

銀河系の大局的[C II]158  $\mu\text{m}$  放射

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

LARGE-SCALE [CII] 158  $\mu\text{m}$  EMISSION  
OF THE GALAXY

By

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

**Abstract:** Diffuse [C II] line emission at 157.74  $\mu\text{m}$  has been observed in an extensive region along the Galactic plane, using a balloon-borne infrared telescope incorporated with a liquid helium cooled Fabry-Perot spectrometer. Strong emission has been ubiquitously detected all over the region between  $l = 30^\circ$  and  $51^\circ$ . Most of the emission seems to be diffuse and unassociated with discrete HII regions. The longitude profile of the integrated [C II] intensity distribution is similar to those of IRAS 100  $\mu\text{m}$  and  $^{12}\text{CO}(1-0)$  but not to that of HI 21cm. The large-scale diffuse

---

\* 京都大学理学部

\*\* 東京大学天文教育センター

† 郵政省通信総合研究所

†† アリゾナ大学シュワード天文台

[C II] emission probably comes from surfaces of molecular clouds which form diffuse photodissociation regions. The total [C II] luminosity of the Galaxy amounts to  $2.6 \times 10^7 L_{\odot}$  which corresponds to about 0.35 % of the total far-infrared luminosity.

## 概 要

銀河面に沿った広い領域から、広がった[C II] 157.74  $\mu\text{m}$  放射を検出した。観測は気球搭載赤外線望遠鏡に液体ヘリウム冷却のファブリ・ペロー分光器を搭載して行われた。強い[C II]放射が銀経  $30^{\circ}$  から  $51^{\circ}$  のほぼ全ての領域で検出された。この放射のほとんどは個別の H II 領域に付随していない拡散成分である。[C II]放射の銀緯分布、銀経分布は 100  $\mu\text{m}$  連続波、および  $^{12}\text{CO}(1-0)$  に良く似ている。この[C II]放射は、分子雲の表面に形成された「広がった光解離領域」から放射されている可能性が高い。銀河系の全[C II]光度は約  $3 \times 10^7 L_{\odot}$  で、全遠赤外光度の約 0.35 %にあたる。

## 1. 序 論

最近[C II]  $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$  (157.74  $\mu\text{m}$ ) 微細構造線が、数多くの銀河系内及び銀河系外の天体から検出され、星間分子雲と H II 領域の間の暖かい境界領域(光解離領域)の研究に重要な役割を果たしてきた[1]。しかしながらこれまでの観測はほとんどが高密度の分子雲と高密度の H II 領域の間の高密度の境界領域に集中していた。ところがこれらの観測の中で、2, 3の著者[2, 3]は高密度の H II 領域に接した[C II]放射領域の周囲に、[C II]の拡散放射成分が存在することを発見した。この拡散[C II]放射成分は弱いけれども[C II]強度のピーク及び H II 領域からはるかに離れたところまで広がっていた。一方 Stacey 達[4]は、銀河面上の顕著な H II 領域が見られないところ(銀経 2.16, 7.29, 7.80 度)からかなり強い[C II]放射を検出した。彼らはまた[C II]の銀緯分布が  $^{12}\text{CO}(1-0)$  のそれと似ていることを見いだした。さらに Crawford 達[5]はいくつかの系外銀河が[C II]と  $^{12}\text{CO}$  の強度が良い相関を持つことを示した。彼らは両者とも分子雲に埋もれた OB 型星に照らされている光解離領域あるいは星間の紫外放射場に照らされている分子雲の暖かい表面ならば、大局的[C II]放射の強度を説明できるとした。しかしながら、このような広がった[C II]放射領域の性質やその重要性についてはまだよく理解されていない。従って、十分な空間分解能と銀河系の広い範囲にわたる観測が非常に重要視されていた。

我々は遠赤外波長域において周波数スイッチングの手法を成功させた[3]。この手法を用いれば広がった[C II]線放射を非常に効率よくかつ高い信頼性を持って検出することができる。この論文においては気球望遠鏡システムを用いて観測した銀河系の[C II]強度分布について述べる。また以下の文においては、銀河中心までの距離として 8.5 kpc の値を用いる。

## 2. 観測装置及び気球観測

観測に用いられた装置は宇宙科学研究所と京都大学が共同で開発した口径 50 cm の気球搭載赤外線望遠鏡[6]に、宇宙科学研究所が開発した液体ヘリウム冷却のファブリ・ペロー分光器[7]を搭載したものである。検出素子は宇宙科学研究所と通信総合研究所が共同で開発した加圧型 Ge:Ga[8]が用いられた。ビームサイズは FWHM で  $3.4'$ φ, 実効値で  $3.7'$ φ, 分光器の比分解能は 2100(143 km/s)であった。

空間的に広がった[C II]線の強度分布を効率よく観測するために、普通用いられる空間チョッピングをやめ、早い周波数スイッチングによって背景放射をキャンセルする方法を用いた[3]。これは測定したい波長とその両側±175 km/s とを 1/16 秒毎にスイッチングし、スペクトル線の強度だけを取り出す方法である。実際の観測中における検出系の NEP (sys)は  $1.1 \times 10^{-14} \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  であった。この値には分光器や望遠鏡の効率はもちろん、周波数スイッチングの効率も含まれている。この方法において注意すべきことは、分光器の透過速度幅(143 km/s)が銀河面の[C II]の速度幅(約±200 km/s)に比べて十分大きくないために、設定された中心速度からずれるにしたがって検出効率が悪くなる可能性があることである。銀河面の拡散放射に対して検出損失は最大 30 %程度と見積られる。

