

オリオン領域の [C II] 158 μ m 輝線サーベイ観測

東矢高尚^{*1,2} · 中川貴雄^{*1} · 土井靖生^{*1,2} · 望月賢治^{*1,2} · 石井景子^{*1,3}
卷内慎一郎^{*1,2} · 奥田治之^{*1} · 芝井 広^{*1}

Survey Observations of the Orion Region

with the [C II] 158 μ m Line

By

Takanao TOHYA, Takao NAKAGAWA, Yasuo DOI, Kenji MOCHIZUKI,
Keiko ISHII, Sin itirou MAKIUTI, Haruyuki OKUDA and Hiroshi SHIBAI

Abstract : We made survey observations of the Orion region in the [C II] 158 μ m line with a dedicated system called BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer). Our observed area was approximately $12^\circ \times 8^\circ$ and a few hundred times wider than previously observed areas, except for COBE observation.

Observational results show large-scale [C II] 185 μ m line emission in the Orion region. The Intensity ratios [C II] / FIR and CO / FIR varies from place to place, which suggests the [C II] 158 μ m line was emitted in various phases interstellar gas.

概 要

オリオン領域の [C II] 158 μ m 輝線サーベイ観測を、気球搭載望遠鏡BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) によって行った。観測領域は $12^\circ \times 8^\circ$ に及び、COBE の観測を除けばこれまでに観測された領域の数百倍である。

この観測の結果、オリオン領域には広い範囲に [C II] 158 μ m 輝線の輻射成分が存在することが明らかになった。また、[C II] 158 μ m 輝線と遠赤外線連続波と CO(J=1-0) を比較すると、場所によってそのお互いの強度比が大きな相違を示す。このことは、オリオン領域での [C II] 158 μ m 輝線放射が多様な物理状態の星間ガスから行われていることを示唆する。

1. 序

1. 1 オリオン領域

オリオン領域は、我々の太陽系から、距離にしておよそ 450pc のところに存在する活動的な星形成領域である。そして、大質量星(OB星)の星形成領域としては、もっとも我々の太陽系に近い位置に存在している。(Genzel & Stuzki 1989)。このため、今までに様々な重要な発見がなされてきた。たとえば、最初の原始星候補の発見などがある。(Becklin & Neugebauer 1967; Kleinmann & Low 1967)。

* 1 宇宙科学研究所 * 2 東京大学理学部 * 3 弘前大学理学部

オリオン領域は、赤経 5 h 35m 赤緯 -4° 近辺に位置し、ふたつの大きな星間分子雲と、それに付随したいくつかの OB Associations、そして H II 領域等を含んでいる (図 1)。ふたつの星間分子雲、Orion A (L1641)、Orion B (L1630) は互いに近距離にあり、ひとつの Cloud Complex を形成していると考えられている。また、Orion A、B の北東には OB Associations がいくつかならんで存在している。この Associations は 4 つに分類されており、それぞれ、Ia、Ib、Ic、Id と呼ばれている。これらはそれぞれ、12、8、6、 4×10^6 年の年齢であり、現在では Id に位置する Orion Nebula 周辺で星形成活動が行われている (Blaauw 1964)。

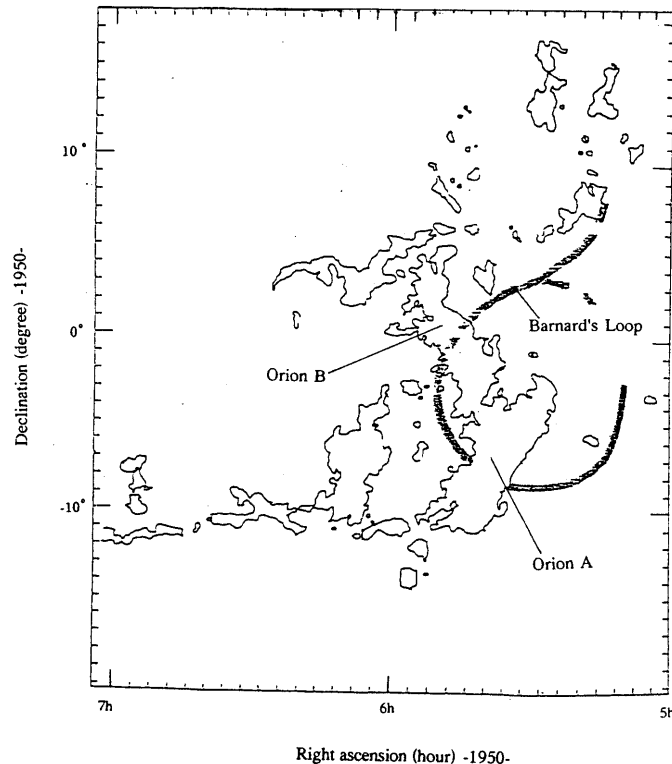


図 1 オリオン領域とその周辺領域の星間分子雲の分布。(Maddalena et al. 1985)

オリオン領域には、また、H II Region、Reflection Nebula が数多く存在する。代表的なものとして、Orion Nebula、NGC2024、Barnard's Loop などがある。

オリオン大星雲と呼ばれる Orion Nebula (M42、NGC1976) は、赤経 5h35.4m、赤緯 $-5^\circ 23'$ に存在する H II 領域であり、Ori θ 星を中心にして $66' \times 60'$ にわたって広がっている。この中心星 θ 星は θ_1 と θ_2 の二つの Cluster からなり、 θ_1 の方は四重星を形成しており、トラペジウムとよばれている。トラペジウムは OB 型星で形成されており、オリオン大星雲の励起星であると考えられている。オリオン大星雲の周辺部も活動性に富み、H II region である NGC1982 (M43)、NGC1980、NGC1977、NGC1973、NGC1975、NGC1999 が存在している。

