

## 気球による天体遠赤外分光観測

芝井 広・奥田 治之・中川 貴雄・松原 英雄  
舞原 俊憲\*・水谷 耕平\*・F. J. Low\*\*・西村 徹郎\*\*  
小林 行泰\*\*\*・高見 英樹†・広本 宣久††

(1989年1月10日受理)

## Far-Infrared Spectroscopic Observations by Balloon

By

H. SHIBAI, H. OKUDA, T. NAKAGAWA, H. MATSUHARA,  
T. MAIHARA, K. MIZUTANI, F. J. LOW, T. NISHIMURA,  
Y. KOBAYASHI, H. TAKAMI, and N. HIROMOTO

**Abstract:** Far-infrared spectroscopic observations have been made using a 50cm balloon-borne infrared telescope, a superfluid helium cooled Fabry-Perot spectrometer, and a frequency switching method, which is a newly developed observational technique. Remarkable two-dimensional [CII] line intensity maps constructed from the data show us that the [CII] 158 $\mu$ m line is strongly emitted not only from the photodissociation regions but also from their surrounding regions and from general region of the Galactic Plane. This fact indicates singly ionized carbon ions and carbon ionizing UV photons should be abundantly distributed in interstellar clouds of the Galactic Plane. Since the energy emitted in form of the [CII] 158 $\mu$ m line can reach up to 0.5 % of

---

\* 京都大学理学部

\*\* アリゾナ大学スチュワード天文台

\*\*\* 東京大学理学部

† 国立天文台

†† 郵政省通信総合研究所

the total energy output of the clouds, the [CII] line must be one of the dominant coolants of the interstellar cloud.

## 概 要

われわれは口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡 (BIRT) に超流動ヘリウム冷却ファブリ・ペロー分光器を搭載して、星間空間の比較的暖かい領域から放射される、遠赤外スペクトル線([CII]158 $\mu\text{m}$ , [OI]63 $\mu\text{m}$ )の観測に成功した。われわれの観測装置は広がった放射成分の検出に特に威力を発揮し、これらのスペクトル線の放射領域(光解離領域と考えられている)が星生成領域に限られず、周辺の低温分子ガス中にも広く存在すること、さらに銀河系全体にわたって広く一般的にみられることを明らかにした。また[CII]線の放射エネルギーは全放射エネルギーの0.1~0.5%にも達し、星間ガス雲の支配的冷却源であることが証明された。

### 1. 気球高度からの遠赤外分光観測の利点

赤外線と総称される波長域は1 $\mu\text{m}$ から1mmであるがこの中でも波長30 $\mu\text{m}$ から300 $\mu\text{m}$ の遠赤外領域は地上望遠鏡からの観測が、地球大気吸収のためまったく不可能である。そのためこれまでジェット機望遠鏡(KAOなど、高度12km程度)、気球望遠鏡(BIRT他多数、高度25-40km)、ロケット望遠鏡(高度200-400km)、軌道望遠鏡(IRAS)等、飛翔体を用いた観測が数多くなされてきた。広帯域の測光観測はIRAS(1983年)の成功によって一段落ついたといえる。測光観測で捉えられるのは星間塵の熱放射赤外線であるが、一般的に言って星間ガス中の原子や分子、イオン、ラジカル等が放射・吸収するスペクトル線の方が格段に多くの情報を含んでいる。このようなスペクトル線は分光器を用いた分光観測をする必要があるが、本格的な分光器を搭載した軌道赤外線望遠鏡計画(IRTS, ISO, SIRTfなど)はまだ準備段階であり、実現は数年先である。ロケットは観測時間が短すぎて分光観測に適さない。したがってジェット機もしくは気球を利用するのが、遠赤外分光観測ができる現状で唯一の方法である。

気球搭載赤外線望遠鏡(BIRT)以外に遠赤外分光観測のできる現在活動中の望遠鏡は、NASAのジェット機望遠鏡(KAO)だけである。しかしながらジェット機で到達できる12km程度の高度では、残留地球大気(特に水蒸気)の影響が強く残っている。特に今回我々が観測した[OI](63 $\mu\text{m}$ )や[CII](158 $\mu\text{m}$ )スペクトル線は、天体物理学的に非常に重要であるにもかかわらず、ジェット機高度ではすぐ近傍の波長に地球大気の強いスペクトル線の影響を強く受けていると思われる。

一方気球高度では残留地球大気の影響は10分の1から100分の1に減少するため、観測精度の向上が期待される。特に我々が世界に先駆けて開発した周波数スイッチング(Frequency Switching)の手法は、地球大気の放射が強ければ実現不能と考えられるため、気