観測は 1988 年 5 月 24~25 日, 6 月 4~5 日の 2 回, アメリカ合衆国の NSBF パレスティン気球基地を用いて行なわれた。今回報告する銀河面の観測はこのうち約 3 時間が費やされた。観測中の感度の較正は Matsuhara 達[3]に述べられている。絶対強度の不定性は 30 %以下であった。

観測は 2 つの部分, 夜間の観測と昼間の観測からなっている。夜間の観測においては, スターセンサーが使えたため望遠鏡の指向方向の決定が精度良くでき, 誤差は  $1'$  以下である。一方昼間の観測においては, スターセンサーが使えず, 決定精度は約  $0.1^\circ$  であった。夜間の観測においては W 43( $l=30.8^\circ$ )及び NGC 6334 を通り銀河面にほぼ直交するスキャンが行われた。周波数スイッチングの中心周波数はそれぞれ  $V(\text{LSR})$  で  $+70 \text{ km/s}$ ,  $-65 \text{ km/s}$  に設定された。W 43 は  $+92 \text{ km/s}$  の速度を持っているので, 周波数スイッチングの効率の悪化は無視できるほど小さい。一方 NGC 6334 は  $-5 \text{ km/s}$  の速度を持っているので, 効率は約  $1/3$  と見積られる。昼間の観測においては, 銀河面をよぎるように望遠鏡を方位角方向に往復させ, 日周運動によって  $l=30^\circ \sim 50^\circ$  の範囲を観測した。ただし, 各スキャンの銀経方向の間隔はビームサイズの 5 倍以上であった。銀河面上の星間ガスの主な速度成分をなるべくもらさずカバーするために, 中心速度は  $l < 42^\circ$  に対して  $-70 \text{ km/s}$ ,  $l > 42^\circ$  に対して  $-25 \text{ km/s}$  に設定された。

## 3. 結 果

図 1, 図 2 に NGC 6334, W 43 を通り銀河面にほぼ直行するパスにおける[C II]強度分布を示す。データは図 1 については  $4'$ , 図 2 については  $2'$  のビンで積分された。エラーバーは統計的誤差の  $1\sigma$  を表している。強度ゼロのレベルは, 銀河赤道から離れたところ, 即ち図 1 については  $|b| > 1.5^\circ$ , 図 2 については  $|b| > 1.2^\circ$  を平均して決めた。

図 1 において  $b = -0.5^\circ$  から  $-1^\circ$  にかけて, はっきりした幅の狭いフィーチャーが見ら

れる。このフィーチャーのピークは NGC 6334 の電波連続波のピークと一致し、しかも約  $30'$  の広がりも両者で一致しているため、この  $[\text{C II}]$  放射は NGC 6334 に付随するものと考えて間違いない。しかしながら前節で述べたように、スイッチングの中心速度が NGC 6334 の速度に合っていないため、 $[\text{C II}]$  の強度は約  $1/3$  になっている。 $b=0.1^\circ$  にある小さいピークは H II 領域 G 351.6+0.2 [9] と一致している。この  $[\text{C II}]$  はおそらくこの小さい H II 領域に付随しているものと考えられる。しかしながら、これらの2つの幅の狭いフィーチャー以外に幅の広い  $[\text{C II}]$  放射成分が確かに残っている。特に  $b > 0^\circ$  の領域には個別の H II 領域はみられないが、明らかに  $[\text{C II}]$  放射が存在する。この広がった  $[\text{C II}]$  放射成分は  $b = \pm 1^\circ$  まで広がっており、しかも  $3.4'$  のビームでは分解できなかった。銀河赤道上でピークの強度はおおよそ  $1.5 \times 10^{-4} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  である。NGC 6334 自身については別の報告 [10] を参照されたい。

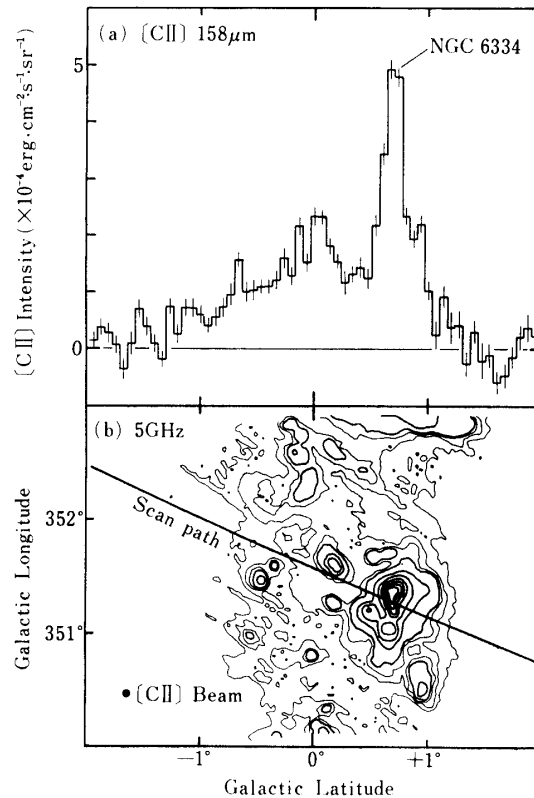


図1 (a) NGC 6334 を通るパスで観測された  $[\text{C II}]$  強度分布。スイッチングの中心速度は  $V(\text{LSR}) = -65 \text{ km/s}$ 、積分のビンは  $\Delta b = 4'$ 、誤差棒は統計的誤差の  $1\sigma$  を表す。黒丸はビームサイズ ( $3.4'$ ) を表す。(b) の  $5 \text{ GHz}$  連続波のマップ [9] の上にスキャンパスが示されている。 $5 \text{ GHz}$  のコントアは下から  $0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 8, 16, 20 \text{ K}$  を示す。NGC 6334 については速度があっていないために  $[\text{C II}]$  の検出効率  $50\%$  以下である。

