

NGC 6334 領域の遠赤外分光観測：光解離領域の進化

中川貴雄・奥田治之・芝井 広
松原英雄・舞原俊憲*・水谷耕平*
F. J. Low**・西村徹朗**・小林行泰***
広本宣久†

Far - Infrared Spectroscopic Observations of the NGC6334
Complex : Evolution of Photodissociation Regions

By

Takao NAKAGAWA, Haruyuki OKUDA, Hiroshi SHIBAI,
Hideo MATSUHARA, Toshinori MAIHARA,
Kohei MIZUTANI, F. J. LOW, Tetsuo NISHIMURA,
Yukiyasu KOBAYASHI, and Norihisa HIROMOTO

Abstract : We have made spectroscopic observations of the far-infrared [CII] ($^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$, $\lambda = 157.74 \mu\text{m}$) line toward an active star-forming complex NGC 6334 with a balloon-borne 50cm telescope and a liquid-Helium cooled Fabry-Perot spectrometer. We have also obtained a two-dimensional map of the NGC 6334 complex by utilizing the newly developed frequency switching method. Strong [CII] emission has been detected throughout the region we have observed. Even a region (source V) with no

* 京都大学理学部
** アリゾナ大学シュワード天文台
*** 東京大学理学部
† 郵政省通信総合研究所

compact HII region has been found to be a strong emitter of the [CII] line. We propose two hypotheses to explain the emission from source V as follows: (1) photodissociation regions around the source had evolved more rapidly than corresponding HII regions, and (2) the region around the source is very rich in B-type stars, which contribute significantly to [CII] emission but produce negligible HII regions.

概 要

我々は、口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡および超流動液体ヘリウム冷却ファブリ・ペロー分光器を用いて、活発な星生成領域である NGC 6334 から、非常に強い遠赤外[CII]スペクトル線(波長 158 μm)を検出した。さらに、機械の特性を活かす周波数スイッチング方式を採用することにより、NGC 6334 内の 0.8×0.3 度の広い領域にわたって、[CII]スペクトル線によるマッピング観測を行なうことにも成功した。

これらの[CII]観測により、励起星の進化に伴う光解離領域の進化が、初めて明らかになった。さらに、未だ H II 領域をともなっていない若い領域からも、従来の光解離領域の理論からは予想されない、強い[CII]放射を検出した。この励起源としては、(1)光解離領域が H II 領域よりも急速に進化するため、(2)星間雲に埋もれている多くの B 型星の寄与、の二つが考えられる。

1. 序

新しい波長域に於ける観測は、新しい範疇に属する対象を開拓する可能性をもっている。星間空間物理学にもそのことはあてはまる。星間雲の様々な「相」は、すべて新たな観測手段の開発により、発見されてきたものである。

星間中性ガスの冷却に最も大きな役割を果たしているのは、遠赤外線領域の微細構造スペクトル線である。これらの重要なスペクトル線は、地上からの観測が不可能であるため、観測が可能になったのは近年になってからのことであった。そして、この新しい波長に於ける観測は、新しい星間空間物理学を拓こうとしている。すなわち、他の観測では今まではっきりとはしなかった星間雲の新しい「相」が、遠赤外分光観測により確立されようとしているのである。その「相」は、光解離領域と呼ばれる。この領域は H II 領域と分子雲との中間に位置し、(1)水素は原子または分子で存在し、(2)CO 分子は光解離し中性酸素と炭素の一回電離イオンになっている。この領域からは、原子・イオンの非常に明るい禁制線が放射されていると考えられている。特に明るいのは[CII] ($^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$, 波長 158 μm) および[OI] ($^3P_1 \rightarrow ^3P_2$, 波長 63 μm) の 2 つのスペクトル線である。

