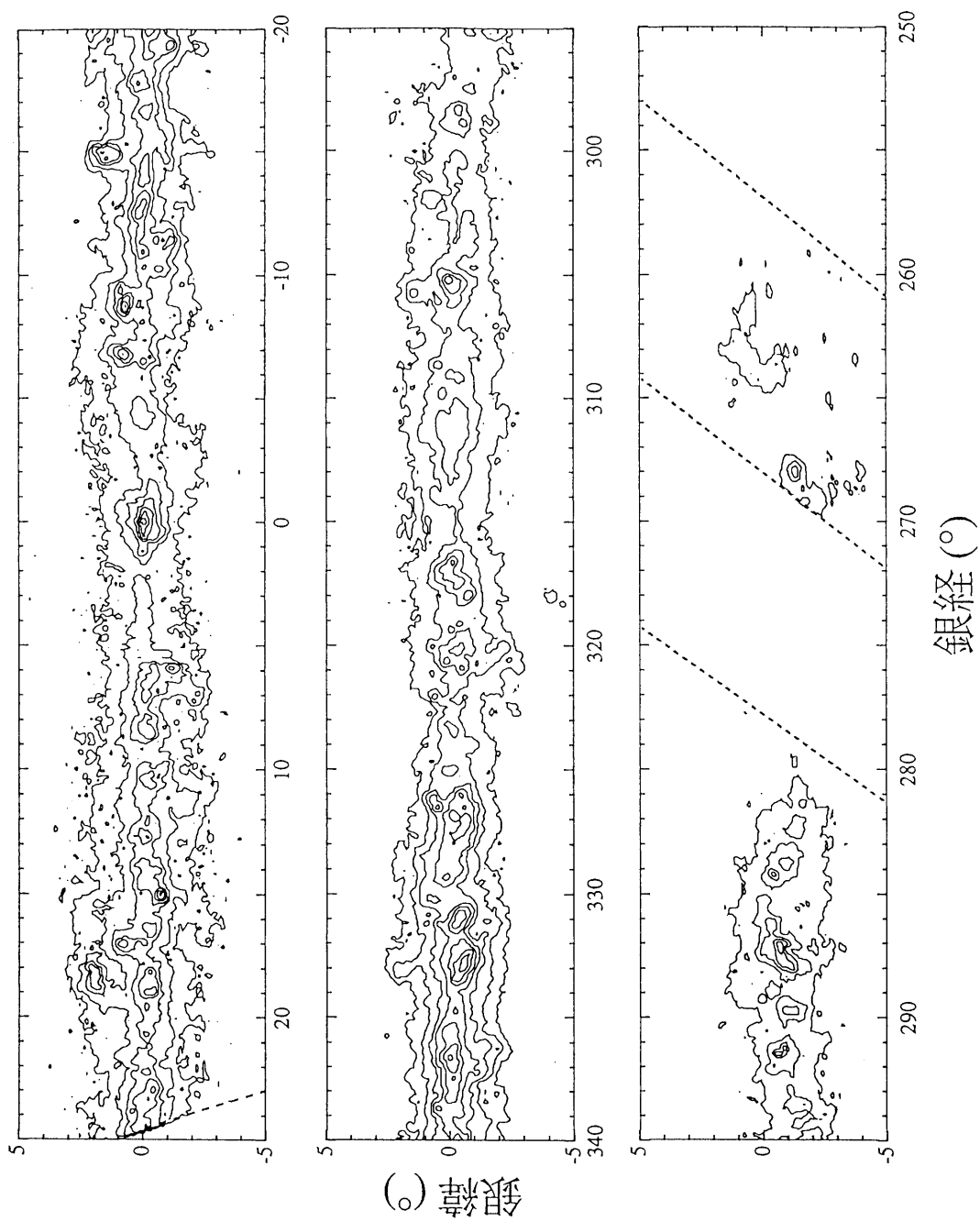


図 3 遠赤外[C II]スペクトル線の銀河面強度分布図。空間分解能は15'。等強度線のレベルは2, 7, 15, 25, 40, 60, 90, $120 \times 10^{-5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 。銀経 $\sim 275^\circ$ 付近および、銀経 $\leq 255^\circ$ は欠測

5. 観測結果

BICE の 2 回の観測遠征の結果、表 4 に示すように、多種多様な観測結果が得られた。個々の結果の詳細については、別の機会に論ずるとして、この節では、BICE によって得られた観測結果の内、主なものについての概要をまとめる。

5.1 銀河面

5.1.1 点源と拡散成分

銀河面に関しては、3 回のフライトの合計で、 $255^{\circ} \leq l \leq 78^{\circ}$ の範囲が観測されたが（表 4）、ここではそのうちでも観測結果の質の良い $255^{\circ} < l < 25^{\circ}$ の範囲に議論を限定する。図 3 に結果を示す [12]。

我々は、観測したほとんどの領域から、強い [C II] 輝線を検出した。図 3 には点源と拡散成分が見られる。このうち、点源のほとんどは、H II 領域／星生成領域に空間的に対応している。これらの領域では、そこに埋もれている早期型星からの紫外線によって、周りの分子雲まが光解離され、あたたかな光解離領域（Photodissociation Regions）が形成され、そこから強い [C II] 輝線が放出されているものと思われる。ただし、遠赤外連続波に対する [C II] 輝線の相対強度は、点源ごとにかなり異なり、点源ごとの内部の物理状態の違いを反映しているものと思われる。