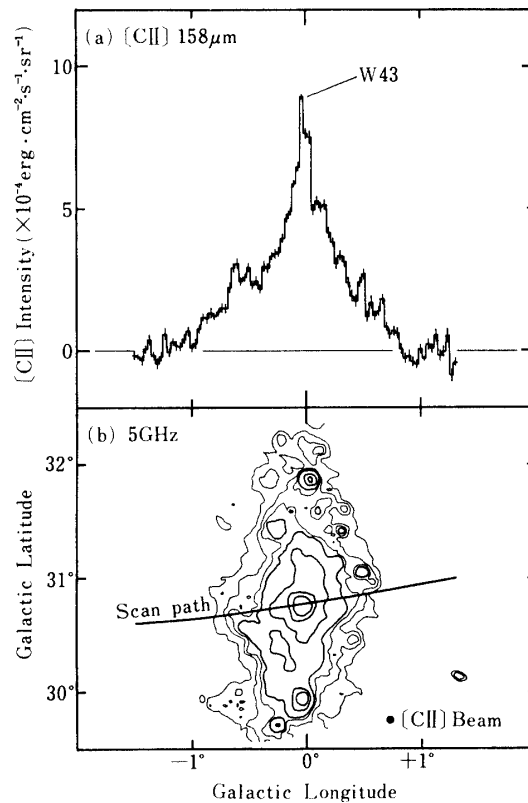


図2 (a) W 43 を通るパスにおける [C II] 強度分布. 中心速度は +70 km/s に設定された. 積分ビンは  $\Delta b = 2'$ . これ以外は図1を参照のこと.

一方図2のプロファイルは、一見、単一の幅の広いフィーチャーの様に見える。ピークの強度は  $9 \times 10^{-4} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  で、 $b = \pm 1'$  にまで広がっている。ピーク的位置は W 43 の電波および遠赤外連続波のピークに正確に一致する。このプロファイルが幅の狭いフィーチャーと広がった成分に分けられるかどうかは明らかではない。しかしながら W 43 の電波及び遠赤外連続波の広がり約  $10'$  であるので、[C II] についても幅約  $10'$  (5ビン) の幅の狭いフィーチャーが W 43 に付随し、それより外側の部分は広がった放射成分と解釈するのが自然である。

図3は、昼間の観測で得られた[C II]強度の2次元分布を表す。これらのコントアは元のプロファイルを  $\Delta b = 10'$  の幅で移動平均し、つぎに隣合ったスキャンパスについて同じ強度の点を直線で結ぶことにより描かれた。コントアは  $10^{-4} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  毎の等間隔である。各点における不確定性はコントア間隔の約半分である。この不確定性は主にゼロレベルの不確定性により生じている。[C II]放射は銀経  $30^\circ$  から  $50^\circ$  にかけて、銀河面に沿って広く分布している。いくつかの[C II]ピークは個別の H II 領域、例えば W 43 ( $l = 31^\circ$ ) および W 51 ( $l = 49^\circ$ ) に一致している。W 43 の周りには  $\Delta l = 2^\circ (30^\circ \sim 32^\circ)$ ,  $\Delta b = 1^\circ (-0.5^\circ \sim +0.5^\circ)$  に広がった特に[C II]の強い領域がある。これは 4 kpc リング(銀河中心までの

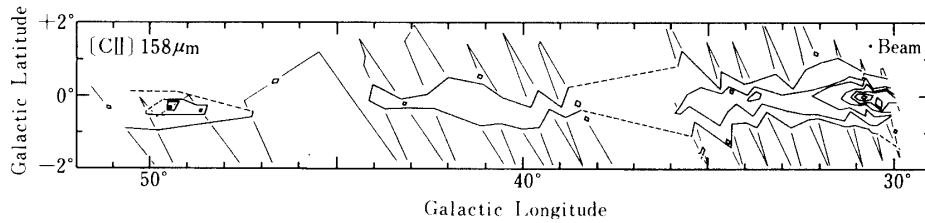


図3 銀河面に沿った大局的[C II]強度分布。スキャンパスは細い実線、ビームは右上の隅に示されている。パスに沿って移動平均操作を行ったため、実効的なビームはスキャンパスの方向に約10'の広がりを持っている。コントアは等間隔で、 $10^{-4} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  毎に描かれている。スイッチングの中心速度は銀経 $42^\circ$  以下は $+70 \text{ km/s}$ 、 $42^\circ$  以上は $+25 \text{ km/s}$ に設定された。