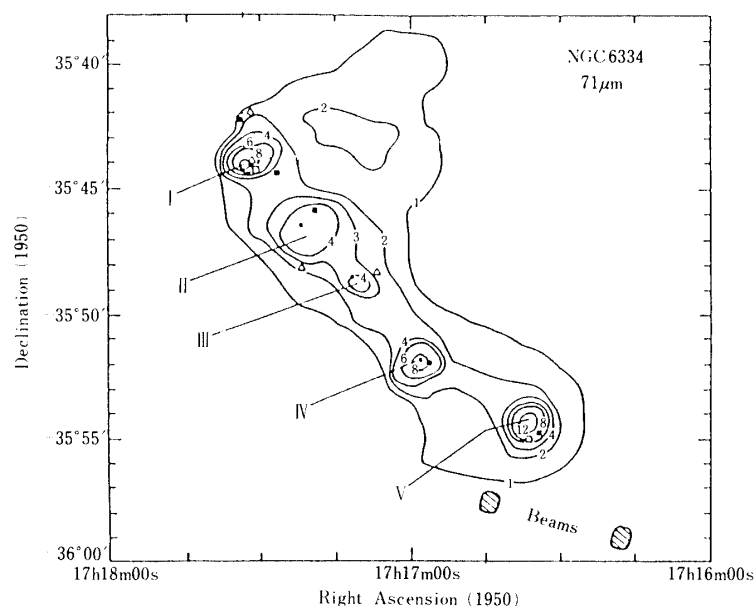


図1 NGC 6334 領域の遠赤外線連続波(波長 $71 \mu\text{m}$)の強度分布 [2]. 1×1.5 分角ビームで観測されたもの。

我々の観測は、この重要な2本のスペクトル線を広い範囲にわたって観測し、光解離領域の分布・物理状態を調べ、新しい「相」としての光解離領域の、星間物理に於ける役割を明らかにしようとするものである。

我々は、この目的で、多くの天体について、気球搭載機器による遠赤外分光観測を行ったが[1]、この稿では、特に NGC 6334 の観測について述べる。

NGC 6334 は、南天($\delta = -35$ 度)に位置する大規模な星生成領域である。遠赤外線連続波の観測[2]等により、 $10^5 L_{\odot}$ を超える光度を持つ活発な星生成領域が、この雲の中に少なくとも5つ(図1のI~V)存在し、それらが15 pc にわたって銀河面に平行にリッジ状に分布していることが明らかになった。

さらに、この領域を特徴づけている最大の点は、5つの星生成領域が各々全く異なった進化の段階を示していることである。すなわち、強い電波連続波放射を伴う進化した H II 領域から(図1のII, III)、コンパクトな H II 領域すら発見されていない若い領域(図1のV)、そして両者の中間の進化段階を示す領域(図1のI)までが混在する。

したがって、星間雲の進化に伴い光解離領域がどのように進化し、星間雲全体の進化にどのような役割を果たすかを明らかにする我々の目的に、NGC 6334 は最も適した領域である。

2. 観 測

観測には、口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡[3]、超流動液体ヘリウム冷却・2チャンネル・ファブリ・ペロー分光器[4]、および Stressed Ge:Ga 光伝導素子[5]を用いた。

この観測システムの視野は3.6分角(実効値)、波長分解能は $\lambda/\Delta\lambda=2100$ である。観測実験は、1988年5月25日および6月5日に、米国・テキサス州・パレスティンのNSBF(National Scientific Balloon Facility)より、2.7 million cubic feetの気球により2回行われた。観測機器の詳細については、参考文献[3][4][5]を参照されたい。

観測には、2つのモードを用いた。

1つのモードは、従来から赤外線天体観測に用いられてきた空間チョッピングによるものである。このモードを用いると、我々のシステムでは[CII] ($^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$, 波長158 μm) および[OI] ($^3P_1 \rightarrow ^3P_2$, 波長63 μm)の2つのスペクトル線を同時分光観測することができる。さらに、各々のスペクトル線の持つ速度情報も得ることができる。ただし、空間的に広がった天体の観測は難しい。

もう1つのモードは、我々が新たに開発した周波数スイッチングによるものである。このモードでは、従来の空間チョッピングでは観測不可能な広い領域からのスペクトル線強度分布を、非常に効率よく観測することができる。ただし、速度情報までを得ることはできない。

さらに、上記の観測を補うことを目的として、 $^{13}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$, 波長2.6 mm)によるNGC 6334の観測を、名古屋大学4 m短ミリ波望遠鏡を用いて、2.7分角のビームによって行なった。

3. 結 果

この観測では多くの結果を得ることができたが、ここでは[CII]および ^{13}CO による観測に話題を限定する。広い範囲のマッピング観測には、上記の2つのモードの内、周波数スイッチングを用いた。ただし、スペクトル線の強度の絶対値を較正するために、空間チョッピング観測の結果を併用した。

