

気球搭載赤外線望遠鏡による遠赤外分光観測*

舞原 俊憲**・高見 英樹**・水谷 耕平**・芝井 広
奥田 治之・山上 隆正・廣本 宣久***・小林 行泰†
J. A. Thomas††・R. Sood††

(1986年7月25日受理)

Far-Infrared Spectroscopic Observations with a Balloon-Borne Infrared Telescope

By

T. MAIHARA, H. TAKAMI, K. MIZUTANI, H. SHIBAI, H. OKUDA
T. YAMAGAMI, N. HIROMOTO, Y. KOBAYASHI, J. A. THOMAS, R. SOOD

Abstract: The first observations of far-infrared celestial objects using the 50-cm Balloon-Borne Infrared Telescope were made in Alice Springs, Australia. Far-infrared spectrophotometric data between 45 and 115 μm were taken for the Orion-KL region, Saturn and a southern H II region RCW 38. The data including high excitation transition lines of CO for Orion-KL, O III lines for RCW 38 and a PH_3 absorption feature of Saturn will be presented.

1. はじめに

この10年間、銀河系内及び系外銀河においても、遠赤外線波長域の分光的観測は、幾つかの原子やイオンの微細構造線や分子の回転遷移線を測定することによって、それらの天体の物理的状態を明らかにするという重要な役割を果たすことができるようになってきた。このような分光データは、H II領域や星間分子雲及び星生成領域等の物理的・化学的な

* 本研究は、宇宙研特別事業費並びに文部省科研費海外学術調査「気球による宇宙空間物理学の諸現象の調査研究」により行われた。

** 京都大学理学部

*** 電波研究所

† 東京天文台

†† メルボルン大学（現在の所属、ニューサウスウェールズ大学）

環境について新しい知見を与えるのみならず、銀河系全体のグローバルな進化のステージを示す重元素の銀河動径分布に関する情報を得られるという意味でも重要である。

我々はこの数年間、口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡を用いて、そのような遠赤外線分光観測を気球高度 (≥ 30 km) という非常に優れた条件で行うことを目指して、冷却グレーティング分光器及びファブリペロ干渉分光器の開発を進めてきた。前者は視野 $2' \sim 3'$ の低分散分光により、広帯域をカバーしてなるべく多くのラインを検出すること、又はコンティニウムの観測に適している。後者は、比較的広視野 $4'$ で高分解能のライン測定を目的とする。

1985年3月の最初の飛揚実験では、液体ヘリウム冷却グレーティング分光器 (GRASP) を搭載した観測が行われ、Orion-KL天体の $[O\ I]$ 、 $[O\ III]$ など微細構造線と、CO分子の高励起回転遷移線が測られた。又南天の明るい H II 領域の1つである RCW 38 については $[O\ III]$ の2本のライン強度を測定することができた。今回のフライトは BIRT を使った第一回目の実験ということで、試験的又は較正的な要素も重視した観測ではあったが、上記のほか土星の PH_3 の吸収の特徴も含めて、観測結果の報告と議論を以下に示す。

2. 装置の概要と観測

望遠鏡は、口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡 (BIRT) を用いた。BIRT の基本的な構成と性能については他に詳しく報告されているので (例えば, Okuda et al. (1982) [1], 芝井他(1984) [2], (1985) [3], ここでは簡単に要約する。

光学系は F/1.5 の主鏡, 合成 F/7 の副鏡及びナスミス斜鏡から成る。副鏡は 15 Hz 以下 (通常約 8 Hz) でチョッピングすることができ、約 $9'$ 離れた空の輻射を参照して観測天体の信号を交流化する。

赤外線源の追尾は、オフセットスタートラッカ (OST) により、 $\pm 10^\circ$ 以内のガイド星を使って行う。2~3等の星による追尾精度として $0.3''_{p-p}$ 以内が実際の観測中得られている。レベルフライトの状態に達して間もない時や、大きく指向方向を変えた後などには、これより若干精度が悪くなるが、 $2' \sim 4'$ の視野での観測の効率はそれほど悪くない。