距離を10 kpcとしていた頃は5 kpcリング)の接線方向に位置する。以後この領域を31°コンプレックスと呼ぶ。

図4に、W 43を通るスキャンパスに沿った[C II]の緯度分布を $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、遠赤外及び電波連続波とともに示す。 $^{12}\text{CO}$ のデータは五大学サーベイ[11]のデータから、周波数スイッチングの設定速度に合わせるために、 $V(\text{LSR}) = +20$  から $+120 \text{ km/s}$ の範囲で積分されたものである。この範囲に銀河系の成分のほとんどが含まれている。遠赤外連続波のデータはIRASの100  $\mu\text{m}$  マップ[12]から作られた。電波連続波のデータはParks 5 GHzサーベイ[9]から作られた。これらのプロファイルはすべて、[C II]と同じスキャンパスに沿った強度分布を表している。

図3に示した強度分布を各スキャン毎に積分した結果を[C II]の銀経分布として図5(a)に示す。誤差棒はゼロレベルの不確定性による誤差の範囲を表している。Stacey達[4]のデータも同じ積分操作をして示してある。図中の破線は我々の観測から得られた平均的な[C II]強度を表す。しかしながら周波数スイッチングによって最大1/3のロスが考えられるので、これを補正すると実線のようなになる。我々のデータは $l=30^\circ$ より外側に限られるが、Stacey等のデータとは水平な線で矛盾なくつながるようである。したがって、実線、破線はそれぞれ、上限及び下限を表していると考えられる。また比較のために、 $^{12}\text{CO}(1-0)$ [13]、遠赤外連続波(IRAS[12])、及びH I 21 cmから得られた水素原子の柱密度分布[14]を示す。

#### 4. 議 論

##### (1) 銀河[C II]放射の拡散成分

最近の観測的及び理論的研究によって、H II領域の周りの[C II]領域の性質が明らかになってきた。この[C II]放射領域は光解離領域と呼ばれるもので、H II領域と分子雲の間に形成される[1]。しかしながら、これらの観測的及び理論的研究は主として、高密度の分子雲と高密度のH II領域の間に形成され、太陽近傍の $10^3 \sim 10^6$ 倍の紫外線放射場に照ら

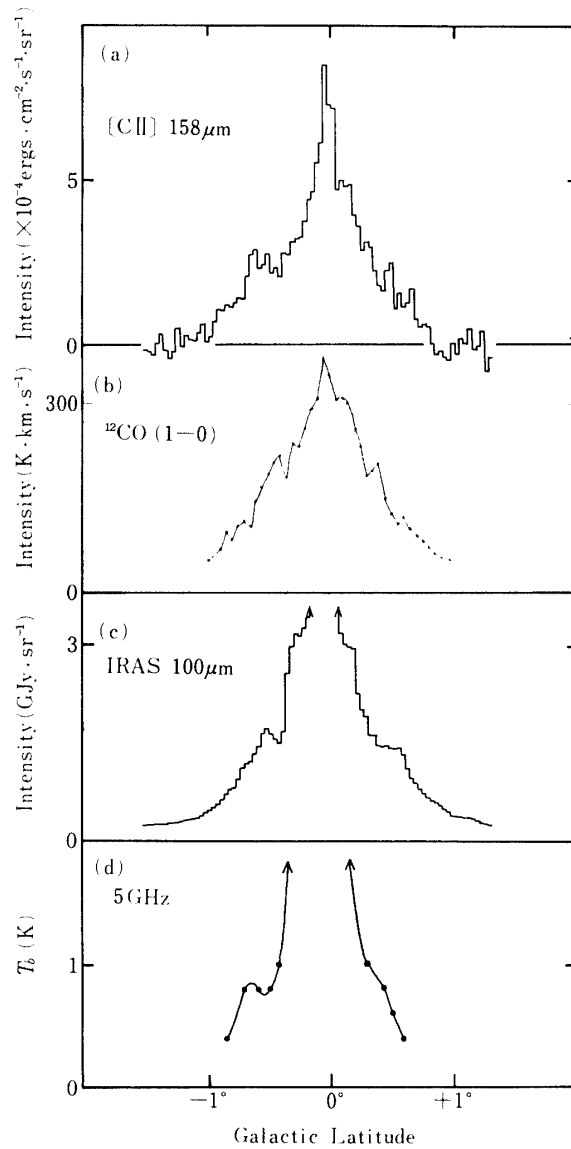


図4 (a) W 43 を通る [C II] 強度分布, 図 2 (a) と同じ. (b), (c), (d) はそれぞれ  $^{12}\text{CO}(1-0)$  [11], IRAS 100  $\mu\text{m}$  [12], 5 GHz 連続波 [9] の, [C II] と同じパスの強度分布を表す. CO のデータは  $V(\text{LSR}) = +20 \sim +120 \text{ km/s}$  の成分だけを積分した.