NGC2024 は星間分子雲 Orion B 上に存在している H II region であり、オリオン領域では Orion Nebula について明るい。位置は赤経 5h39.2m、赤緯 $-1^\circ 57'$ である。この H II region の励起星は ζ Ori (O9) であると考えられているが、He の再結合線の観測から、この領域内に存在する B 型星が寄与している可能性も示唆されている。NGC2024 の周辺には Reflection Nebula の NGC2023、H II region である IC434、そして Dark Cloud 馬頭星雲 (Horsehead Nebula) が存在している。IC434 の励起星は ζ Ori または σ Ori である。

Barnard's Loop はオリオンの三つ星の東側に存在する半円上の H II Region である。大きさは $14^\circ \times 10^\circ$ にわたり、中心の位置は赤経5h30m、赤緯 $-3^\circ 00'$ mである。Barnard's Loop は超新星残骸 (Super Nova Remnant ; SNR) であるとも考えられている (Cowie et al. 1979)。

このように、オリオン領域は多量の星間物質と多くの若い星が存在している。このため、星間物質と星の光との相互作用が、星間物質の物理状態にどのような影響をもたらすかを研究するうえで、オリオン領域の観測は非常に重要だと考えられる。また、オリオン領域は我々の太陽系に比較的近いため詳細な構造を明らかにすることを期待できる。

そこで、我々は気球搭載望遠鏡 BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) を用いて遠赤外 [C II] 158 μ m 輝線を観測した。以下に、その観測と観測結果を述べる。

2. 観測

2. 1 気球搭載望遠鏡 BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) による観測

我々が観測に使用した BICE は、[C II] 158 μ m 輝線のサーベイ観測専用最適化したシステムである (Nakagawa et al. 1990)。BICE の観測機の性能を表にしめす (表1)。

表 1

望遠鏡	光学系	オフセットオーバーサイズ光学系
	主鏡	物理的有口径 350mm
		幾何学的有口径 200mm
分光系	分光器	Tandem Fabry-Perot Spectrometer
	検出器	Stressed Ge:Ga Photoconductor
	波長分解能	$R(\lambda/\Delta\lambda)$ 1750
	空間分解能	ϕ 12.4 arcmin
	検出感度	1.5×10^{-5} ergs s $^{-1}$ cm $^{-2}$ ster $^{-1}$ (3σ)
姿勢制御	位置精度	8 arcmin (RMS, 3σ)

今回の観測は1994年9月3日から4日にかけて岩手県にある三陸大気球観測所にておこなわれた。放球はJST18:44:41におこなわれ、毎分300mの速度で順調に上昇し、JST20時35分に東経144度44分、38度59分、大船渡湾南方10kmで水平浮遊高度35.2kmに達した。その後、西南西方向におよそ時速35kmで進行した。観測はJST21時ごろより銀河面スキャンから開始した。姿勢制御装置の不調でゴンドラの制御が発振することもあり、その場合は観測の中断を余儀なくされたが、銀経15度から70度までの広い領域について、スキャン観測を行うことに成功した。オリオン領域の観測はJST2時ごろ(UT:17h)にはじまりJST3時までおよそ1時間行うことができた。JST3時8分に気球の切り離しをおこない、観測器は東経139度16分北緯38度30分鶴岡市温海町西南30km、栗島北北東2kmの海上に着水した。回収は翌日12時半に無事行なわれた。当日の気球の航跡図を図2に示す。

B200-2気球 航跡図
 観測項目 銀河赤外線観測
 放球日時 1994年 9月 3日 18時44分41秒

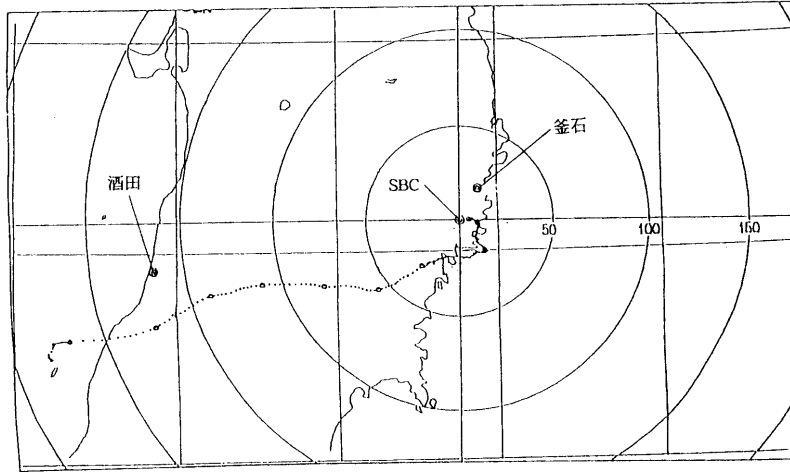


図2 BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) の観測時の航跡図。

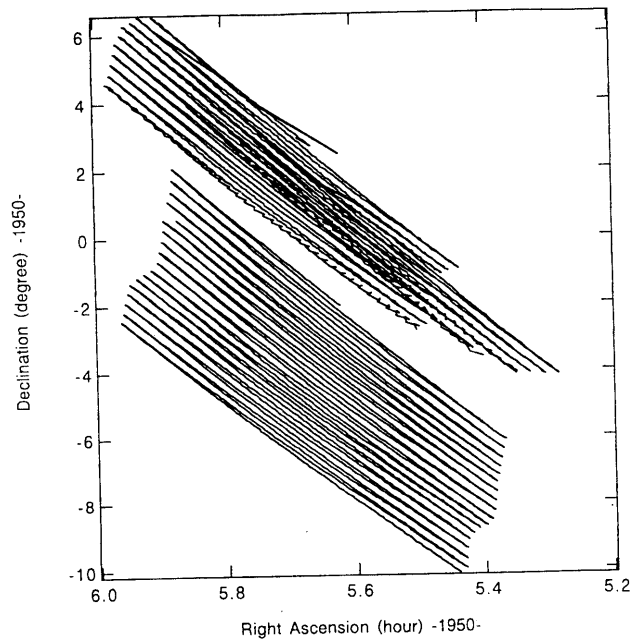


図3 オリオン領域観測時のスキャンパス。

観測時のスキャンパスをオリオン領域について図3に表示する。観測領域で欠落している部分は、姿勢制御発振のために観測ができなかった部分である。オリオン領域の観測範囲はCOBEによる空間分解能 7° の全天マッピングを除けば、これまでの観測 (Stacey et al. 1991) の数百倍に及ぶ。