分光装置は、ナスミス焦点に置かれたグレーティング分光器 (GRASP)、オンボードのマイクロコンピュータを使用したデータ取得回路、及び地上における制御とモニター装置からなる。GRASP はブレード角 $147\ \mu\text{m}$ のグレーティングを、1次と2次両方の分散を2種の検出器で受けられる2チャンネル同時測定可能なシステムとなっている。詳しい仕様及び性能については舞原他(1984) [4] に示されている。今回の観測における視野は $2' \times 2'$ 、波長分解能 $0.8\ \mu\text{m}/(\text{次数})$ 、システム $NEP \approx 4 \times 10^{-13}\ \text{WHz}^{-1/2}$ であった。ただ $100 \sim 200\ \mu\text{m}$ 域をカバーする1次のボロメータチャンネルは検出器の動作が正常でなくなったためデータはとることができなかった。

観測は、1985年3月8日、 $81000\ \text{m}^3(3.0\text{Mcf})$ の気球を使い、約 34 km の高度における 3.5 時間のレベルフライトの間に行われた。測定した対象は、Orion-KL 天体、土星及び RCW 38 の3つであった。前の2つの天体は、グレーティングでカバーできる $45 \sim 120\ \mu\text{m}$ の全波長域をスキャンするモードによる観測を主体に行い、後者については、O III の 52 及

び $88 \mu\text{m}$ の禁制線強度を測定することに重点を置いた。それらの天体の分光観測は、勿論副鏡振動によるスカイチョッピングによって行われたが、直流出力信号のチャンネルには、大気中の H_2O ライン輻射のスペクトルも記録されており、別稿のように上層大気の遠赤外線域の輻射・吸収の特性及び H_2O 分子の mixing ratio の情報等も得られた。

大気中の H_2O 分子による吸収は、天体の線スペクトル強度を求める時には無視できない。今回の観測では、直流出力チャンネルの大気 H_2O 輻射のスペクトルに基づいて、 H_2O の絶対量を決定することができ、従って吸収量も正確に評価することが可能となる。その結果を図1に示す。

今回測定された Orion-KL 天体のコンティニュームのレベルについて、4回の波長スキャンの重ね合せを行った後、図1に示された結果の吸収量補正を行った。この手続きは、 $[\text{O I}]63.2 \mu\text{m}$ のように H_2O 吸収に隣接したライン強度を推定する場合には、無視できない効果をもつ。

3. 結果と議論

1) Orion-KL: この天体は全天で最も明るい遠赤外線源であり、これまでも多くの分光観測が試みられているが、必ずしも全ての波長をサーベイされてはいない。又、特にコンティニュームの精度のよいスペクトル観測はこれまで十分にされていない。そのため、今回のフライトで BIRT に GRASP を装着して行う最初の観測対象として、Orion-KL 天体を選んだ。測定は $45 \mu\text{m}$ から $120 \mu\text{m}$ のスキャン (Full scan モード) が4回行われ、O I, O III, N III などの輝線と、CO 分子の高励起回転遷移線及びコンティニュームスペクトルが得られた。前者の微細構造線の観測は、これまでも例えば, Furniss et al. (1983) [5]