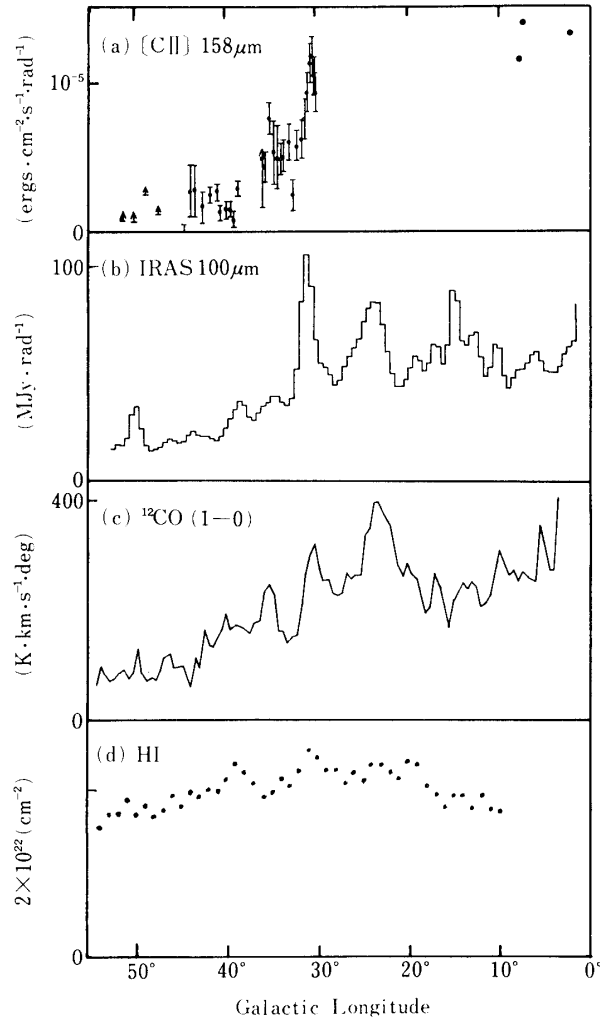


図5 (a) [C II] 強度を各パス毎に積分した結果の銀経分布. 銀経  $30^\circ$  以上の白丸が今回の観測データである. 誤差棒は主としてゼロレベルの不確定性による誤差を表す. 黒丸は Stacey 達 [4] のデータに同じ銀緯積分をした結果である. 破線は我々のデータを代表する分布を表す.  $30^\circ$  より内側では一定と仮定している. 実線は我々の観測において有効に検出できなかった速度成分があると思われるので, これを補正(1.3倍)したものである. やはり  $30^\circ$  より内側は一定と仮定したが, これは Stacey 達の結果とよく合う. (b), (c), (d)はそれぞれ $^{12}\text{CO} (1-0)$  [13], IRAS 100  $\mu\text{m}$  [12], 水素原子の柱密度 [14] の銀経分布を表す. (d)は銀河赤道上の値, (b)は $|b| < 5^\circ$ の範囲1 (c)は $|b| < 1^\circ$ の範囲の銀緯積分の値である.



された、コンパクトで高密度の光解離領域に集中していた。

図1においては、2つの幅の狭いフィーチャーのピーク位置及び幅は、NGC 6334 及び G 351.6+0.2 の電波連続波と一致している。従って、これらの[C II]放射は NGC 6334 及び G 351.6+0.2 に付随するものであると考えて間違いない。しかしながらこれらのフィーチャーを除いた後に幅の広い成分が存在する。特に  $b < 0^\circ$  の領域では、個別の H II 領域は 5 GHz 連続波のマップには見られない。この幅の広い成分は 3.4' のビームでは分解されない。これらの事実は広がった[C II]放射領域が存在し、しかも一様かつ滑らかな空間分布を持っていることを示す。

同じことが図2からもいえる。幅の狭いピークが W 43 に一致しているが、このプロフィール全体を W 43 に付随したものとするのは困難である。なぜなら、[C II]の放射は約2度の広がりを持つが、これは W 43 H II 領域の広がり、約  $10' [15]$  と比べて非常に大きいからである。したがって図2(a)の[C II]のほとんどは W 43 に付随していない放射(おそらく銀河面の拡散成分)に起因するものであろう。 $b = +0.4^\circ$  及び  $-0.6^\circ$  の小さく幅の狭いフィーチャーを除けば、我々のビームでは広がった成分を空間的に分解できていない。

さらに図3から銀河面上いたるところに広がった[C II]放射が存在することがわかる。これらの事実から、銀河面に沿って大域的な[C II]放射が存在し、図1, 2に見られた幅の広い[C II]放射成分はこの大域的[C II]分布の断面を見ているのであると結論することができる。

この広がった[C II]放射成分は我々のビームでは分解されない。これはこの[C II]放射が銀河系内部領域において、大域的で拡散的な分布を持つ星間ガスにおいて生じたものであることを示唆する。この大域的[C II]放射はより高い空間分解能あるいは波長分解能の観測によってより小さい成分に分解される可能性がある。しかしながら、これまでのところこの大域的放射成分が滑らかで一様な分布を示すことから、「拡散成分」と呼ぶべきであらう。

Stacey 達[4]は銀河面の  $l = 2.16, 7.29, 7.80^\circ$  からやはり[C II]放射を検出した。そこには個別の H II 領域がみられないことから、彼らの観測も大域的[C II]放射の存在を支持する。

これまでのいくつかの観測[2, 3]が M 42, M 17, NGC 2024 等の周りに[C II]放射が広がっていることを発見した。この広がった放射は、 $15' \sim 1^\circ$  を持ちながら、一方彼らのビームでは分解できないほど滑らかな空間分布を示すことで、コンパクトで強い[C II]領域とは明らかに区別できる。また、この広がった[C II]放射の強度は  $10^{-4} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  の数倍であり、銀河系の大域的放射の強度と同程度である。従って銀河の大域的[C II]放射は個別の H II 領域の周りにみられるものの重ね合わせによって説明することも可能であると考えられる。

## (2) 拡散[C II]放射の全[C II]光度に対する寄与

この節では拡散[C II]放射の全[C II]放射量に対する寄与について議論する。最近の観測的及び理論的研究[1]から、光解離領域においては[C II]放射の全遠赤外放射量に対する比は 0.1~1% の範囲にあることがわかっている。この値を使うことによって遠赤外放射