図2と3に観測結果を示す。

図2は、[CII]の強度分布と電波連続波の強度分布[6]を示したものである。NGC 6334全域にわたって、強い[CII]放射が観測されていることが、図からわかる。[CII]放射が最も強いところは、電波連続波も最も強いところであり、最も発達したH II領域(図1のII)に相当する。[CII]の放射のためには、

- (1)炭素を電離するための紫外線(11.3 eV 以上)
- (2) C^+ イオンを励起するためのある程度的高温(90 K 以上)・高密度(10^3 cm^{-3} 以上)ガス

の両者が必要である。したがって、発達したH II領域周りで[CII]放射が強いということは、従来の光解離領域の理論[7]を裏付けるものである。

しかし、VLAによる観測[6]ですらコンパクトなH II領域が検出されていない、最も若い星間雲(図1のV)からでも、我々は強い[CII]放射を検出した。これは、光解離領域をH II領域周りの成分が主であるとする従来の仮定[7]には反する。この放射の起源については、次の章で議論する。

図3は、[CII]の強度と $^{13}\text{CO}(J=1 \rightarrow 0)$ の強度分布とを比較したものである。これによる

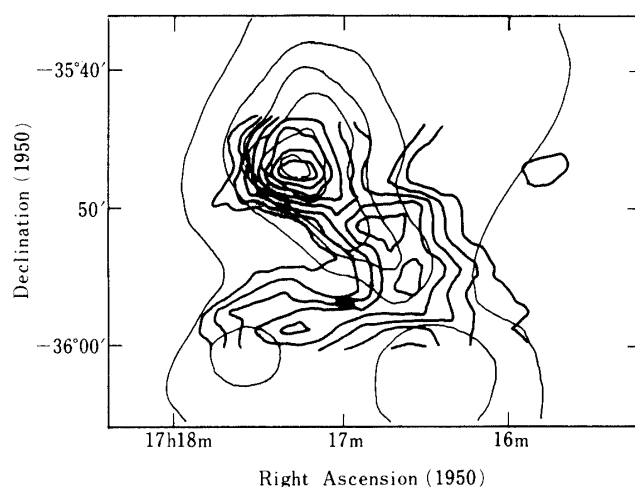


図2 NGC 6334 観測結果. 太い線は, 3.6 分角ビームで観測された [C II] スペクトル線強度. 各線は 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 $\times (2.7 \times 10^{-4} \text{ ergs sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1})$ に相当する. 細い線は, 4 分角ビームで観測された電波連続波 (5 GHz) 強度分布 [6].

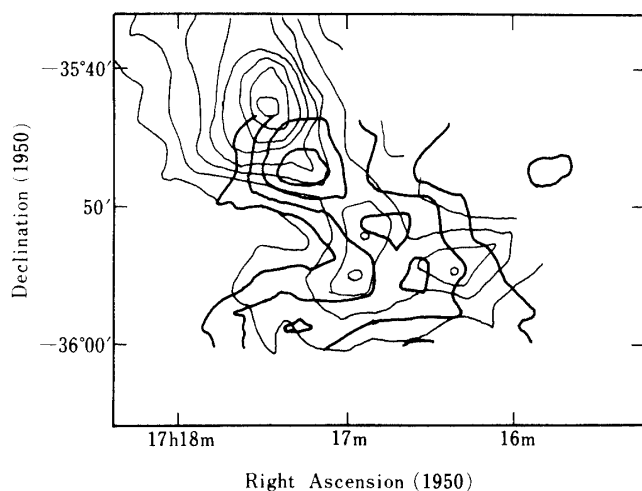


図3 NGC 6334 観測結果. 太い線は, 3.6 分角ビームで観測された [C II] スペクトル線強度. 各線は 2, 4, 6, 8 $\times (2.7 \times 10^{-4} \text{ ergs sec}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1})$ に相当する. 細い線は, 2.7 分角ビームにより観測された $^{13}\text{CO} (J=1 \rightarrow 0)$ 強度分布. 各線は 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 $\times (8 \text{ km sec}^{-1})$ に相当する.