図 3 には、さらに点源には直接には付随していない、拡散成分が広く見えている。このような拡散成分は他の波長でも観測されているが、[C II] 輝線の特徴は、遠赤外連続波や電波連続波と比べると、点源に対するこの拡散成分の強度が比較的強いということである。遠赤外連続波はほぼ全強度を反映していると考えてよいので、この結果は、拡散成分では [C II] 輝線の全強度に占める割合が高くなっていることを示している。この拡散成分の銀緯方向のスケールハイトは、星生成に関係するミリ波 CO 輝線や遠赤外連続波とほぼ同等であり、H I 21cm 波のスケールハイトよりはかなり小さい。したがって、[C II] 輝線が若い星の分布と相関がよいことは事実である。しかし、この拡散成分の正確な起源は、はっきりとはしていない。この起源が解明されれば、様々な相からなる星間物質の相互作用と進化について、理解が大きく進むことであろう。

5.1.2 銀経分布

[C II] 輝線の銀緯分布は上記のように他の若い星のトレーサーとよく似た分布を示したが、その銀経分布は他のトレーサーとはかなり異なる分布を示した。図 4a に [C II] スペクトル線の強度分布 ($I_{\text{[C II]}}$) を、図 4b に IRAS の観測から求めた $40\text{--}120\mu\text{m}$ の遠赤外の強度分布 (I_{FIR}) をそれぞれ示す。両者で最も大きな差が見られるのは、銀河中心方向である。銀河中心は遠赤外連続波では圧倒的なピークであるが、[C II] 輝線ではそれほどはっきりとしたピークではない。この様子は、両者の比 ($I_{\text{[C II]}}/I_{\text{FIR}}$) をとるとよりはっきりとする（図 4c）。この比は、銀河中心方向ではっきりとした「へこみ」を示すものである。

遠赤外連続波は全エネルギーをほぼ表すため、遠赤外連続波が銀河中心方向で強いということは、星間輻射場もまた銀河方向で強くなっているはずである。それにもかかわらず、なぜ [C II] 輝線が銀河中心方向で相対的に弱くなっているかについては、以下のような可能性が考えられている。

- (1) 銀河中心領域の全光度には、晩期型星の寄与が大きく、炭素を電離できるような紫外光の割合が低い。
- (2) 銀河中心領域では、紫外光度の割に密度が大きいために、Self-Shielding により炭素イオンの形成が押さえられている。
- (3) 銀河中心領域では、塵粒子の性質が異なるため、塵を介したガスの加熱効率が低くなっている。

このうちのどれが原因かは未だ特定できていないが、いずれにせよ、銀河中心方向の星間物質の特異性を解明するうえで、この観測は大変に重要な意義を持つであろう。

5.1.3 速度分布

波長スキャン式ではスペクトル線の中心速度を決めることができるが（4 節）、実際に観測を行ってみると、

表 4 観測領域一覧

領域名	観測領域	観測 Flight
銀河面	$255^\circ \leq l \leq 356^\circ, b \leq 3-4^\circ$	1992/3rd Flight
	$348^\circ \leq l \leq 25^\circ, b \leq 3^\circ$	1991/2nd Flight
	$11^\circ \leq l \leq 78^\circ, b \leq 3^\circ, (\text{ただし } S/N \text{ 悪し})$	1991/1st Flight
Cyg-X 領域	$76^\circ \leq l \leq 84^\circ, -2^\circ \leq b \leq 4^\circ$	1991/2nd Flight
ρ Oph 暗黒星雲	$16\text{h}10\text{m} \leq \alpha \leq 16\text{h}33\text{m}, -26^\circ \leq \delta \leq -22.5^\circ$	1991/2nd Flight
大マゼラン雲	$4\text{h}40\text{m} \leq \alpha \leq 5\text{h}50\text{m}, -72^\circ \leq \delta \leq -65^\circ$	1992/3rd Flight