2. 2 観測データの解析

以下に観測データ解析の概要を示す。

2. 2. 1

(1) ゴンドラには姿勢決定のために地磁気の方角を検出する3軸磁気センサーと重力の方角を検出する傾斜計が搭載されていた。3軸磁気センサーの出力と傾斜計の出力とを用いて、ゴンドラに対する地磁気と重力の方角を知り、ゴンドラの姿勢を決定する。ゴンドラ内での望遠鏡の位置関係から、望遠鏡の観測位置を求める。

(2) (1)で、望遠鏡の観測位置は決定できる。しかし、ゴンドラ内の地磁気の方角の誤差と、ゴンドラと望遠鏡との位置関係に含まれる誤差により、絶対位置のオフセットが存在している。これを補正するため、[C II] の強度がピークを示す点と、遠赤外線 (FIR; Far InfraRed) の Continuum 強度分布図においてピークを示す点とが一致するものと仮定して、絶対位置のオフセットを計算した。FIRは赤外線衛星IRASにより観測された60 μ mバンドと100 μ mバンドの観測値を使用して求めている。

(3) (1)と(2)により、位置を決定した。この位置決定の誤差を求めるために、スターセンサーで同時に観測した星の位置と、計算した位置を比較した。この誤差の分散が位置決定の誤差に相当する。その結果、位置の相対誤差は rms で 8' となることがわかった。

2. 2. 2 強度の見積り

我々が観測したデータは以下の三つの成分から成り立っている。

- (1) [C II] 158 μ m 輝線成分
- (2) 158 μ m における遠赤外線連続波成分 (Continuum)
- (3) 大気放射、機器放射による背景放射成分

これらより、(1)の [C II] 158 μ m 輝線成分だけを抽出する。その方法および、強度の較正について以下に述べる。

2. 2. 2 a バックグラウンド (背景放射光) の決定

(3)の背景放射光をまず求める。空間スキャンの端で、IRAS SKY SURVEY ATLAS の 60 μ m と 100 μ m のデータから求めたFIR強度が $7 \times 10^{-4} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 以下の領域を選択し、この領域では [C II] 158 μ m 輝線成分も、Continuum 成分も存在しないものと仮定して、この領域での出力値が背景放射光の値とした。それ以外の領域では、背景放射光は空間スキャンの端の値から時間の一次の関数で近似した値を用いた。

このとき、背景光のみ存在するとした空間スキャンの端の領域において、実際は、[C II] 158 μ m 輝線が存在していた場合、これは検出感度に影響をあたえる。これを見積もるために FIR と比較して考える。もし、[C II] 158 μ m 輝線が FIR の 1% であるとすれば、空間スキャンの端の領域での FIR の典型的な値は $5 \times 10^{-4} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ であるので、[C II] 158 μ m 輝線成分は $5 \times 10^{-6} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 存在していることになる。したがって、[C II] 158 μ m 輝線成分は $5 \times 10^{-6} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 下方見積りしている可能性がある。

2. 2. 2 b Continuum 成分の決定

(3)の成分を生データから差引き、(2)の Continuum の成分を次に求める。ファブリーペロー分光器の波長分解能は 175 km s^{-1} であり、オリオン領域における [C II] 158 μ m 輝線の速度幅に比べて十分に大きいので、[C II]

158 μ m 輝線プロファイルは分光器の透過プロファイルの形であると考えられる。そこで、プロファイルの形をローレンツィアン+1次関数でフィッティングした。フリーパラメーターはラインの高さ、幅、中心周波数、

ベースラインの一次式で、計5つである。これから、(2)の Continuum の成分と [C II] 158 μ m 輝線の成分を求めた。

2.2.2 c [C II] 158 μ m 輝線積分強度の較正

[C II] 158 μ m 輝線の積分強度の較正は今回観測した M17 の積分強度を Matsuhara et al. (1989) による M17 の観測の結果と比較することによって行った。彼らの map を Gaussian 関数と convolution することでビームの大きさを補正した。強度の誤差は、松原らの観測値の不定性によっており、その不定性はほぼ30%である。

3. 観測結果

3.1 オリオン領域における [C II] 158 μ m 輝線の大局的分布

オリオン領域の [C II] 158 μ m 輝線の強度分布図を図4に示す。観測した広い領域で $1 \times 10^{-5} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 以上の [C II] 158 μ m 輝線放射が存在することが明らかになった。

[C II] 158 μ m 輝線の放射領域で、既知の天体との関連がある三つの領域を示す。

まず最初に、赤経 5h35m、赤緯-5° 周辺に、非常に強い放射が $2^\circ \times 3^\circ$ の範囲にわたってひろがっている。この領域には、星生成がおこなわれている OMC-1 分子雲や Orion Nebula (M42)、NGC1982、NGC1980、NGC1999、NGC1973、NGC1975、NGC1977などの Bright Nebula が含まれている。この領域の [C II] のピーク強度は $9.5 \times 10^{-4} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ であり、Orion Nebula の θ 1 付近に位置している。この $2^\circ \times 3^\circ$ の領域を以下ではM42領域と呼ぶ。

また、この領域について広い広がりを示す領域が赤経 5h40m、赤緯 -2° あたりに $1.3^\circ \times 3^\circ$ の範囲にわたって存在している。この領域のピーク強度は $6.2 \times 10^{-4} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ でNGC2024 の位置に相当する。この領域には、NGC2024、NGC2023、そしてIC434 の Bright Nebula と Horse-head Nebula という Dark Nebula が含まれている。この領域を以下では NGC2024 領域と呼ぶ。

前のふたつの領域に比べると [C II] 158 μ m 輝線放射ははるかに弱い。赤経 5h50m、赤緯 0° を通り、北北西から南南東に観測領域全域にわたって帯状に伸びている成分がある。これは明らかに Barnard's Loop と位置的に対応している。この領域のピーク強度は $2.0 \times 10^{-5} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 程度である。