球高度まで上がることの利点を十分に利用した、すなわち気球観測に適した手法である。

## 2. 気球観測装置

今回用いられた観測装置は、口径 50 cm の気球望遠鏡にファブリ・ペロー分光器を搭載したものであり、これらは何れも我々が開発したものである。望遠鏡の口径は世界最大級 (1 m 級) と比較すると若干小さいため、集光力、空間分解能の点ではやや劣る。しかし、精密なオフセットガイド装置を備えているため、地上望遠鏡と同じように目標天体の捕捉、日周運動の追尾等が可能である。これらの機能は長時間積分を常套手段とする分光観測に必須なものである。

また、遠赤外ファブリ・ペロー分光器は光学系全体を超流動ヘリウムで冷却することにより検出感度の向上を図ったもので、やはり世界でもトップレベルの性能を備えている。さらにスペクトル線の強度を効率よく測定するために、今回新たに周波数スイッチングの機能を付け加えた。これは分光器の選択透過波長を、観測したいスペクトル線を中心にして両側にスイッチングすると、スペクトル線の強度分だけ検出器が受ける信号量に変調されることにより、スペクトル線の強度を知る方法である。この手法は波長の長い電波領域や背景放射の小さい近赤外領域では用いられていたが、遠赤外領域のような背景放射の強い所で実現されたのはこれが初めてである。

写真 1, 2 にこれらの概観図、表 1 に主要性能を示す。詳細については、他の報告 [1] を参照されたい。

## 3. 気球観測経過

気球観測は 1985 年から 86 年にかけて計 6 回のフライトをオーストラリアで試みた。これらについては [2] を参照のこと。ここでは 1988 年 5 月から 6 月にかけてテキサス州パレ

表 1 観測装置の諸元

観測装置	気球搭載赤外線望遠鏡 BIRT (50cm $\phi$ ) 液体ヘリウム冷却遠赤外ファブリペロー分光器
観測波長	ch. 1 158 $\mu$ m ([CII]) ch. 2 63 $\mu$ m ([OI]) ch. 3 90-120 $\mu$ m (モニター)
波長分解能	2000 ( $\lambda/\Delta\lambda$ )
観測ビーム	3.6' $\phi$
観測モード	波長走査モード (副鏡チョッピングあり) 波長スイッチングモード (副鏡チョッピングなし)
検出限界	ch. 1 $3 \times 10^{-12}$ W $\cdot$ cm $^2$ $\cdot$ sr $^{-1}$ ch. 2 $3 \times 10^{-11}$ W $\cdot$ cm $^2$ $\cdot$ sr $^{-1}$ ch. 3 $3 \times 10^{-11}$ W $\cdot$ cm $^2$ $\cdot$ sr $^{-1}$ (100秒間積分, 10 $\sigma$ )

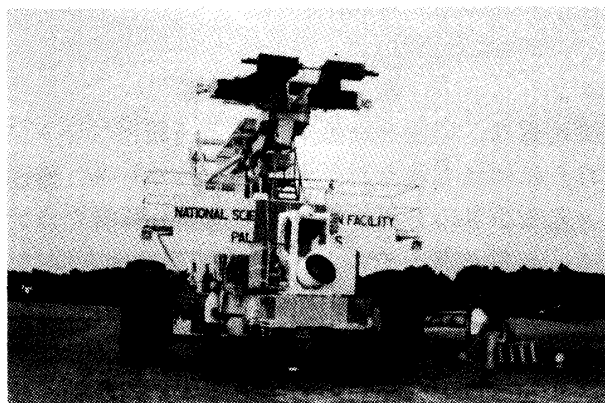


写真1 放球直前にランチャーにセットされた気球搭載赤外線望遠鏡 (BIRT)

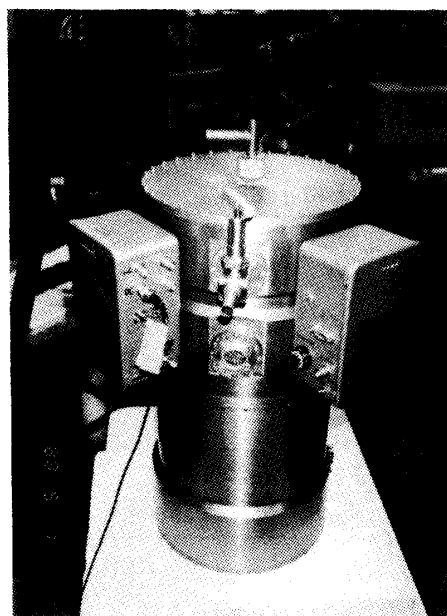


写真2 遠赤外ファブリ・ペロー分光器の外観

ステインで行なった2回のフライトの結果について報告する。

気球の放球は5月24日、6月4日の2回で何れも順調なフライトであり、観測機器もうまく動作した。また観測終了後の回収時の状態も良好で、落下衝撃による機器の損傷は全くといってよいほどなかった。2回のフライトを合わせて約14時間の観測時間が得られ、M 17, NGC 6334 の典型的な星生成領域を始め、銀河系の中心部、銀河面数カ所、さらには系外銀河 NGC 253 等を観測した。また感度と位置の較正のために、火星と土星を観測した。