と, $70 \mu\text{m}$ の連続波(図1)や[CII]で明るく光っているリッジそのものではなく, その北側に非常に濃い分子雲が存在している. したがって, 活発な星生成は分子雲の最も濃い部分ではなく, そこから広がるやや密度の低い部分で起きていることになる.

さらに, [CII]はいつも濃い分子雲の端に張り付くようにして光っていることがわかる.

このことは、大部分の[CII]放射が一般のHI雲から放射されているのではなく、星生成領域近傍の分子雲の外縁部が、外部のHII領域からの紫外線に照らされて、そのために分子が一部光解離してC⁺領域を形成し、強い[CII]線を放射しているという描像[7]を裏付けるものである。

4. H II領域を伴わない光解離領域

前章で述べたように、[CII]スペクトル線は一般のHI雲から放出されているのではない。分子雲の外縁部が若い星からの紫外光により照らされることにより光解離領域を形成し、そこから[CII]スペクトル線は放出されていると思われる[7]。この観点からすると、H II領域等を伴わない領域Vから、強い[CII]放射が検出されたことは全く説明できない。

4-1. ライマン連続光光子数

図4は、NGC 6334内5つの各領域のBolometric Luminosity (L_{FIR})と、ライマン連続光の光子数(N_i)を比較したものである。以下、NGC 6334までの距離は1.7 kpc[8]と仮定している。

図中横軸の全光度(L_{FIR})は、遠赤外線連続波観測[2]から求められたものである。どの領域も $\sim 10^5 L_{\odot}$ の光度を持つことが分る。もし励起星が単一であるとすれば、これらの光度は中～晩期O型星に相当する。

一方、ライマン連続光の光子数は、電波連続波観測[6]から求めたものである。図中にM.S.と記した実線は、相当する光度のZAMS(Zero Age Main Sequence Star)が持つべきライマン連続光光子数である。

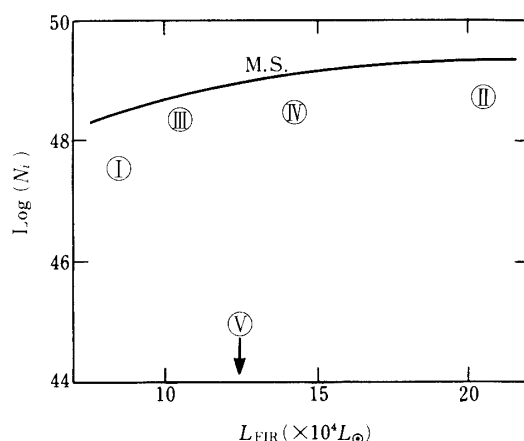


図4 NGC 6334内各領域での全光度(L_{FIR})とライマン連続光光子数(N_i)との関係。NGC 6334までの距離は1.7 kpc [8]と仮定している。横軸の全光度(L_{FIR})は、遠赤外線連続波観測[2]から求めた。ライマン連続光の光子数(N_i)は、電波連続波観測[6]から求めた。図中にM.S.と記した実線は相当する光度のZAMS(Zero Age Main Sequence Star)が持つべき光子数を表す。図中のI～Vは図1の各領域に相当する。

もし、星の周りの H II 領域が十分発達していれば、観測値はこの M. S. と記した線上にくるはずである。実際、領域 II, III, IV では、観測値がこの線の十分近くまできており、これらの領域がかなり発達した H II 領域を伴っているという事実と良くあう。しかし、領域 I, V では、観測値が ZAMS に期待される実線のかなり下側にきており、これらの領域の周りの H II 領域が未だ十分には発達していないことを示している。特に領域 V では、電波観測から求められた光子数が、ZAMS に期待される光子数から 2 桁以上不足していることが分かる。

4-2. [CII]強度

一方、図 5 は NGC 6334 内 5 つの各領域の Bolometric Luminosity (L_{FIR}) と、[CII] 光度 (L_{CII}) とを比較したものである。図中の横軸は図 4 と同じであるが、縦軸は我々の空間チョッピング・モードによる観測から求めたものである。ただし、我々の観測システムの視野が各領域間隔に比べて十分には小さくないため、特に領域 III では、領域 II の影響を受けている可能性が大きい。したがって、図中領域 III の [CII] 強度は上限とみるべきである。