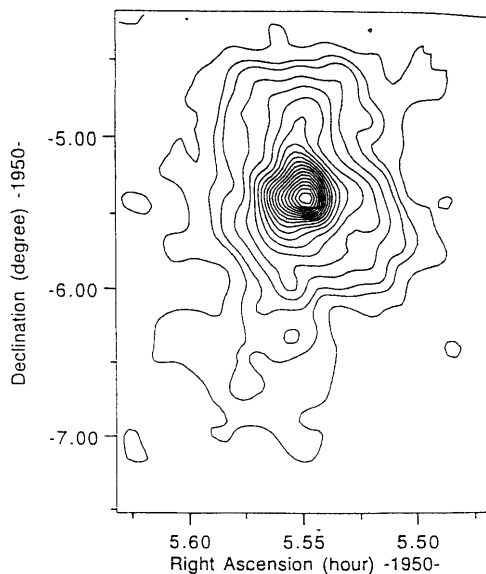


図5 M42を含む領域の[C II] $158\mu\text{m}$ 輝線強度分布図。コントアレベル間隔は 1×10^{-5} 、 3×10^{-5} 、 5×10^{-5} ergs s cm ster。それ以上はコントアレベル間隔 5×10^{-5} ergs s cm ster

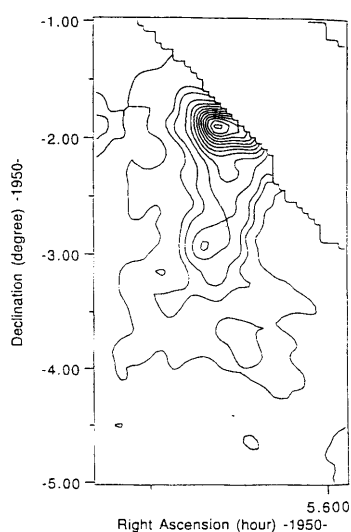


図6 NGC 2024を含む領域の[C II] $158\mu\text{m}$ 輝線強度分布図。コントアレベル間隔は 1×10^{-5} 、 3×10^{-5} 、 5×10^{-5} ergs s cm ster。それ以上はコントアレベル間隔 5×10^{-5} ergs s cm ster

4. 議論

前節で[C II] $158\mu\text{m}$ オリオン輝線が折温領域でどのような分布をしているかは明らかになった。次に、他の観測と比較することによって、星間ガスの物理状態が異なっていると考えられる領域を分割し、その領域の[C II] $158\mu\text{m}$ 輝線がどのようなメカニズムで放射されているのかを議論する。

4.1 他の観測との比較

ここでは、遠赤外連続波 (Continuum) と CO(J=1-0) と [C II] 158 μ m 輝線の比較をこころみる。FIR の強度は1983年に打ち上げられた赤外線衛星 IRAS の観測の IRAS SKY SURVEY ATLAS の 60 μ m バンドと 100 μ m バンドのデータを用いて

$$I_{\text{FIR}}(\text{ergs s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{ster}^{-1}) = (0.325 \times I_{60} [\text{Jy ster}^{-1}] + 0.126 \times I_{100} [\text{Jy ster}^{-1}]) \times 10^{-10}$$

として求めた。(c.f. Helou et al. 1989) FIRの空間分解能は Gaussian 関数と convolution を行うことによりスムージングし、[C II] 158 μ m 輝線の分解能の 15' に一致させている。COはコロンビアサーベイのデータを用いた。(Maddalena et al. 1986)

4.1.1 M42 領域

遠赤外 Continuum (FIR) の M42 領域における強度分布を図7に、[C II] / FIR 比の図を図8に示す。同様に、COの強度分布と [C II] / CO 比の図を図9、図10に示す。これらの結果から、[C II] 158 μ m 輝線とCO、FIRとの関係は局所的にかなり異なることが明らかである。そこで、似た特徴を示すいくつかの領域にさらに分割する。

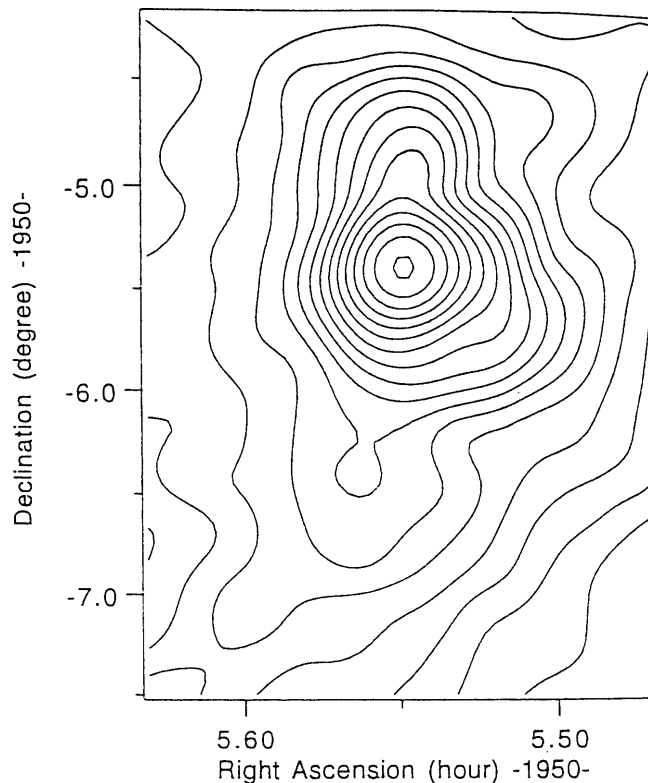


図7 M42 領域の FIR 強度分布図。コントアレベル間隔は 3.2×10^{-4} 、 1×10^{-3} 、 3.2×10^{-3} 、 1×10^{-2} 、 3.2×10^{-2} 、 1×10^{-1} 、 3.2×10^{-1} ergs s cm ster。