量のわかっている天体の[C II]強度を推定することができる。

W 43 まわりの「30° コンプレックス」はスキャンパスが比較的密にあるので、よい例である。この領域で最も強い天体はよく知られた H II 領域/分子雲複合体である W 43 である。これは電波及び遠赤外連続波において約 10' の広がり複雑な構造を示す[15]。太陽からの距離は約 6 kpc (Downes 達[16]が求めた 7 kpc に 0.85 を乗じた値)、10' の範囲の全遠赤外放射量は  $2.4 \times 10^6 L_{\odot}$  (Lester 達[15]が求めた値に  $(0.85)^2$  を乗じたもの) と見積られている。[C II]/FIR 比を 0.1% と仮定すると[C II]放射量は  $2400 L_{\odot}$  となる。一方図 2 (a) の[C II]プロファイルのうちピークの周り 10' の部分だけをとるとその[C II]放射量は  $1700 L_{\odot}$  になる。ただし銀経方向も同じ分布を持つと仮定した。この値は全遠赤外放射量の 0.1% に近い。従って、[C II]/FIR 比に関しては W 43 は光解離領域モデルと整合性を持つ。しかしながら 31° コンプレックスが W 43 と同じ距離にあるとすると、この領域から観測された全[C II]放射量は  $2 \times 10^5 L_{\odot}$  にもものぼる。かりに[C II]/FIR 比をモデルから予想される最大値 1% を採用したとしても W 43 から期待される[C II]放射量は  $2.4 \times 10^4 L_{\odot}$  となり、31° コンプレックス全体の 1/8 しかない。したがって W 43 に付随する[C II]放射は 31° コンプレックスの全[C II]放射の 10% 以下、おそらく 1% 程度しか寄与していない。

この 31° コンプレックスには W 43 以外にも多くの H II 領域がある。  $30^{\circ} < l < 32^{\circ}$ 、 $|b| < 1^{\circ}$  の範囲において 16 個の H II 領域があり[9, 18]、IRAS 点源カタログ[17]によれば 100  $\mu\text{m}$  バンドにおいて 100 Jy 以上の強度を持っている。しかしながらこれらの H II 領域の遠赤外フラックスを合計しても、W 43 (40000 Jy) のそれとほぼ同じにしかならない。したがって、[C II]/FIR 比が 1% を越えず、これらの天体の距離が W 43 と同じ (6 kpc) とすると、これらの天体の[C II]放射は全[C II]放射に対して 10% 以下の寄与しかしないはずである。さらに 100  $\mu\text{m}$  バンドで 100 Jy 以下の小 H II 領域を考慮したとしても、全[C II]放射を説明するためには同じ仮定の元で、4000 個もの小 H II 領域が必要である。このような多数の小 H II 領域が存在すると考えられる根拠はない。

したがって、W 43 を含む個別の H II 領域に付随する[C II]放射は 31° コンプレックスの全[C II]放射量に対して、小さい寄与しかしていないことがわかった。図 1 (a) に示した NGC 6334 を通るパスのプロファイルについてもこのような傾向がみられる。NGC 6334 についてはスイッチングの設定速度と大きくずれていたため約 1/3 の効率になっていると考えられる。しかしながら、NGC 6334 に付随する成分はこのプロファイルの全体に対して支配的な寄与をしていない。NGC 6334 は  $350^{\circ} < l < 352^{\circ}$  の領域で圧倒的に強い H II 領域であること、および NGC 6334 の距離は 1.7 kpc と比較的太陽に近い天体であることを考慮すると、やはり NGC 6334 の[C II]の全[C II]放射量に対する寄与は小さいことがわかる。

以上の議論から、内部の円盤領域から放射される[C II]のほとんどは、個別の H II 領域に付随する[C II]放射ではなく、もっと広がった拡散成分であることが結論される。

### (3) 大局的[C II]放射領域の性質

W 43 を通る[C II]の銀緯分布を  $^{12}\text{CO}(1-0)$ 、100  $\mu\text{m}$ 、5 GHz の連続波と比較してみよう

(図4). 図は $\pm 1^\circ$ に広がるすその部分の形が一致するように縦軸のスケールを決めた. W 43に一致するピークは $100 \mu\text{m}$ , 5 GHzではすその部分に比べて極端に強い. [C II]はこれらの中ではCOに最も似ている. また図5は[C II]の銀経分布を $100 \mu\text{m}$ 連続波, $^{12}\text{CO}$ (1-0), 水素原子の柱密度の銀経分布と比較したものである. 水素原子以外は銀経 $30^\circ$ から $40^\circ$ の間に強度の大きな減少が見られる. これらの事実は「広がった光解離領域」が銀河系の内部に広く分布して, 広がった遠赤外放射及び広がった[C II]放射のかかなりの部分がこの領域から放射されていることを示唆する. また広がった電波連続波の分布もこれらとやや似ていることから, やはり「広がった光解離領域」と近いところ即ち光解離領域の外側に広がったH II領域(ELD—H II領域[19])が伸びていることも可能性として考えられる.

Stacey 達[4]は彼らの観測結果を説明できるのは巨大分子雲(GMC)の周縁部のUVが侵入できる領域しかないとした. しかし彼らはそこにおける温度と密度を300 K, 300個/ccと先験的に与え, このようなGMCの表面が視線上に数個あれば観測された強度を説明できるとしているだけで, これ以上の定量的な検討をしていない.