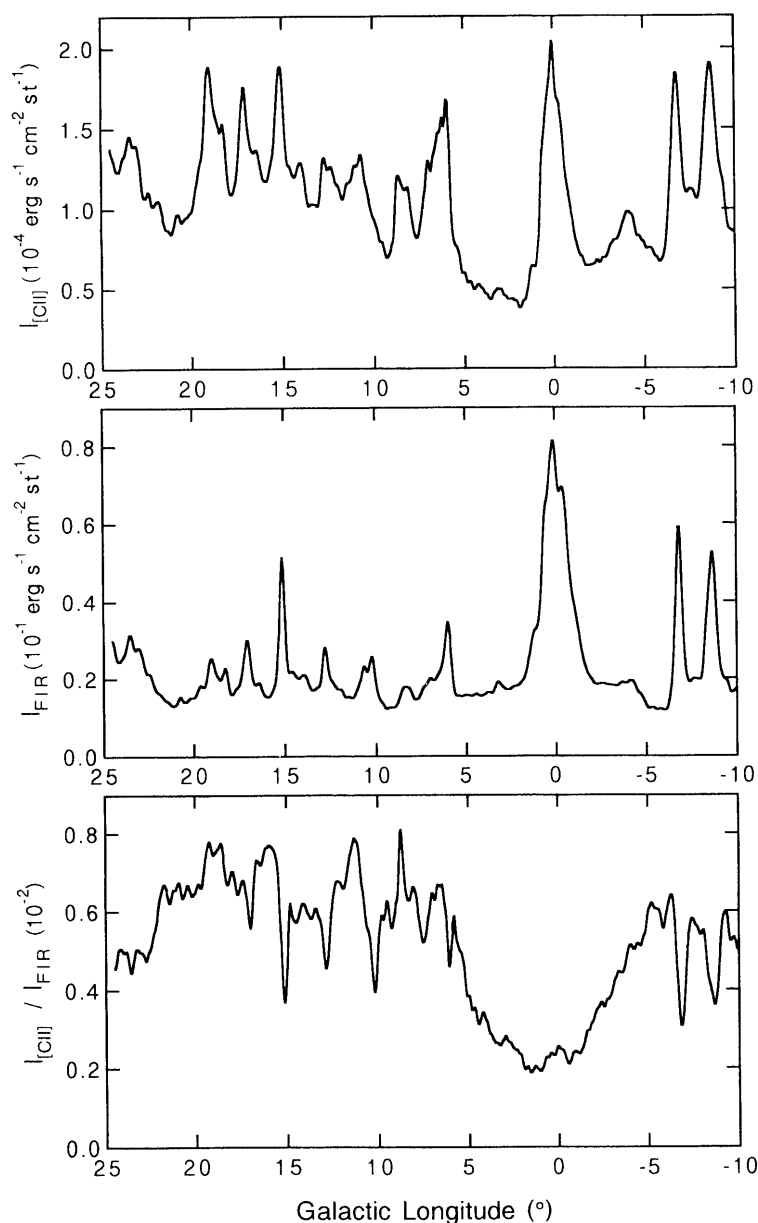


図 4 星間物質の各種トレーサの銀経分布。それぞれ銀緯方向に $\pm 2^\circ$ の信号を平均したもの。(a)遠赤外[C II]スペクトル線の強度分布 ($I_{[\text{C II}]}$)。 (b)遠赤外連続波の強度分布。IRAS60 μm および100 μm の観測から求められた遠赤外(40–120 μm)での全エネルギー (I_{FIR})。 (c)遠赤外[C II]スペクトル線の遠赤外連続波に対する相対強度 ($I_{[\text{C II}]} / I_{\text{FIR}}$)

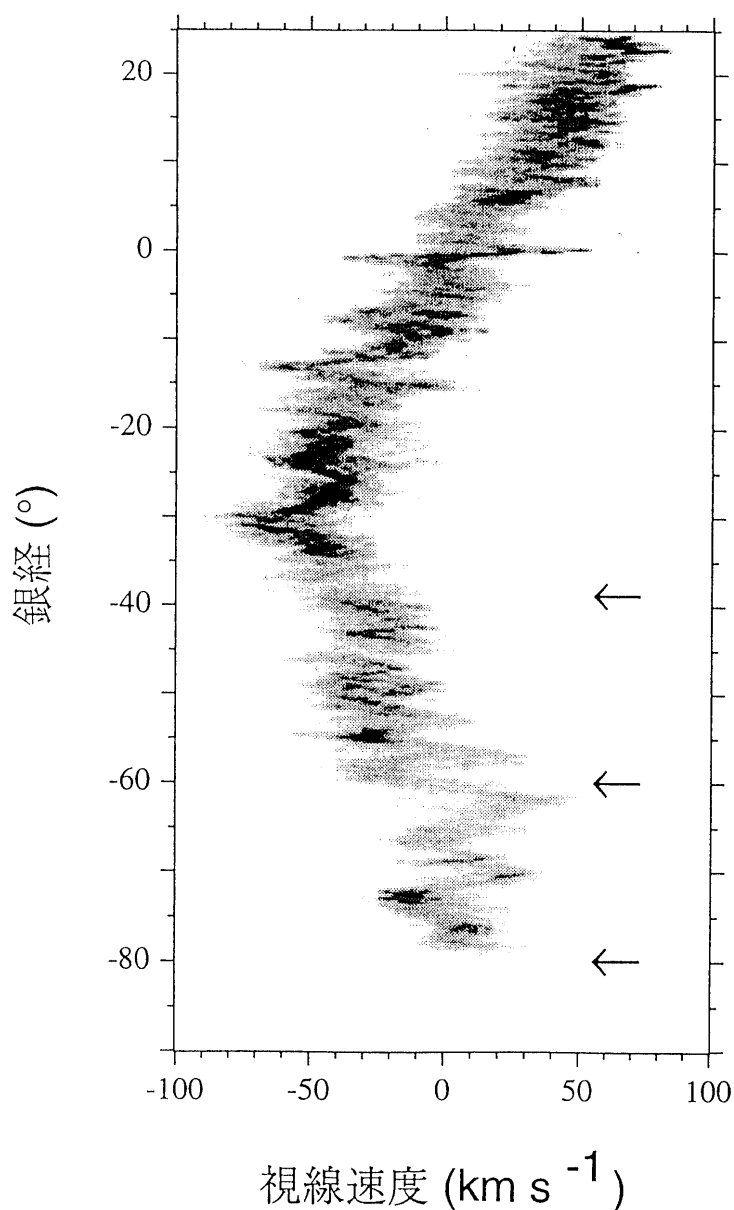


図 5 遠赤外[C II]スペクトル線の速度分布。輝線の速度中心に、強度で重みをつけて各観測点毎にプロットした。横軸は、Local Standard of Rest に対する視線速度に換算されている

その決定精度が分光器の分解能よりも遙かに良く、 $\pm 10 \text{ km s}^{-1}$ 以下の誤差しかもたないことが分かった。

波長スキャン方式により求めた、銀河面での中心速度の銀経分布を図5に記す。波長スキャン方式では、中心速度を決定する際に、各観測点において単一の速度成分を仮定しているが、これは現実をあまりにも単純化している。それにもかかわらず、図5では、はっきりと銀河系の差動回転の様子が見られる。さらに、矢印で示したように、速度成分が3箇所でジャンプしている。各々のジャンプは、銀河系の腕の接線方向に対応している。