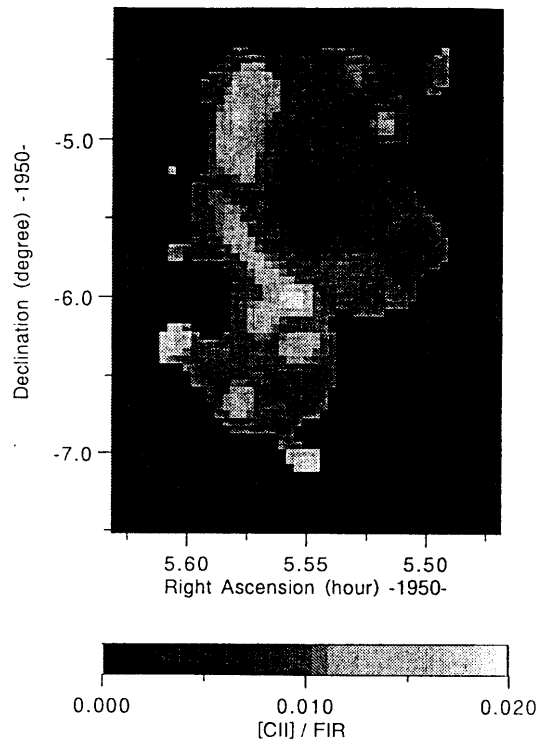


図8 M42 領域の [C II] 158 μm 輝線と FIR の比の分布図。

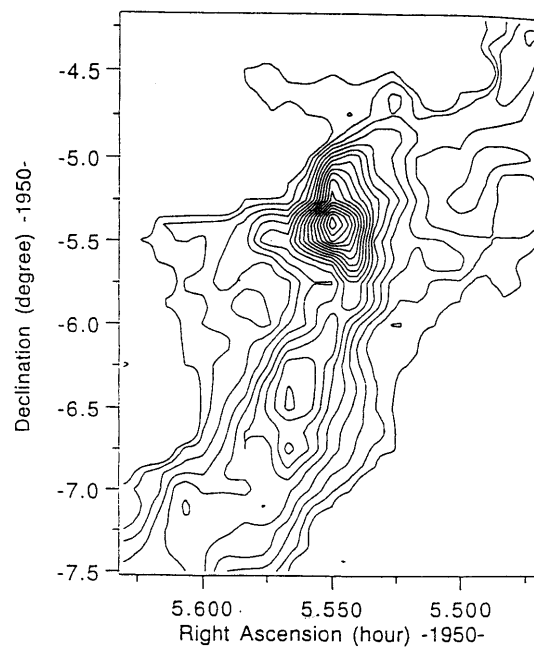


図9 M42 領域の CO の強度分布図。コンタレベル間隔は $1 \times 10^{-8} \text{ ergs s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$

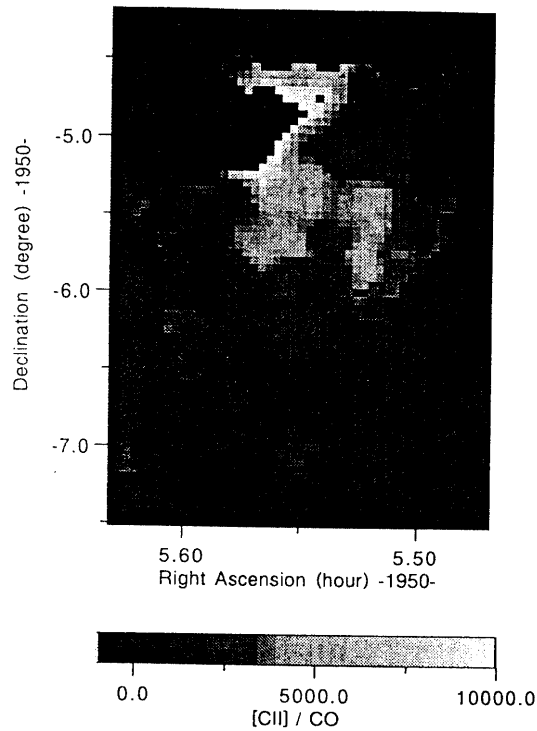


図10 M42 領域の [C II] 158 μ m 輝線と CO の比の分布図。

(1) M42 中心領域

Orion θ_1 のピークを含む領域である。この領域の特徴は

- ・ [C II]、CO、FIR とも強いピークをしめす。
- ・ [C II] / FIR の比の値は中心で一番小さい。中心では0.2%、周辺では1.0%程度である。
- ・ [C II] / CO 比は平均で3300である。

(2) M42 東部領域

この領域は M42 の東部に存在する領域である。この領域の特徴は

- ・ [C II] / FIR の形状は良く似ているが CO の輻射がほとんど存在しない。
- ・ [C II] / FIR 比は一般に高く1-2%に達する。

(3) M42 南部領域

この領域は NGC1980 の南に存在する領域である。この領域の特徴は

- ・ [C II]、FIR では弱い輻射が広がっているのに対し、CO は強い輻射が存在する。
- ・ [C II] / FIR 比はこの領域全体において強く典型的に1%程度である。
- ・ [C II] / CO 比は平均で600と低い値を示す。

4.1.2 NGC2024領域

NGC2024 領域においても [C II] 158 μ m 輝線は広い広がりをもっている。遠赤外 Continuum (FIR) の NGC2024 領域における強度分布を図11に、[C II] / FIR 比の図を図12に、それぞれ示す。同様に CO の強度分布図と [C II] / CO 比の図を図13、14に示す。これらの結果から、M42領域と同様に、[C II] 158 μ m輝線とCO、FIRとの関係は局所的にかなり異なることがわかる。そこで、似た特徴を示すいくつかの領域にさらに分割する。