#### 4. 観測結果

現在、得られたデータの解析はまだ終了していないが、以下に述べるような非常に重要な興味深い結果が、すでにいくつかみつかっている。観測したスペクトル線は中性酸素原子の微細構造線[OI]63 $\mu\text{m}$ と、 $\text{C}^+$ イオンの微細構造線[CII]158 $\mu\text{m}$ である。後者については周波数スイッチングの手法で広い領域の強度分布を観測することも行った。

##### a. 銀河系中心領域の新しい対称的構造

銀河系の中心部にはそこに固有の活発な活動が見られ、スケールは小さいものの活動銀河核のひな型ではないかと考えられている。しかしながらその統一的な描像を描くにはまだほど遠い状態である。

今回、銀経 $\pm 0.7$ 度にわたる広い範囲において[OI]63 $\mu\text{m}$ 、[CII]158 $\mu\text{m}$ のスペクトル線を波長スキャンモードで観測した。図1に銀河面に沿う線できった銀経-速度図(1-v図)を示す。この図で非常に特徴的な事実は銀河中心のピークと、それに劣らない強度をもった両側(銀経 $\pm 0.5$ 度)のピークが見えることである。このピークがはたしてリング上の構造を横からみているものか、銀河中心からの双極性の活動の結果か、あるいはたまたま偶然にそこにCII領域があるだけなのかはわかっていない。またSgrB2から[CII]線があまり出ていないように見えるのも、それらの星間ガス雲の物理を調べる上で重要な情報である。

##### b. M17領域

M17(オメガ星雲)は銀河系内の代表的な星生成領域であり、これまでも多くの観測が行われている。我々は周波数スイッチングという新しい手法を用いて、 $\text{C}^+$ イオンの微細