したがって領域 III の観測点を無視すると、他の領域では L_{FIR} と L_{CII} とが、非常によい比例関係にあり、どの領域でも、全光度のほぼ 0.1 % が [CII] スペクトル線として放出されていることが分かる。ただし、注目すべきは、H II 領域が発達している領域 (II, IV) でも、H II 領域が全く未発達な領域 (V) でも、 L_{FIR} と L_{CII} との間に同じ関係が成り立つということである。

4-3. [CII]放射の起源

十分に H II 領域が発達している領域 (II, IV) では、上記の 3 つの観測量 ($L_{\text{FIR}}, N_i, L_{\text{CII}}$) が単一の O7~O8 型の ZAMS で説明することができる。このことは、これらの領域が、進化

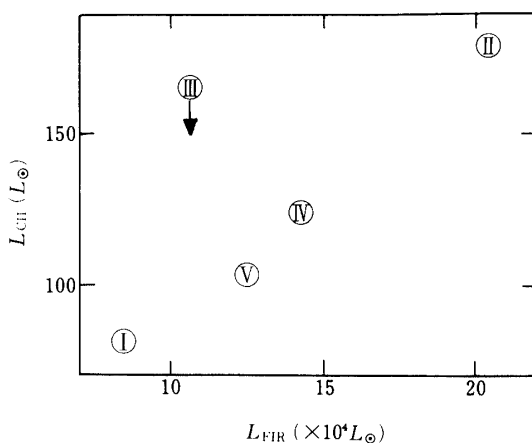


図 5 NGC 6334 内各領域での全光度 (L_{FIR}) と [C II] 光度 (L_{CII}) との関係。NGC 6334 までの距離は 1.7 kpc [8] と仮定している。横軸は図 4 と同じ。[C II] 光度 (L_{CII}) は空間チョッピングモードによる観測から求めた。図中の I ~ V は図 1 の各領域に相当する。領域 III の観測値は領域 II からの漏れがあるため、上限値とみなす。

した星間雲にあてはまる静的な光解離領域モデル[7]で、よく記述されることを示している。すなわち、(1)各領域の主励起星の周りに H II 領域が形成され、(2)さらに H II 領域からもれ出た紫外線により、その周りに光解離領域が発達し、(3)その光解離領域から強い [CII] が放出されている、と考えられる。

しかし、励起星がまだ若く、その周りの H II 領域が未発達である領域 I と V では、3つの観測量が単一の ZAMS では説明できない。ただし、その内の領域 I については、電波連続波放射に応じて [CII] 放射も弱いため、星間雲自体が未発達であるということで、このくいちがいは説明可能である。

しかし、領域 V については、単純な単一励起星モデルでは説明不可能である。なぜなら、領域 V では電波連続波が領域 I よりも弱い (ZAMS に比べて、 N_i が 2 桁以上小さい) にもかかわらず、[CII] 放射が領域 V のほうがかなり強いためである。すなわち、水素を電離し H II 領域を形成する 13.6 eV 以上の紫外線の量 (N_{FUV}) と、炭素を電離する 11.3 eV 以上 13.6 eV 以下の紫外線の量 (N_{SUV}) との比 ($R \equiv N_{SUV}/N_{FUV}$) が、領域 V では領域 I よりも 3 桁以上大きいのである。

この説明として、以下の二つの仮説が考えられる。

- (1) 星間雲の進化の初期には、H II 領域よりも光解離領域の進化のタイムスケールが早いため、星間雲の進化の過程で一時的に R が大きくなる。
- (2) 電波連続波の励起には寄与できないが、[CII] 放射の励起には大きな寄与がある B 型星が、領域 V には多い。

二つの仮説の内、(1)については理論的モデル[9]も提案されており、アイデアとしての可能性を捨てることはできない。しかし、領域 I と V では R が 3 桁以上異なり、このような差を、同じ population の星で説明しようとするのはむずかしい。さらに、領域 V の主励起星は未だダストにすっぽりと包まれている前主系列星であることが観測的に明らかにされている[10]。したがって、そのように吸収の大きい星から、炭素を電離できるような紫外光子が大量に漏れてくるとは、思いがたい。