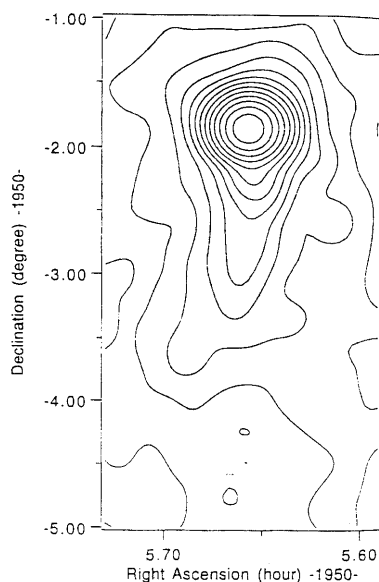


図11 NGC2024 領域の FIR 強度分布図。コントアレベル間隔は 3.2×10^{-4} 、 1×10^{-3} 、 3.2×10^{-3} 、 1×10^{-2} 、 3.2×10^{-2} 、 3.2×10^{-1} 、 1×10^{-1} 、 3.2×10^{-1} ergs s cm ster

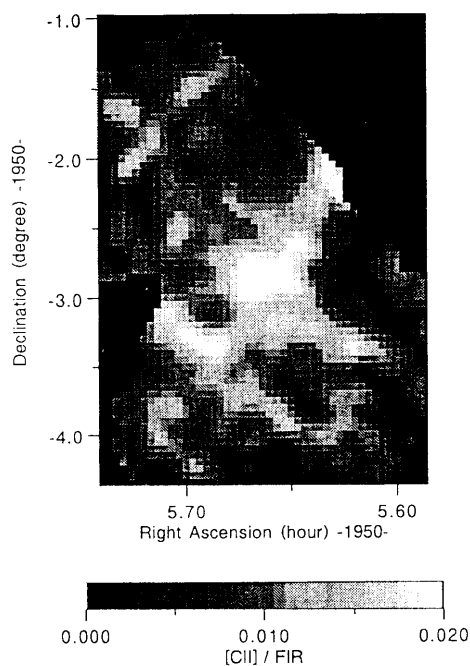


図12 NGC2024 領域の [C II] 158 μ m 輝線と FIR の比の分布図。

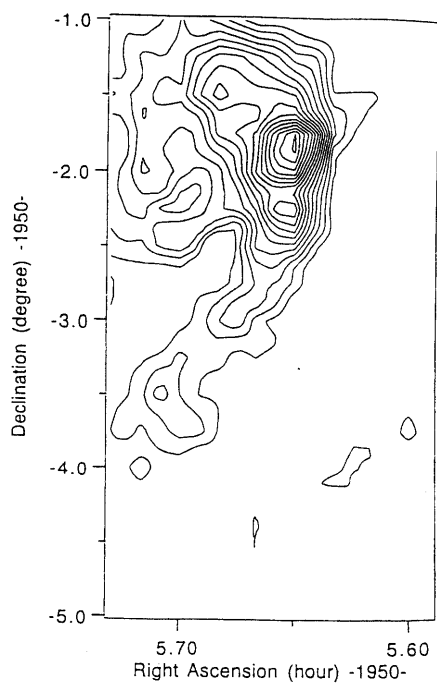


図13 NGC2024 領域の CO の強度分布図。コントアレベル間隔は $1 \times 10^{-8} \text{ ergs s cm ster}^{-1}$

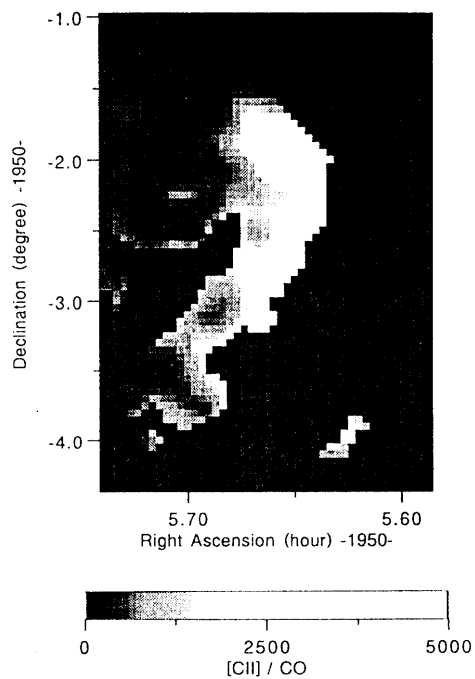


図14 NGC2024 領域の [C II] 158 μ m 輝線と CO の強度の比の分布図。

(1) NGC2024 中心領域

この領域は H II region NGC2024 を含む。この領域の特徴は

- ・ [C II]、FIR、CO とも NGC2024 で強い強度ピークをしめす。
- ・ [C II] / FIR の比は NGC2024 に近いほど低く、中心では0.1%、周辺では1.0%程度である。

(2) IC434 領域

この領域は、IC434、Horsehead Nebula を含む NGC2024 の南方にのびている。この領域の特徴は

- ・ [C II] / FIR、CO はいずれも南北に細長く伸びている。しかし、CO は西側の成分が弱い。
- ・ [C II] / FIR 比ではこの領域は非常に比が高い。値は1-2%に及ぶ。
- ・ 西側の南北にのびた領域で [C II] / CO 比が高い。