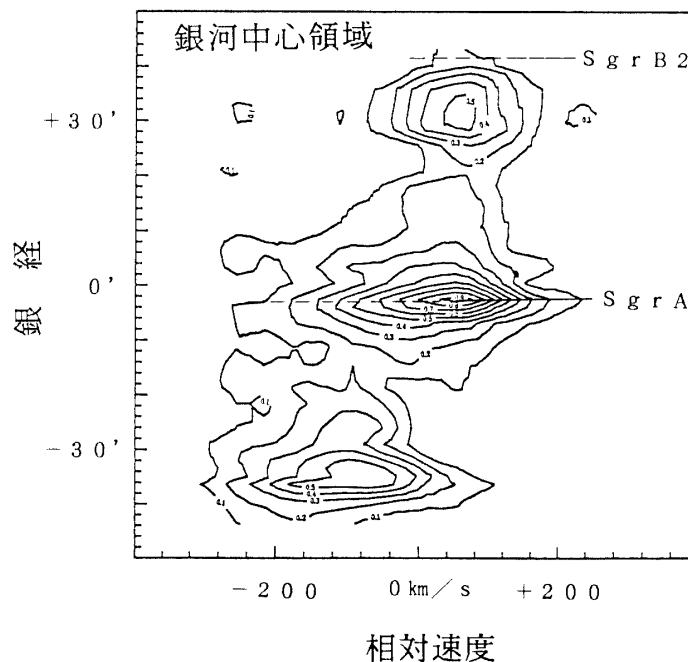


図1 銀河系中心領域における[CII]158 $\mu\text{m}$ 線の銀経-速度図

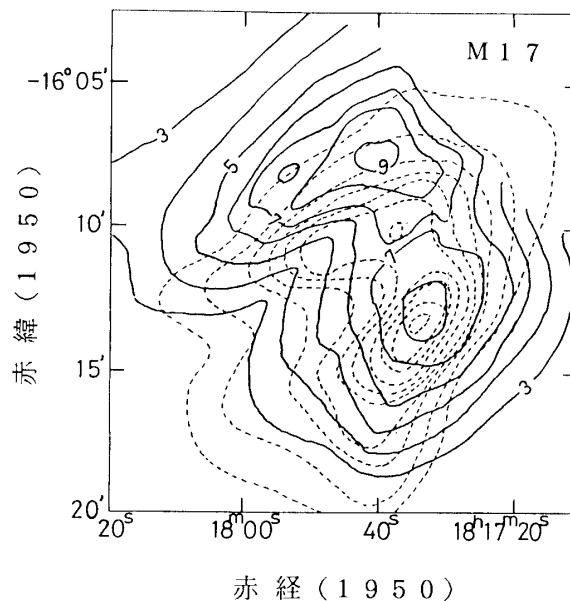


図2 M 17 (オメガ星雲) の[C II]強度分布図。実線が[C II]158 $\mu$ m線の強度, 破線は波長 3.6 cm の電波連続波の強度を表す。単位は  $2.1 \times 10^{-4}(\text{ergs} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1})$ 。

構造線である[C II]158 $\mu$ m ラインの強度分布を, M 17 を含む非常に広い領域に亘って得ることができた(図2)。C<sup>+</sup>イオンは電離領域と中性領域の境界面(光解離領域)に存在すると予想されるため, [C II]の強度分布は境界面の構造を表していると考えられる[3]。

また M 17 の周囲に広がった[C II]放射領域が存在することも発見された。これは次に述べる NGC 6334 周辺にも見られ, 最後に示すように銀河系全体に広がった成分との関連も考えられる。この[C II]放射は, 通常の「光解離領域モデル」(例えば[4])が対象とするような高密度, 高放射密度のガスから出ているとするには余りに広がりすぎており, 星生成領域の構造を説明するのに新たなモデルが必要であることを示している。

#### c. NGC6334 領域

銀河中心よりやや南の銀河面上にある典型的な大規模星生成領域である。これまでの遠赤外観測などにより, この領域には少なくとも5個の, しかも異なる進化の段階にあると考えられる原始星もしくは若い星が存在することがわかっている[5]。今回の気球観測の結果, この領域全体の[C II]158 $\mu$ m 強度マップを得ることができた(図3)。これを見ると電波連続波が検出されない場所(例えば V, 最も若い原始星と考えられている)からも強い[C II]線が放射されていることがわかった。このことは, 原始星が放射する UV 光子の量がまだ十分でないため, C II 領域は形成するが, H II 領域を形成するには不十分である状態, すなわち原始星の非常に初期の段階である可能性を示唆する。