[C II]線がELDH II領域から出ている可能性を検討しよう. ELDH II領域は電波コンティニウムが銀河面上に広がった弱い成分を持っていることを説明するために提唱されたもので, Mezger[19]によると銀河面方向においてH II領域中の平均電子密度約3個/cc, 平均の電子温度7000 Kを持っている. この温度に置ける[C II]遷移のクリティカル密度は約30個[20]であるから, [C II]線の強度は

$$I[\text{CII}] = 1.31(-22) \cdot \chi(\text{C}^+) \cdot n_e^2 \cdot 1 \\ (\text{ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$$

で表せる. 一方電波コンティニウムの強度は $T_e = 7000 \text{ K}$ のとき

$$T_b = 5.44(-39) \times (\lambda^2/2k) \cdot g_{ff} \cdot T^{-1/2} \cdot n_e^2 \cdot 1 \\ = 4.15(-23) \times n_e^2 \cdot 1 (\text{K})$$

図2より[C II]と電波コンティニウムの比は $2.3(-4) (\text{ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})/\text{K}$ であるから,  $\chi(\text{C}^+) = 7.3(-5)$ である. Cの宇宙存在比を4(-4)とすると, Cのうち約20%が $\text{C}^+$ になっていなければならない. 従って一応説明可能である. しかしながら, 炭素原子はかなりの割合が星間塵(グラファイト)に取り込まれている可能性があること, 及びELD—H II領域を作る「裸のO型星」はCのうちかなりの割合を $\text{C}^{++}$ に電離すると思われることを考慮すると, 広がった[C II]強度のほとんどがELD—H II領域から出ているとする説明はやや苦しいかも知れない. また図4からわかるように[C II]と5 GHzの幅にも若干差が認められる.

つぎに[C II]線が中性のHI雲から出ている可能性を検討しよう. KulkarniとHeiles[21]は $T = 40 - 400 \text{ K}$ ,  $P = 10^3 - 2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ の範囲において[C II]線の強度が圧力の良いトレーサーであることを示した. 彼らは宇宙線による電離の効果も考慮していたがここでは簡単のためにCのうち $\delta (= 0.5)$ の割合が $\text{C}^+$ になっていると仮定し, H原子による衝突励起だけを考慮する. 一方21 cmの観測よりこの方向のHI雲の柱密度は銀河面上で約 $2(22) \text{ 個}/\text{cm}^2$ と見積られる[14]. [C II]強度分布との比較により, H原子1個当りの

[C II]線によるガスの冷却率は  $2.2(-25) (\text{ergs} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{atom}^{-1})$ , このとき圧力は  $1.5-3.0 (4) \text{cm}^3 \cdot \text{K}$  となる. これは中性 HI 雲が太陽近傍に比べて  $15-30$  倍高い. また Pottasch 達[22]が紫外の吸収で求めた値よりさらに  $2$  倍大きい. 銀河系の内部, 例えば  $4 \text{kpc}$  リング領域では星間ガスの圧力は太陽近傍の数倍程度になっただけでもそれほど不思議ではない. しかしながら,  $20$  倍もの圧力はやや大きすぎるし, 図5の銀経分布においても HI の分布は[C II]のそれと大きく異なっている. したがって HI 雲では説明できないと考えられる.

さらに[C II]線が分子雲の表面から出ている可能性について考察しよう. Tielens と Hollenbach[1]は高密度の分子雲がやはり高放射密度の UV に照らされている場合の光解離領域について理論的に解析し, このような領域からは  $10^{-3} \text{ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  程度の [C II]線が放射されるという結果を得た. しかし UV の高放射密度領域が銀河面上に広がっているとすると OB 型星が大量に存在しなければならず, また電波連続波でコンパクト H II 領域が見いだされるはずである. これは観測事実と矛盾する. 一方最近 van Dishoeck と Black[23]は  $\text{H}_2$ , CO の光解離効率を再計算した結果, これまでのものより約  $10$  倍 CO の光解離効率が高いことを示した. そして太陽近傍と同じ UV 放射場のもとでも, 分子雲の表面  $A_v=0.6$  等程度までは C のほとんどが  $\text{C}^+$  になっていることを示した. 彼らの結果にしたがえば, OB 型星に接していない分子雲でも, 表面に  $A_v=0.5$  等, 密度  $1000$  個/cc, 温度  $50 \text{K}$  の層状の領域から放射される [C II]の強度は  $0.5(-4) (\text{ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1})$  であるから, W 43 のピークを除けば観測結果を説明するためには, 視線上に数個以内の分子雲をおけば良いことになる. 但しこの場合, ガスを  $50 \text{K}$  程度に温めるエネルギーが太陽近傍程度, または銀河内部領域の一般的な UV 放射場で供給できるのか, あるいは他の加熱過程を考える必要があるのかはまだ分かっていない.

結論として, 中性 HI 雲説は可能性が薄い. ELDH II 領域説は可能性はあるもののやや無理がある. 分子雲の皮説は最も説明し易く, van Dishoeck と Black[23]に従えば必然的な結果である. そしてこの「分子雲の皮」では  $\text{H}_2$  が主成分であるにもかかわらず CO がほとんどなく, [C II]が支配的冷却源であり, かつ最も強力なプローブである.