このように、波長スキャン方式は、中心速度を決定するうえでも大変に有効な手法であり、分光器の持つ分解能の1桁以上細かい精度で速度決定をできることが分かった。

5.2 Cygnus-X 領域

Cygnus-X 領域は、我々の太陽系が位置する Local Arm の接線方向にあたるため、巨大分子雲・活動的星生成領域・超新星残骸など多種多様な天体が含まれており、これら各種天体の相互作用、およびそれに伴う星間雲の進化を総合的に調べるうえで、大変に興味深い領域である。

我々は、この Cygnus-X 領域を上記 BICE を用いて観測し、そのほぼ全域から強い[C II]輝線を検出した[13]。図 6a に観測された[C II]輝線の空間分布を示す。領域中、西側の領域には IC1318 など進化した H II 領域が多く、一方東側には DR21 などの生まれたてのコンパクトな H II 領域が多いが、そのどちらからとも強い[C II]輝線が検出されていることが分かる。このように個々の H II 領域に付随する成分以外にも、銀河面同様、拡散成分が存在している。

図 6b には、同領域でのミリ波 CO 分子輝線の分布を示す。これは、[C II]輝線とはかなり異なる分布をしている。[C II]輝線が銀河面から北側に向けて広く分布しているのに対し、CO 輝線の分布は銀河面に集中している。すなわち、北側の領域では、[C II]輝線は比較的強いにもかかわらず、CO 輝線がほとんど検出されていないのである。

これは、この領域では、CO がほとんど光解離されてしまっているためと考えられる。一般に星間雲は一様均質ではなく密度むらがあるため、雲全体を1つのものとして考えるよりは、小さな Cloudlet が集合してできていると考えるべきである。そして、光との相互作用を考える際には、雲全体の大きさではなく、この Cloudlet の大きさが問題となる。したがって、北側の領域では銀河面と較べると Cloudlet があまり大きくないため、紫外光が Cloudlet の真中まで染み込んでしまい、CO をほとんど解離してしまい、C⁺領域のみが残ったと考えれば、観測結果を説明することができる。CO がほとんど解離されてしまうためには、Cloudlet の水素の柱密度(N_H)としては 10^{22}cm^{-2} 以下に制限される。

このように、[C II]の観測により、雲を構成する Cloudlet を空間的に分離しなくても、ある程度その性質に制限を与えることができた。

5.3 ρ Ophiuchi 暗雲星雲

炭素の電離ポテンシャル(11.3eV)は、水素の電離ポテンシャル(13.6eV)よりも低いために、H II 領域を形成できないような B 型星でも、C II 領域は形成することができる。このような B 型星の周りの C II 領域では、O 型星の周りの C II 領域とは、紫外光輻射場のエネルギースペクトルも輻射密度も異なるため、両者は違う性質を持つはずである。しかしながら、従来の[C II]輝線観測は、ほとんどが O 型星の周りの C II 領域に限られていた。

ρ Ophiuchi 暗黒星雲は、B 型星の周りの C II 領域を調べるためには最適の領域である。これは、(1) ρ Ophiuchi 暗黒星雲は活発な星生成領域であるが、そこでは O 型星は生まれておらず、最も早期型星では B 型星であり、さらに、(2)近傍(距離160pc)に位置し、他波長でも今までに詳しい観測が行われており、比較も行いやすい、などの理由による。

図 7a に、BICE によって観測された ρ Ophiuchi 暗黒星雲での[C II]輝線分布を示す[14]。あわせて、[C II]輝線の励起の源になっていると思われる3つの埋もれた B 型星(HD 147889, S-1, SR 3)および、1つの可視 B 型星(σ Sco)の位置も示す。これらの星の物理量には表 5 にまとめている。また、同じ領域の他波長の観測として、図 7b には H II 領域の分布を示す 2.3GHz の電波連続波の分布を、図 7c には塵粒子の熱放射の分布を示す IRAS 100 μm の分布を、図 7d には分子雲の分布を示す CO 輝線の分布を併せて示す。

[C II]輝線(図 7a)は、IRAS 100 μm (図 7c)とはよく似た分布を示しているが、他の2つとは分布が全く異なっている。3つの埋もれた B 型星の周りで[C II]輝線および遠赤外連続波の強度が最も強くなっている(図 7a)。ここでは CO 輝線も強く検出されており(図 7d)、濃密な分子雲が存在していることが分かる。この領域で[C II]輝線が検出されたということは、濃密な分子雲を、埋もれた B 型星が照らして光解離領域を形成し、そこから強い[C II]輝線および遠赤外連続波が放出されていることを示す。一方、この領域からは電波連続波がほとんど検出されておらず(図 7b)、H II 領域は形成されていない。したがって、この領域は H II 領域を伴わない C II

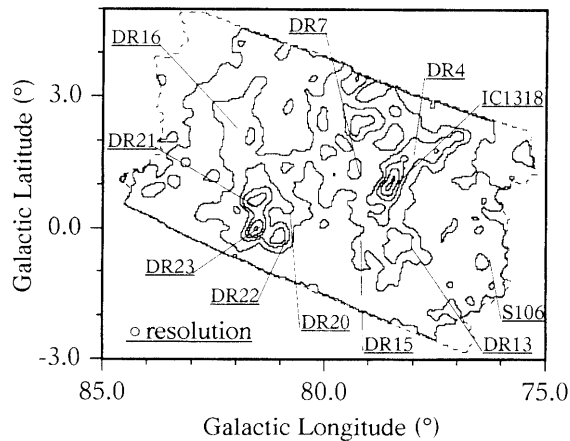


図 6a Cygnus X 領域の遠赤外 [C II] スペクトル線強度分布図。空間分解能は $15''$ 。等強度線のレベルは、3, 8, 13, 18, 23, $18 \times 10^{-5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ ster}^{-1}$ 。代表的な H II 領域の名前を併せて示す。銀河面のみならず、北側の銀緯の高い領域まで遠赤外 [C II] スペクトル線が広がっている