#### d. 巨大 C II 領域の発見

銀河系内の星間物質の分布構造は, 最初水素 21 cm 線によって中性水素原子の分布がわ

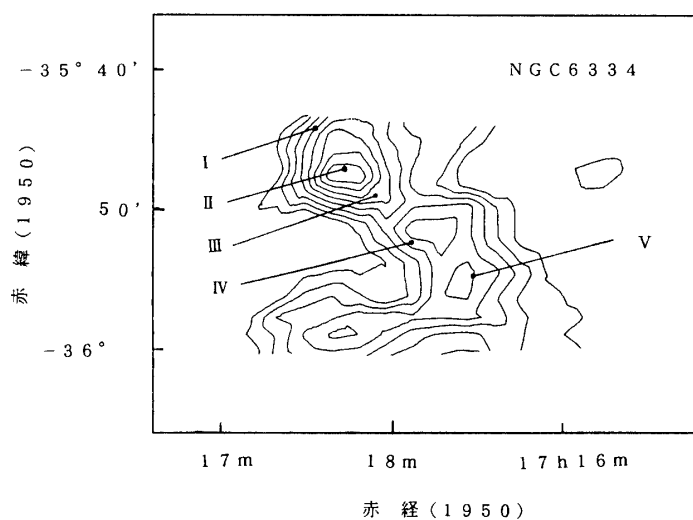


図3 NGC 6334 の[CII]強度分布図。I-Vは、遠赤外連続波強度のピークを表す ([5])。

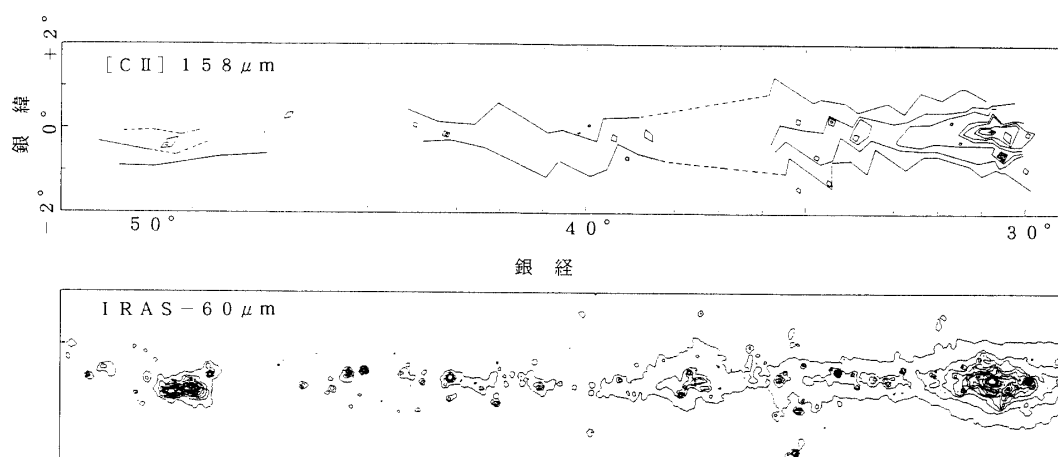


図4 銀河面の広い領域の[CII]強度分布図 (上)。単位は  $7.5 \times 10^{-5} (\text{ergs} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1})$ 。比較のために IRAS の  $60 \mu\text{m}$  の強度分布を示す (下)。

かり [6], 次に一酸化炭素  $2.6 \text{ mm}$  線によって中性水素分子の分布も知られるようになった [7]. また水素電離領域の分布は電波の連続成分の観測によって明らかにされた. ところが星生成領域の比較的近傍にしかないと考えられていた  $\text{C}^+$  イオンのスペクトル線が, 今回の我々の観測によって M 17 や NGC 6334 などの星生成領域周辺の離れた領域においても検出され, さらに図 4 に示すように銀河面全体に広く分布していることが発見された.

$\text{C}^+$  イオンが広く分布していることは, 中性炭素を電離するような紫外線 ( $10.6 \text{ eV}$  以上) が広く分布していることを示す. さらに [CII]  $158 \mu\text{m}$  ラインが放射されるためには, これま

で考えられていたものよりも高いガス密度，温度が必要である。従って，この[CII]線の強度分布は，これまで知られていなかった新しい種類の星間ガス（比較的高温高密度の中性ガス）の分布を表している可能性がある。

もう一つ驚くべきことは，[CII]158 $\mu\text{m}$ が非常に強いことである。普通の星間ガスは放射エネルギーのほとんど全てを星間塵の熱放射によっている。[CII]158 $\mu\text{m}$ 線の担うエネルギー量はこれよりはずっと少ないが，1本のスペクトル線としては例外的に大きな割合（全放射エネルギーの0.5%程度）になる。したがって「[CII]ラインが星間ガスの冷却に支配的な役割を果たしている」という従来の理論的予想が，銀河面の広い領域について成り立っていることが証明されたことになる。

### 5. ま と め

周波数スイッチングという新しい手法を用いた気球遠赤外分光観測により，広い領域の[CII]158 $\mu\text{m}$ の2次元強度分布が得られた。この結果[CII]放射が星生成領域の光解離領域だけでなく，その周辺部，さらには銀河面全体にわたって広がっていることがわかった。このことは，C<sup>+</sup>イオンが銀河系内に広く存在することを意味し，従来の星間ガス雲のモデルで予想されていたものとは大きく異なっている。また[CII]158 $\mu\text{m}$ 線は全放射エネルギーの0.1から0.5%という大量のエネルギーを1本のスペクトル線だけで放射しており，星間ガス雲の支配的冷却源であることが証明された。

### 参 考 文 献

- [1] H. Okuda et al.: Proc. of 14 th ISSTS (1984), 1217.  
H. Okuda et al.: Proc. of SPIE 627 (1986), 20.  
芝井 広他：昭和62年度大気球シンポジウム  
中川貴雄他： 同上  
松原英雄他： 同上
- [2] 奥田治之他：オーストラリア気球実験報告，宇宙科学研究所，昭和60年2月。  
奥田治之他：オーストラリア気球実験報告II，宇宙科学研究所，昭和61年8月。  
H. Takami et al.: P. A. S. P. 99 (1987), 832.  
H. Takami et al.: P. A. S. P. 99 (1987), 1022.
- [3] H. Matsuhara et al.: submitted to Ap. J. (1988).
- [4] A. G. G. M. Tielens and D. Hollenbach: Ap. J. 291 (1985), 722.  
E. F. van Dishoeck and J. H. Black: submitted to Ap. J. (1988).
- [5] L. Loughran et al.: Ap. J. 303 (1986), 629.
- [6] H. Weaver and D. R. W. Williams: A. & Ap. Suppl. 8 (1973), 1.
- [7] D. B. Sanders et al.: Ap. J. Suppl. 60 (1986), 1.  
R. S. Cohen et al.: Ap. J. Suppl. 60 (1986), 695.