#### (4) 銀河系全体の[C II]放射量

銀河系全体の[C II]線の光度を見積ってみよう. [C II]の面輝度分布が銀河系内で軸対称であると仮定すると, 図5(a)の銀経分布から銀河系内の面輝度分布が求まり, これを積分することによって銀河系全体の[C II]線の光度が得られる. 図5(a)の実線の銀経分布を仮定すると, 銀河系円盤部の[C II]光度は約  $2.6 \times 10^7 L_\odot$  となる. なお銀河中心から  $7 \text{kpc}$  の距離までを積分した. また銀河中心部の寄与は  $10\%$  以下と予想される[24]ので省いた. Stacey 達[4]は  $3.7 \times 10^7 L_\odot ((0.85)^3$  を彼らの値に乗じた)の値を導いている. しかし, 観測領域が限られていたため, [C II]の面輝度を太陽の内側で一定と仮定しており, この仮定は図5(a)の結果と矛盾していることがわかった.

銀河系内盤部の遠赤外全光度は  $7.6 \times 10^9 L_\odot$  [25]と見積られているので, [C II]/FIR 比は約  $0.35\%$  である. Crawford 達[5]の結果と比較すると我々の銀河系は[C II]/IR 比に関しては NGC 1068 と同程度で, M 51 より小さく M 82 より大きいといえる. しかしな

から詳細な比較は[C II]の銀河系内の分布が明らかになるのを待つべきだろう。

### 5. ま と め

今回の観測結果は銀河系の[C II]放射を高い精度と空間分解能を持って測定した初めてのものではあった。その結果、(1)銀河系の内部の円盤部には大局的な広がった[C II]放射が存在すること、(2)この広がった[C II]放射は銀河系の全[C II]のほとんどを担っていること、(3)広がった[C II]放射の銀緯分布、銀経分布は $^{12}\text{CO}(1-0)$ に最も似ていること、(4)したがって広がった[C II]放射は分子雲の表面に形成された「広がった光解離領域」から放射されていると考えられること、及び(5)全[C II]光度は $2.6 \times 10^7 L_{\odot}$ で[C II]/FIR比は約0.35%であることが明らかになった。

### 謝 辞

今回の気球観測の成功は、西村純所長をはじめとする宇宙科学研究所の気球工学のスタッフおよび成田正直技官、郵政省通信総合研究所の高見英樹研究員、米国パレスティンのNSBFの協力によるところが大きいのでここに謝辞を述べる。また本研究は文部省の科学研究費補助金、学術振興会、米国科学財団(NSF)の援助を受けて行われた。

### 参 考 文 献

- [1] A. G. G. M. Tielens and D. Hollenbach (1985), *Ap. J.* **291**, 722.  
R. Genzel et al. (1989), *Proc of 22nd ESLAB Sympo., Infrared Spectroscopy*, in press.
- [2] R. W. Russel et al. (1981), *Ap. J. Letters*, **250**, L35.  
N. T. Kurts et al. (1983), *Ap. J.*, **264**, 538.  
J. Stutzki et al. (1988), *Ap. J.*, **332**, 379.
- [3] H. Matsuhara et al. (1989), *Ap. J. Letters*, **339**, L67.
- [4] G. J. Stacey et al. (1985), *Ap. J.*, **289**, 803.
- [5] M. K. Crawford et al. (1985), *Ap. J.*, **291**, 755.
- [6] H. Okuda et al.: in *Proc. of 14th Int. Sympo. Sp. Tech. Sci.*, (1984), p. 1217.  
H. Shibai et al.: in preparation, (1989).
- [7] H. Okuda et al. (1986), in *Proc. of SPIE*, **627**, *Instr. in Astron. VI*, p. 20.  
T. Nakagawa et al. (1989), in preparation.
- [8] N. Hiromoto et al. (1989), *Infrared Physics*, **29**, 255.
- [9] R. F. Haynes et al. (1979), *Aust. J. Phys. A strophys. Suppl.*, **48**, 1.
- [10] T. Nakagawa et al. (1989), in preparation.
- [11] D. B. Sanders et al. (1986), *Ap. J. Suppl.*, **60**, 1.
- [12] *IRAS Galactic Plane Images and All Sky Maps*.
- [13] T. M. Dame et al. (1987), *Ap. J.*, **322**, 706.
- [14] W. B. Burton (1976), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **14**, 275.
- [15] D. F. Lester et al. (1985), *Ap. J.*, **296**, 565.
- [16] D. Downes et al. (1980), *A. & Ap. Suppl.*, **40**, 379.
- [17] W. J. Altenhoff et al. (1978), *A. & Ap. Suppl.*, **35**, 23.
- [18] *IRAS Point Source Catalog*.

- [19] P. G. Mezger (1978), *A. & Ap.*, **70**, 565.
- [20] M. A. Hayes and H. Nussbaumer (1984), *A. & Ap.*, **134**, 193.
- [21] S. R. Kulkarni and C. Heiles (1987), in *Proc. of Sympo. Interstellar Processes*, ed D. J. Hollenbach and H. A. Thronson Jr., p. 87.
- [22] S. R. Pottasch et al. (1979), *A. & Ap.*, **74**, L15.
- [23] E. F. van Dishoeck and J. H. Black (1988), *Ap. J.*, **334**, 771.
- [24] H. Okuda et al. (1989), in *Proc. IAU Sympo.*, No. **136**, *Galactic Center*, in press.
- [25] P. Cox and P. G. Mezger (1988), *Lecture Notes in Physics*, **297**, *Comets To Cosmology*, ed. A. Lawrence, p. 97.