仮説(2)については、最近の NGC 6334 領域の近赤外のサーベイ[11]により、中小質量星の大集団が領域 V で観測されていることから支持される。すなわち、領域 V の全光度は、従来考えられてきたように一つの主励起星が担っているのではなく、多くの B 型星が分担していると考えるのである。すると、全光度に応じた大きな H II 領域が形成される必要がなく、前章で述べた N_i の大幅な不足を説明することができる。さらに、光解離領域をつくるには、O 型星は必ずしも必要でなく、B 型星でも十分である。したがって、観測された [CII] 強度も説明することができる。

このように、仮説(2)は魅力的であるが、この仮説の基になっている、星の質量関数の差の起源は不明である。すなわち、遠赤外連続波から求められる全光度には各領域であまり差がないにもかかわらず、仮説(2)が成り立つためには、領域 V の初期質量関数が他の領域とは異なる必要がある。つまり、領域 V のみに O 型星がなく B 型星以降のみが多くなければならないのである。

いまだ、このような初期質量関数の差が実際に生じている直接的証拠はなく、またその

メカニズムの解明も今後に残された興味ある課題である。

5. 結 び

遠赤外[CII]放射の観測により、上記のように光解離領域の進化の過程が明らかになった。また、星生成領域によっては、初期質量関数が異なる可能性もあることが示唆された。さらに、[CII]観測の意義はそれらにとどまらない。

従来の電波連続波の観測は、水素を電離する 13.6 eV 以上の紫外線および、そのような紫外線を放射することのできる O 型星をトレースしているのみであった。これでは、星間雲の輻射場や星の構成の極く一部のみを観測しているに過ぎない。

一方、[CII]放射の観測により、炭素を電離する 11.3 eV 以上 13.6 eV 以下の紫外線分布の観測が可能になった。これにより、星間輻射場の強度のみならず、そのスペクトルの空間分布までが明らかにされる。さらに、NGC 6334 の観測に於けるように、O 型星から晩期 B 型星までの広い範囲にわたるタイプの星の分布を調べることにより、星の初期質量関数などの基礎的かつ重要な物理量を銀河全体にわたって明らかにすることが可能である。

このように、[CII]観測は今後大きな意義をもつようになると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 奥田浩之他：昭和 63 年度大気球シンポジウム。
芝井 広他：昭和 63 年度大気球シンポジウム。
水谷耕平他：昭和 63 年度大気球シンポジウム。
中川貴雄他：昭和 63 年度大気球シンポジウム。
松原英雄他：昭和 63 年度大気球シンポジウム。
芝井 広他：昭和 63 年度，宇宙科学研究所報告，特集 23 号，p. 69。
H. Matsuhara *et al.* : 1989, *Ap. J. (Letters)*, **339**, L67.
- [2] B. McBreen, G. G. Fazio, M. Stier, and E. L. Wright : 1979, *Ap. J. (Letters)*, **232**, L183.
L. Loughran, *et al.* : 1986, *Ap. J.*, **303**, 629.
- [3] H. Okuda, *et al.* : 1984, *Proc. ISSTS*, **14**, 1217.
H. Shibai, *et al.* : 1989, in preparation.
- [4] H. Okuda, H. Shibai, T. Nakagawa, Y. Kobayashi, T. Matsumoto, F. J. Low, T. Nishimura : 1986, *Proc. SPIE*, **627**, 20.
T. Nakagawa, H. Okuda, H. Shibai, H. Matsuhara, Y. Kobayashi, N. Hiromoto : 1989, in preparation.
- [5] N. Hiromoto, *et al.* : 1989, *IR Phys.*, **29**, 525.
- [6] W. M. Goss, and P. A. Shaver : 1970, *Aust. J. Phys. Astrophys. Suppl.*, **14**, 1.
L. F. Rodriguez, J. Canto, and J. M. Moran : 1982, *Ap. J.*, **255**, 103.
- [7] A. G. G. M. Tielens, and D. Hollenbach : 1985, *Ap. J.*, **291**, 772.
- [8] T. Neckel : 1978, *Astr. Ap.*, **69**, 51.
- [9] R. S. Roger : 1983, *Proc. A. S. A.*, **5**, 158.
- [10] T. Nakagawa, T. Nagata, H. Matsuhara, H. Okuda, H. Shibai, and S. S. Hayashi : 1990, *Ap. J.*, **351**, in Press.
- [11] M. S. Straw, A. R. Hyland, and P. J. McGregor : 1989, *Ap. J. Suppl.*, **69**, 99.