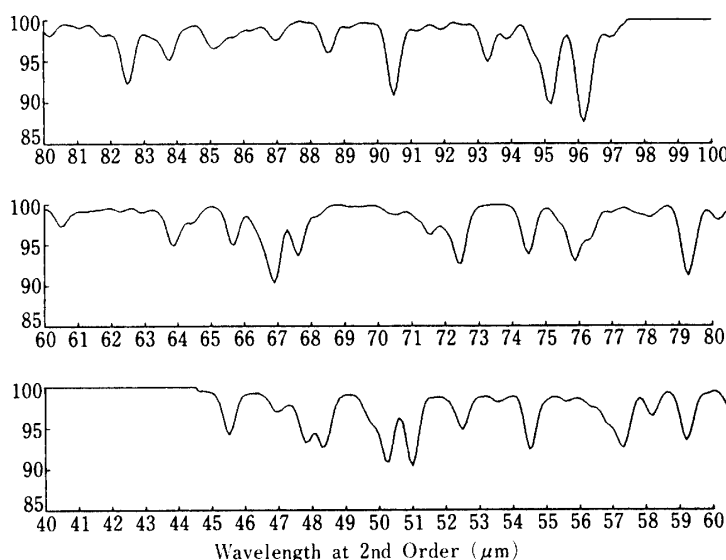


図1 気球高度の観測条件における大気の吸収補正カーブ。分光器の分解能でなまらせた透過率を表わす。

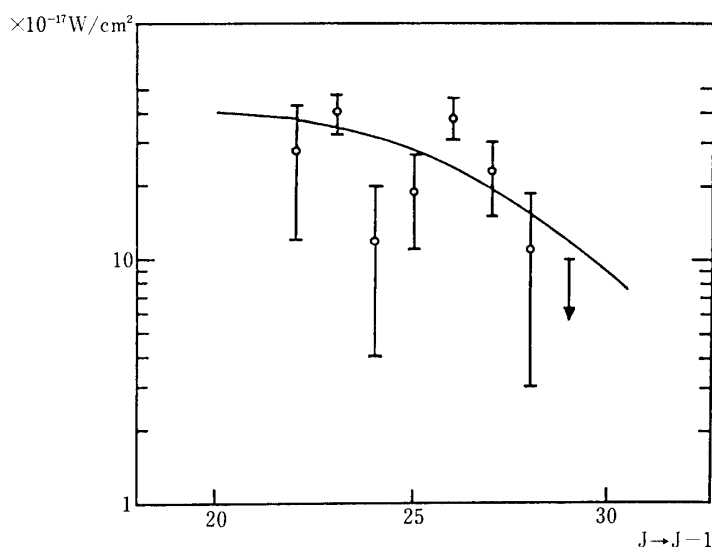


図 2 Orion-KL 領域の高励起 CO ライン強度。実線は 750 K の 1 成分モデルによる。

が気球にマイケルソン干渉分光器を搭載して観測を行い、約 5° 角の領域のマッピングがなされているので、ここでは次の CO の観測結果について少し詳しく述べる。

Orion-KL 領域の Full scan データの解析の結果、図 2 のような幾つかの高励起 CO 分子の回転遷移線を検出した。この中にはこれまで未検出だった遷移線も含まれている。このスペクトル線は、Orion-KL の中心の活動源である IRC 2 からのバイポーラ的なガスフローによるショックで暖められている領域で放射していると考えられている。Watson et al. (1985) [6] の $1'$ ビームによる観測では、温度 750 K の一成分モデルで $J=15\sim 34$ の高励起 CO 線スペクトルを説明できるとしている。我々の $J=21\sim 28$ のデータを同じ温度としてフラックスの絶対値を Watson et al. と比較すると、我々の視野 $2' \times 2'$ の方が 2 倍高い値を示していることがわかる。従って、CO の放射領域の拡がりは少なくとも $2'$ 程度はあることになる。これは Watson et al. のストリップスキャンのデータと矛盾しない。

我々は Orion-KL 天体の O 原子とイオンの微細構造線も波長スキャンのデータの中に検出している。それらは、 $63.2 \mu\text{m}$ の O I、 $51.8 \mu\text{m}$ 及び $88.4 \mu\text{m}$ の O III のラインである。O I は電離領域と接している比較的温度の高い中性領域から放射されるのに対して、O III は中心の電離領域で電子衝突による励起で放射されるラインである。表 1 に観測された Orion-KL 領域の $2' \times 2'$ の視野でのライン強度を示す。これらの値はこれまでの観測とよく一致している (例 Furniss et al. 1983) [5]。