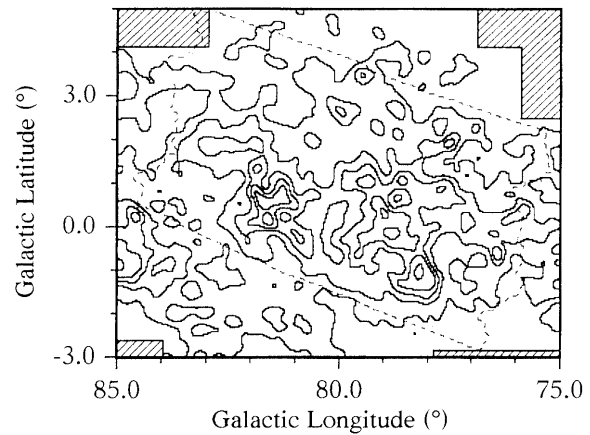


図 6b Cygnus X 領域のミリ波 CO ($J=1-0$) スペクトル線強度分布図。空間分解能は $15''$ 。等強度線のレベルは、2, 6, 10, 14, 18 K km s^{-1} 。CO スペクトル線は、遠赤外 [C II] スペクトル線とは異なり、主に銀河面付近に分布しており、高銀緯までは広がっていない。文献[16]による

領域の典型的な例といえるであろう。

一方、[C II] 輝線と遠赤外連続波には、西南に伸びた成分が見られる (図 7a, c)。この成分は可視星でいる σ Sco (表 5) によって励起されているものと思われる。 σ Sco は、この領域内では最も早期型の星であり、小さいながらも H II 領域を形成することができる (図 7b)。一方、CO はここからほとんど検出されていない (図 7d)。したがって、分子雲はここではほとんど完全に光解離されており、[C II] のみが放射されていると考えられる。

このように、 ρ Ophiuchi 暗黒星雲からは様々な成分が検出されたが、これらは O 型星の周りのような紫外光の激しい所ではなく、紫外光がやや弱い、より一般的な領域をトレースしている。したがって、この結果はこの領域の解明にとどまらず、より一般的な星雲真の性質の理解にも役立つと考えられる。

5.4 大マゼラン雲

大マゼラン雲は、最も近傍 (50kpc) に位置する系外銀河の 1 つであり、星間物質の状態を銀河全体にわたって調べるには最も適した銀河である。さらに、大マゼラン雲は、その質量が銀河系の数十分の一という矮小不規則銀河であり、その一般例に漏れず、水素に対する重元素の存在比が、我々の銀河系での値よりもかなり小さい。例えば、炭素/水素存在比は、銀河系のわずか $1/4$ の値である。この小さな重元素比のために、塵粒子/ガスの質量比もまた小さい。一般に紫外光はほとんど塵粒子に吸収される。したがって、塵粒子/ガスの質量比が小さくなれば、星間物質と紫外光の相互作用のしかたは、大きく変わってくることが予想される。

我々は、BICE を用いて、大マゼラン雲からの [C II] 輝線を、1992 年のオーストラリア遠征において観測した (表 4)。観測領域は、大マゼラン雲のほぼ全域を覆っている。

図 8 に観測結果を示す [15]。大マゼラン雲のほぼ全域から [C II] 輝線が検出されている。 $(\alpha, \delta) = (5\text{h } 40\text{m}, -69^\circ \sim -70^\circ)$ 付近に、南北に瓢箪型の [C II] 輝線の強い領域が見られるが、この北側の部分が大マゼラン雲の中でも最も星生成活動の活発な領域である 30Dor にあたる。このほかにも、N 159 や N 11 などの星生成領域にも [C II] 輝線のピークが見られる。しかし、可視光で最も顕著な構造である Stellar Bar は、[C II] では顕著ではない。したがって、可視光で見えている星の分布と、[C II] 輝線がトレースしている暖かいガスの分布とは、大マ