(3) NGC2024 東部領域

NGC2024の東側で弱い [C II] 158 μ m 輝線輻射が検出されている領域である。この領域の特徴は

- ・ [C II]、FIR が弱いのにたいし、CO は非常に強い。
- ・ [C II] / FIR 比は0.3-1.0%程度である。

以上の分割領域を図15に示す。

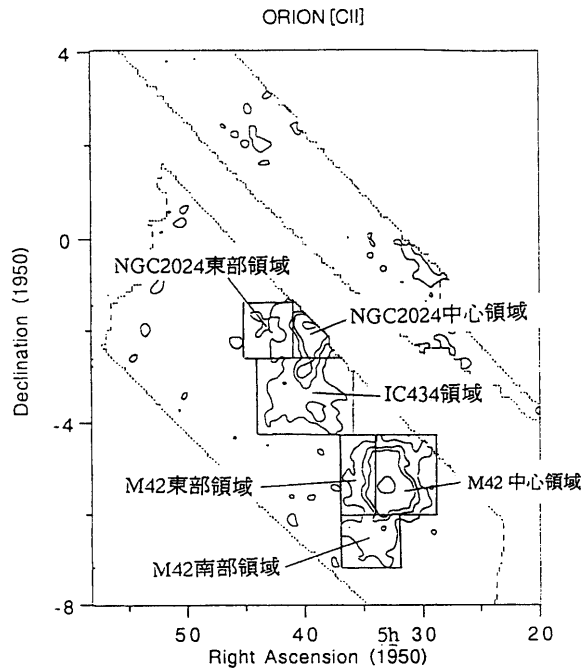


図15 オリオン領域の [C II] 158 μ m 輝線強度分布図。各領域の分割ラインを示してある。

4.1.3 Barnard's Loop

Barnard's Loop は、他の領域と非常に異なっている。

- ・ [C II] 158 μ m 輝線が Barnard's Loop に沿って帯状に存在しているのにたいして、FIR は強度が弱く、Barnard's Loop の形状を示さない。また、CO は検出が確認されていない範囲が多い。
- という特徴を示す。

4.2 [C II] 輻射の起源

今までに述べたようにオリオン領域では [C II] 158 μm 輝線が広い領域で存在していることがわかった。それでは、この [C II] 158 μm 輝線はどのようなメカニズムで輻射されているのだろうか？ここではその起源について議論する。

4.2.1 [C II] 158 μm 輝線輻射源のPDRモデルによる物理状態の推定

[C II] 158 μm 輝線の輻射にたいしては、光解離領域 (PDR; Photo Dissociation Region) 起源のものについて、種々のモデル計算が行われている。Tielens & Hollenbach は一様密度で、一次元の無限の深さをもつ雲について、熱平衡と化学平衡を解いて cooling に重要な役割を果たすいくつかの重元素のラインの強度を密度 n_0 、紫外光の強度 G_0 の関数として計算した。(Tielens & Hollenbach 1985, Hollenbach, Takahashi & Tielens 1991) また、これをもとにして、Wolfire らは、[C II] / FIR と CO / FIR の値を n_0 の関数として表示した。(Wolfire et al. 1989) その図を、図16に示す。

オリオン領域での [C II] / FIR と CO / FIR の相関図を図17に示す。この図では、FIRがバックグラウンド領域のピーク強度 $7 \times 10^{-4} \text{ ergs s cm}^{-2} \text{ ster}^{-1}$ 以下であるときは、その領域での [C II] 放射の値が信頼できないため表示していない。

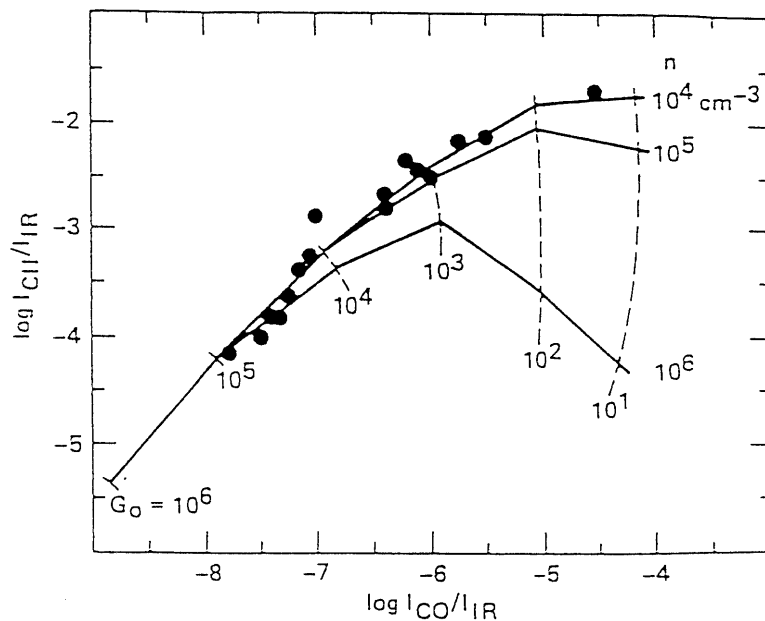


図16 [C II] / FIR と CO / FIR の相関図。紫外光強度 G_0 を点線で水素の数密度 n を実線で示している。Wolfire et al.(1989)による。

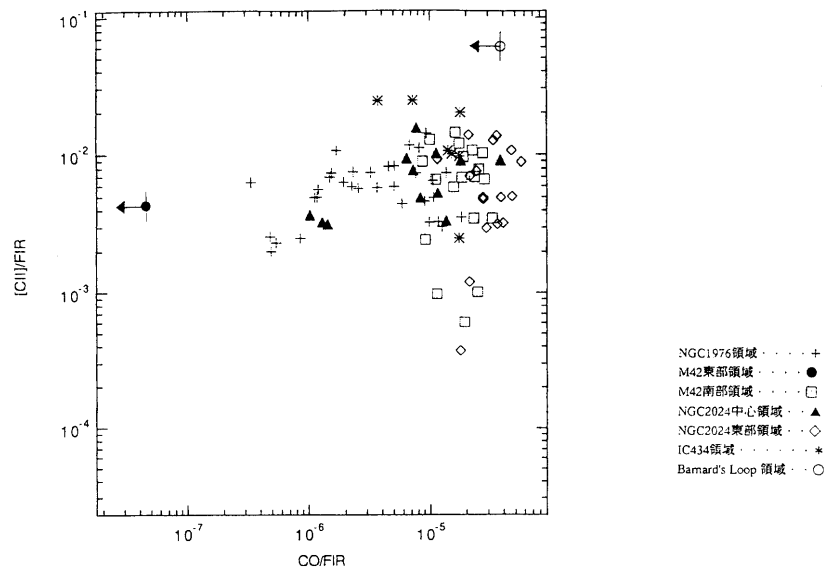


図17 [C II] / FIR と CO / FIR の相関図。領域ごとに違う印を使用してプロットしている。M42東部領域とBarnard's Loop 領域では、[C II] / CO の比の値は上限を示している。