2) RCW 38: この天体は南天銀河で最も明るい H II 領域の 1 つである。可視光の写真では約 10 分角以上拡がって見えているが、中心のコアの部分で電子密度が 10^3 cm^{-3} に集中している領域は、2~3 分以内である。これまで遠赤外線分光観測は行われていない。

今回の観測で、我々は O III の 2 本の輝線: $51.8 \mu\text{m}$ 及び $88.4 \mu\text{m}$ を検出した。ライン強度は表 1 に示されている。この 2 つのライン強度比から、中心の $2' \times 2'$ の領域内で O III ラ

表1 観測された2つの遠赤外線のライン強度

Objects	Species	Wavelength (micron)	Flux ($\times 10^{-16}$ w/cm ²)
Orion-KL	[OI]	63.2	15.0 \pm 1.1
	[OIII]	51.8	9.1 \pm 3.8
		88.4	3.7 \pm 1.2
RCW 38	[OIII]	51.8	7.5 \pm 1.0
		88.4	1.1 \pm 0.2

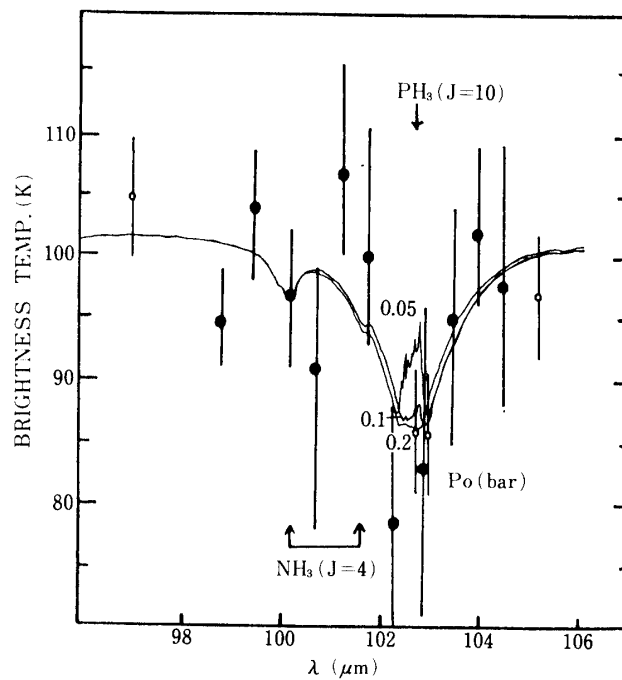


図3 土星のPH₃ ν₃バンド (J=10) の吸収スペクトル。黒丸は今回の気球観測データ、白丸及び実線のモデルカーブは Haas et al⁽¹¹⁾ (1984) による。

表2 銀河内 HII 領域の OIII/HII 比の観測値

Objects	O++/H+ratio
NGC7538	1.3-2.3(-4)
W 49	2.0(-4)
M 8	1.7(-4)
	(Baluteau et al. 1981)
RCW 38	1.0-2.0(-4)
	(Our data)

インを輻射する部分における電子密度の値が推定できる。表1から $I(51.8)/I(88.4) = 6.8$ となり、これは $n_e \approx 10^4 \text{ cm}^{-3}$ に対応する (例えば, Watson and Storey [7] (1980) 参照。H 76 α の電波観測では、平均的電子密度 $n_{e,rms}$ が 2600 cm^{-3} (McGee and Newton [8] (1981)) という値を 2.3' のビームで得ている。従って、Volume filling factor F は、 $F \sim 0.07$ となる。一方、H 109 α では (Wilson et al. [9] 1970)、ビームは 4' だが、輻射源のコアサイズを 1.3×2.1 として、 $n_{e,rms} \approx 4100 \text{ cm}^{-3}$ を得ている。この場合 $F \approx 0.17$ となる。ここでは後者を採用して以下の議論を行う。