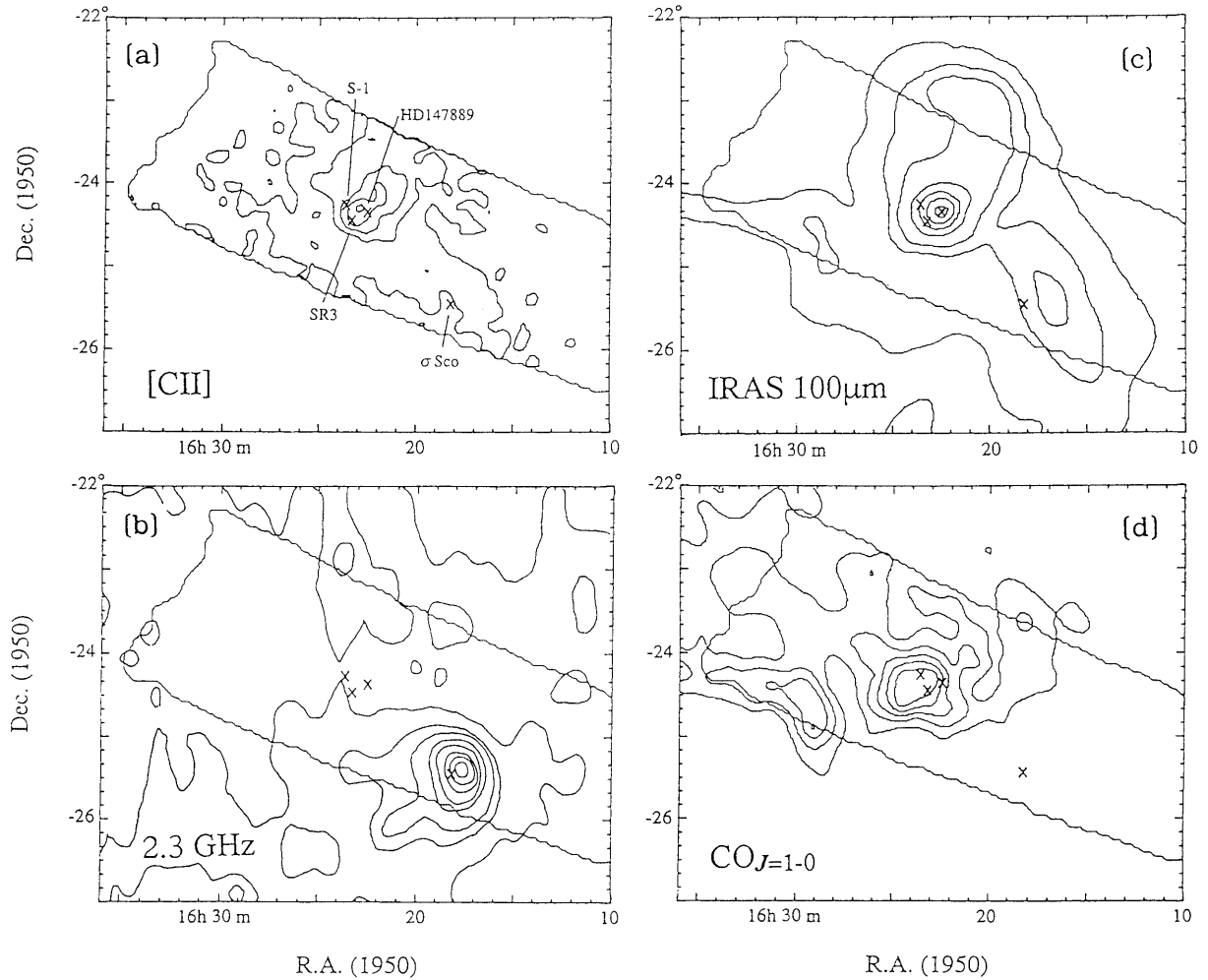


図 7 ρ Ophiuchi 暗黒星雲の様々な波長における強度分布図。細い実線は、遠赤外[CII]スペクトル線の観測の範囲を示す。また×印は、[CII]スペクトル線の励起に関与していると思われるB型星(表5)の位置を示す

- (a)遠赤外[CII]スペクトル線の強度分布図。空間分解能は $15''$ 。等強度線のレベルは、2, 4, 6, 8, $10 \times 10^{-5} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ ster}^{-1}$ 。
- (b)2.3GHzでの電波連続波の強度分布図。ビーム幅は $20''$ 。等強度線のレベルは、100, 160, 220, 280, 340, 400, 460mK。文献[17]による
- (c)IRAS100 μm の強度分布図。黄道光の影響は取り除かれている。データは、 $7.5''$ 間隔。等強度線のレベルは、1, 2, 3, 6, 9, 12, $15 \times 10^8 \text{ Jy ster}^{-1}$ 。文献[18]による
- (d)ミリ波CO($J=1-0$)スペクトル線の強度分布図。データは、 $15''$ 間隔。等強度線のレベルは、7, 14, 21, 28, $35 \times \text{K km s}^{-1}$ 。文献[19]による

ゼラン雲のなかでは大きなスケールで食い違っているということが分かる。

大マゼラン雲の観測で最も重要な点は、銀河全体にわたって[CII]スペクトル線がミリ波CO輝線に比べて相対的に強いということである。図9に、銀河系と大マゼラン雲それぞれにおける、[CII]輝線とCO輝線との相関を示す。どちらの銀河でも銀河内で相関にバラツキが見られるが、そのバラツキ以上に2つの銀河の間で系統的に相関が異なることが分かる。すなわち、同一のCO強度で比較した場合、大マゼラン雲での[CII]強度は、銀河系での値よりも、約一桁大きい値を示しているのである。

表 5 ρ Ophiuchi 暗黒星雲中の B 型星

名 前	型	明るさ (L/L_{\odot})	備 考
HD147889	B2 V	5500	可視。ただし赤化が非常に大。
S-1	B3 V	1500	非可視。
ST3	B6 V	125	非可視。
σ Sco	B1 III	39000	可視。赤化が少なし。

これは、前述した大マゼラン雲における「小さな重元素存在比」に起因していると考えられる。光解離領域のなかでは、紫外光の染み込み方によって、化学組成が変化する。例えば、光解離領域の表面では、炭素は一般に一回電離した炭素イオン (C^+) になっているが、光解離領域の中に進み、紫外光が減衰していくにしたがって、中性炭素 (C) や一酸化炭素分子 (CO) になる。この $C^+/C/CO$ 遷移域の深さは、多くの場合には塵粒子による紫外光の減衰によって決定されている。したがって、大マゼラン雲のように塵粒子の相対存在比が小さなところでは、紫外光が星間雲の奥深くまで染み込むことができ、分子雲に対して光解離領域のしめる体積の割合が大きくなると考えられる。このため、分子雲をトレースするミリ波 CO 輝線に対して、光解離領域をトレースする [C II] 輝線の強度が、相対的に強まっているのだと考えられる。両銀河での雲の典型的な大きさが共通で、 $N_H \sim 10^{22} \text{cm}^{-2}$ 程度の柱密度を持っていると仮定すれば、観測された一桁の相対強度の差を説明することができる。