ライン強度は、

$$I_{ij}[\text{OIII}] = \frac{h\nu}{4\pi} A_{ij} \frac{f_i}{\sum_k f_k} \frac{n_{\text{OIII}}}{n_{\text{HII}}} \cdot \int n_e dl \Delta\Omega$$

と表わされる。この式で、 $\int n_e dl \Delta\Omega$ は、電波観測と遠赤外観測に Consistent な値が決められるので、 $n_{\text{OIII}}/n_{\text{HII}}$ の比 (ϕ) を求めることができる。RCW 38 の我々の観測値から $\phi = 1.6 \times 10^{-4}$ が得られる。この値は、表2のようにこれまでに測定されている銀河内の他の H II 領域の $n_{\text{OIII}}/n_{\text{HII}}$ 比とほぼ同程度である (Baluteau et al. [10] 1981)。

3) 土星：分光器の絶対フラックス校正に必要な天体光源として土星の測定を行ったが、そのスペクトルの中に PH_3 の回転遷移線の1つが観測された。飛行機高度の観測でも、大気中の H_2O による吸収の窓の何点かのデータ点の中で $\text{PH}_3(J=10)_{\nu_2}$ バンドの位置における PH_3 吸収を示唆する測定がなされているが [11] (図3)、我々の分光観測では、 ν_3 のバンド吸収領域： $\lambda \approx 100 \sim 105 \mu\text{m}$ で吸収プロファイル自身をトレースしている。しかし SN 比は十分でないため、 PH_3 の存在する高度のパラメータ (P_0) を決めることはできていない。

今後は銀河系内の H II 領域のサンプルを増して、銀河動径に対する重元素存在比の変化を系統的に調べることで、大気吸収のための気球高度でなければ検出することが不可能な種々の分子ラインの観測、更に遠赤外領域での精度の高いコンティニュームのスペクトルを測定すること等、気球望遠鏡の特長を生かした観測を進める必要がある。

参考文献

- [1] Okuda, H., Shibai, H., Kobayashi, Y., Yamagami, T., Maihara, T., Hiromoto, N., Mizutani, K., Yajima, N., 1982, ISAS Research Note, ISAS RN 200.
- [2] 芝井, 奥田, 中川, 成田, 山上, 狛, 松坂, 舞原, 水谷, 高見, 小林, 廣本, 矢島, 1984, 大気球シンポジウム, p.114.
- [3] 芝井, 奥田, 西村, 山上, 成田, 狛, 松坂, 舞原, 水谷, 高見, 中川, 小林, 廣本, 矢島, Thomas, J. A., Sood, R., 1985, 大気球シンポジウム, p. 123.
- [4] 舞原, 高見, 水谷, 芝井, 奥田, 1984, 宇宙観測シンポジウム, p. 41.
- [5] Furniss, I., Jennings, R. E., King, K. J., Lightfoot, J. F., Emery, R. J., Naylor, D. A., Fitton, B., 1983, M. N. R. A. S., **202**, 859.
- [6] Watson, D. M., Genzel, R., Townes, C. H., Storey, J. W. V. 1985, Ap. J. **298**, 316.
- [7] Watson, D. M., Storey, J. W. V. 1980, Internat. J. IR Submm Waves, **1**, 609.

- [8] McGee, R. X. Newton, L. M., 1981, M. N. R. A. S. **195**, 889.
- [9] Wilson, T. L., Mezger, P. G., Gardner, F. F., Milne, D. K, 1970, A. Ap **6**, 364.
- [10] Baluteau, J. P., Moorwood, A. F. M., Biraud, Y., Coron, N., Anderegg, M., Fitton, B. 1981, Ap. J, **244**, 66.
- [11] Haas, M. R., Erickson, E. F., Goorutch, D., McKibbin, D. D., Rank, D. K., 1984, in Airborne Astronomy Symposium, p. 76, NASA CP-2353, Ed. by H. A. Thronson and E. F. Erickson.