我々の [C II] 輝線の観測により、銀河全体のスケールでみても、このように星間雲の性質に系統的な差が生まれることが明らかになった。

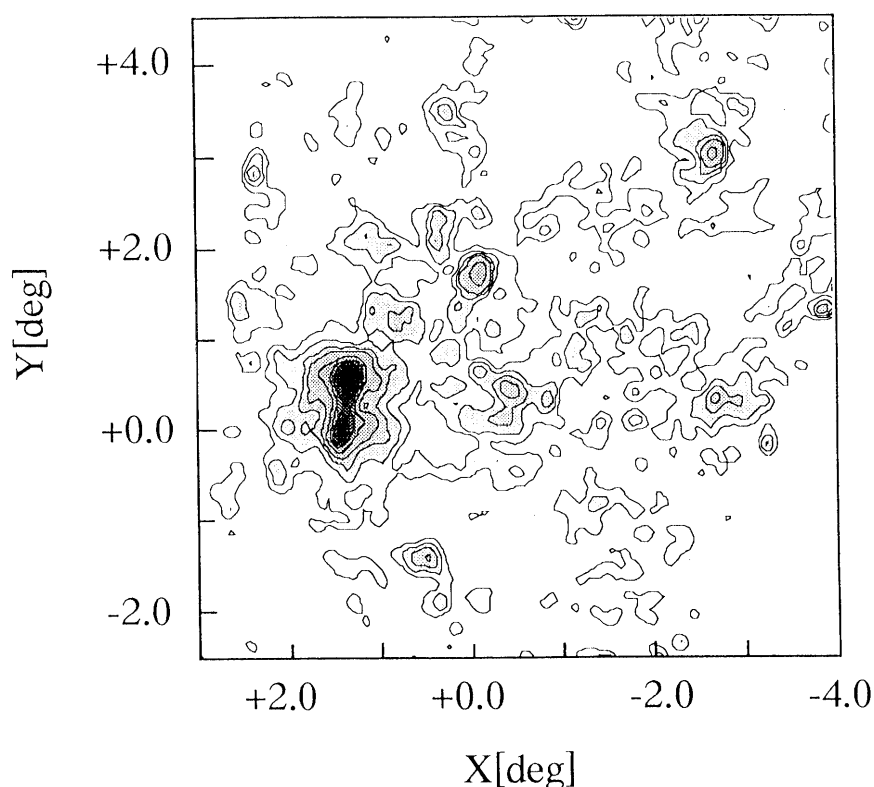


図 8 大マゼラン雲における、遠赤外 [C II] スペクトル線の強度分布図。空間分解能は $15'$ 。等強度線のレベルは、1, 2, 4, 6, 8, 10, $12 \times 10^{-5} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-1} \text{ster}^{-1}$ 。座標の原点は、R. H. (1950) = 5h24m, Dec. (1950) = $-69^{\circ}47'$

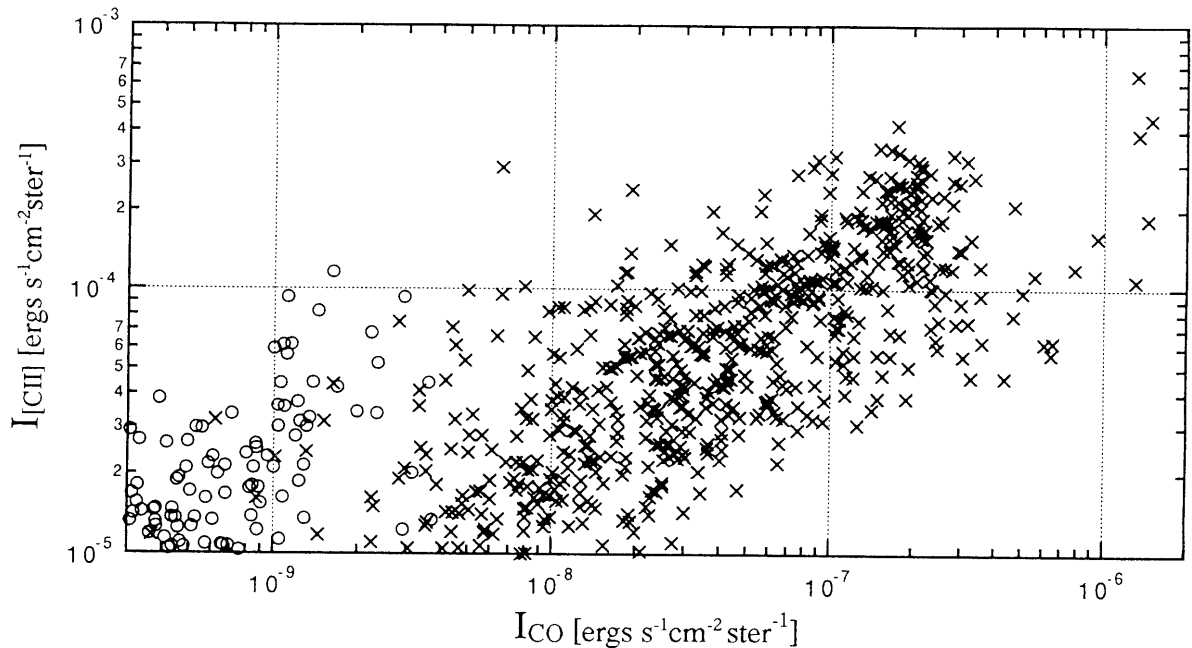


図 9 遠赤外[C II]スペクトル線とミリ波 CO ($J=1-0$) スペクトル線との強度相関。×が銀河面における値。○が大マゼラン雲における値。遠赤外[C II]スペクトル線は、すべて BICE による観測値。CO の観測値は、銀河面は文献[20]、大マゼラン雲は文献[21]による

6. ま と め

- (1) 星間ガスのエネルギー収支に大変に重要な役割を果たす遠赤外[C II]スペクトル線を、広い領域にわたってサーベイ観測するために、専用機 BICE (*Balloon-borne Infrared Carbon Explorer*) を開発した。
- (2) BICE を用いた海外観測遠征実験を 2 回行った。1991 年には米国から北天の観測を、1992 年にはオーストラリアから南天の観測を行った。
- (3) これらの実験により、銀河面の広い範囲 ($255^\circ \leq l \leq 78^\circ$, $|b| \leq 3^\circ$), Cygnus-X 領域, ρ Ophiuchi 暗黒星雲、大マゼラン雲などが、[C II]輝線によりマッピング観測された。
- (4) 銀河面の観測では、大変に強い拡散成分が観測された。さらに、銀河中心方向では[C II]拡散成分の遠赤外連続波に対する相対強度が、はっきりと小さくなっていることが分かった。また、銀河系差動回転のようすも波長スキャン方式の観測ではっきりと検出された。
- (5) Cygnus X 領域の観測では、雲を構成する Cloudlet の大きさに制限があることが分かった。
- (6) ρ Ophiuchi 暗黒星雲の観測では、紫外光強度の強くない、比較的一般的な星間雲の様々な存在形態が明らかになった。
- (7) 大マゼラン雲では、重元素存在比が小さいために、ミリ波 CO 輝線に対する[C II]輝線の相対強度が、銀河系での値よりも、系統的に一桁程大きくなっていることが観測された。

謝 辞

BICE を用いた一連の観測は、米国 National Scientific Balloon Facility のスタッフの卓越した気球飛翔作業により、初めて可能になったものである。また、この観測で用いている検出器は、郵政省通信総合研究所との共同研究により開発された。さらに、BICE の開発にあたっては、宇宙科学研究所気球工学グループの全面的な支

援を受けた。この研究は、日本側は文部省科学研究補助金の援助を、米国側は NASA からの援助を受けている。支援を受けたすべての人々に深く感謝する。

参 考 文 献

- [1] A. Dalgarno and R. A. McCray : 1972, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **10**, p. 375.
- [2] H. Shibai, *et al.* : 1990, in *Instrumentation in Astronomy VIII, Proc. SPIE*, **1235**, p. 108.
- [3] T. Nakagawa, H. Okuda, H. Shibai, H. Matsuhara, Y. Kobayashi, and N. Hiromoto : 1990, in *Instrumentation in Astronomy VIII, Proc. SPIE*, **1235**, p. 97.
- [4] 芝井 広他 : 昭和63年度, 宇宙科学研究所報告, 特集**23**号, p. 69.
中川貴雄他 : 平成元年度, 宇宙科学研究所報告, 特集**25**号, p. 253.
H. Shibai, *et al.* : 1991, *Astrophys. J.*, **374**, 522.
- [5] 矢島信之他 : 平成3年度, 宇宙科学研究所報告, 特集**30**号, p. 13.
- [6] J. B. Lugtern : 1987, *Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley*.
- [7] 中川貴雄他 : 平成3年度, 宇宙科学研究所報告, 特集**30**号, p. 83.
Y. Yamashita : 1991, *Mast. Thesis, University of Tokyo*.
- [8] 中川貴雄他 : 平成2年度, 大気球シンポジウム収録, p. 115.
- [9] 中川貴雄他 : 平成3年度, 大気球シンポジウム収録, p. 185.
- [10] 中川貴雄他 : 平成4年度, 大気球シンポジウム収録, p. 140.
- [11] H. Matsuhara, *et al.* : 1989, *Astrophys. J. (Letters)*, **339**, L 67.
- [12] T. Nakagawa : 1993, in *Astronomical Infrared Spectroscopy : Future Observational Directions*, ed. S. Kwok, (San Francisco : ASP), p. 373.
T. Nakagawa, *et al.* : 1993, in *AIP Conf. Proc. 278, Back to the Galaxy*, ed. S. S. Holt and F. Verter, (New York : AIP), p. 303.
- [13] 上井靖生 : 平成4年, 東京大学修士論文.
Y. Doi, T. Nakagawa, Y. Y. Yui, H. Okuda, H. Shibai, T. Nishimura and F. J. Low : 1993, in *AIP Conf. Proc. 278, Back to the Galaxy*, ed. S. S. Holt and F. Verter, (New York : AIP), p. 307.
- [14] Y. Y. Yui, T. Nakagawa, Y. Doi, H. Okuda, H. Shibai, T. Nishimura and F. J. Low : 1993, *Astrophys. J. (Letters)*, **419**, L37.
- [15] 望月賢治 : 平成5年, 東京大学修士論文.
K. Moihizuki, T. Nakagawa, Y. Doi, Y. Y. Yui, H. Okuda, H. Shibai, M. Yui, T. Nishimura and F. J. Low : 1994, *Astrophys. J.*, **430**, L37.
- [16] H. O. Leung and P. Thaddeus : 1992, *Astrophys. J. Suppl.*, **81**, 267.
- [17] E. E. Baart, G. de Jager and P. I. Mountfort : 1980, *Astron. Astrophys.*, **92**, 156.
- [18] E. J. de Geus and W. B. Burton : 1991, *Astron. Astrophys.*, **246**, 559.
- [19] E. J. de Geus, L. Bronfman and P. Thaddeus : 1990, *Astron. Astrophys.*, **231**, 137.
- [20] T. M. Dame, *et al.* : 1987, *Astrophys. J.*, **322**, 706.
- [21] R. C. Cohen, T. M. Dame, G. Garay, J. M. Rubio and P. Thaddeus : 1988, *Astrophys. J. Letters*, **331**, L 95.