以下このモデルに基づいて議論する。この二つの図を見比べるとオリオン領域においては、従来の観測ではとられなかった様々な密度、紫外光強度を持つ領域から [C II] 158 μ m 輝線が放射されていることがわかる。とりわけ特徴的なのは、紫外光強度が比較的弱い ($G_0 \sim 10 - 100$) 領域からの放射が検出されていることである。オリオン領域の個々の領域の放射がどのような物理状態を持つ領域に相当するかを以下に議論する。

4.2.2 M42 領域

(1) M42 中心領域

図17によれば、この領域は高密度 ($> 10^4 \text{ cm}^{-3}$)、強紫外光強度 ($G_0 \sim 10^3$) を持つ領域に相当する。これは、この領域が活発な星形成領域であり、Compact H II region が存在することと一致する。

また、この領域で [C II] / FIR の比が中心部で低下することは、高密度、強紫外光強度の領域では、Cooling に [C II] 158 μ m 輝線が占める割合が低下することと、星間塵の電離により、Photo Electric Heating の効率がおちることと一致する結果である。したがって、この [C II] 158 μ m 輝線放射は高密度、強紫外光強度の PDR が起源と考えられる。

それでは、この領域の Heating Source は何が担っているのだろうか？ Stacey らはこの領域の [C II] 158 μ m 輝線放射は θ_1 によると主張している。(Stacey et al.1991)そして、放射の広がりにはCloudがClumpyな構造をしていることにより説明できるとしている。

しかし、我々の観測において、[C II] 158 μ m 輝線はStacey達の観測領域に比べ広がっていることが確かめられた。ここで、 θ_1 の放射する遠紫外光がどのぐらい広がりうるか簡単に見積もってみる。水素密度は一律で 10^4 cm^{-3} 、また、遠紫外波長域での光学的深さは可視域の光学的深さの $1/1.8$ 倍とする。すると、遠紫外波長域での光学的深さが3になるのに必要な距離は、0.11pc、角度にして $0.8'$ である。[C II] 158 μ m 輝線の広がりには明らかに 1° を超えている。したがって、光学的深さが3になるのに必要な距離に比べ、二桁も大きい領域から [C II] 158 μ m 輝線放射が出ていることになる。このことから、この領域の [C II] 放射は θ_1 以外の Heating Source からの寄与がある可能性が強い。

(2) M42 東部領域

この領域では、CO が検出されない領域で広範囲にわたって [C II] 158 μ m 輝線輻射が検出されている。図17において、この領域の [C II] / FIR と CO / FIR の両者の関係を満たす n_0 、 G_0 は Wolfire et al. (1990) のモデルでは存在しえない。したがって、この領域の [C II] 158 μ m 輝線輻射の起源は一次元、一様密度、無限の深さの光解離領域 PDR ではない。

それでは、この領域の [C II] 158 μ m 輝線輻射の起源はなんだろうか？この領域では、[C II] / FIR 比と、[C II] / CO 比がともに高い場所が南北方向に帯状に続いている。このことから、北東部に Heating Source が存在して、分子雲を照らしている部分のエッジ上に見えており、より Heating Source に近い部分では、CO が解離されて C のみになっていると解釈できる可能性がある。

(3) M42 南部領域

この領域の [C II] 158 μ m 輝線の強度分布はなだらかであり、特定の heating source の寄与を明確には示さない。この領域は図17によると、紫外光強度が低い (\sim 数+ G_0) 領域である事がわかる。したがってこの領域では一般の星間紫外光によって暖められた分子雲が [C II] 158 μ m 輝線輻射をおこしていると考えるのが自然である。しかしこれだけの紫外光が分子雲のなかに入り込んでいるのかどうかは判断できない。

4.2.3 NGC2024 領域

(1) NGC2024 中心領域

この領域は、[C II]、CO、FIR とともに強いピークをもつことや、[C II] / FIR 比が強度が強くなる中心にむかって落ち込むことなどM42中心領域と共通点がある。さらに、図17からこの領域は高密度 ($>10^4 \text{ cm}^{-3}$)、強紫外光強度 ($G_0 \sim 10^3$) をもつ。したがって、M42 中心領域と同様に、中心部は Compact H II region で、周囲はその励起星からの遠紫外光に暖められていると考えられる。

(2) IC434 領域

図17から、この [C II] 158 μ m 輝線は密度が 10^4 cm^{-3} 、紫外光強度 (G_0) が100程度の PDR 起源と考えたと説明できる。

IC434 の励起星は、西側にある 48σ Ori である。この星からくる遠紫外光によってこの領域の [C II] 158 μ m 輝線輻射が起こっていると考えられる。この領域の西側で CO に比べ、[C II] の方が広がっている。これは西側に heating source が存在し、CO が解離されて [C II] 158 μ m 輝線の輻射のみが観測されているとすると、説明できる。

(3) NGC2024 東部領域

図17から、高密度 ($10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$) で、低い紫外光強度 (10–100) の PDR 起源の [C II] 158 μ m 輝線輻射と説明できる。M42 南部領域と同様、一般の星間紫外光に、分子雲が照らされていると考えられる。

4.2.4 Barnard's Loop 領域

図17において、一次元無限PDRモデルではこの輻射を説明できる n_0 、 G_0 の値の組は存在しない。

[C II] 158 μ m 輝線輻射の起源として可能性があるのは、Diffuse な H II 領域である WIM (Warm Ionized Medium) と、HI雲である。しかし、WIM からの放射である $H\beta$ は、HI雲からの放射である HI に比べ Barnard's Loop で見られる [C II] 158 μ m 輝線放射との空間的な相関が良い。そこで、WIM からの放射と

して、[C II] 158 μ m 輝線放射が説明できるかを見積もる。Barnard's Loop 領域では、完全電離をしており、電子密度 n_e は、臨界密度 ($n_e^{\text{crit}} = 35 \text{ cm}^{-3}$) より十分小さいと仮定する。すると、[C II] 158 μ m 輝線放射は

$$I[\text{C II}] = 4.1 \times 10^{-26} \times \text{EM} [\text{ergs s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{ster}^{-1}]$$

となる。EMは emission measure (cm^{-5}) である。この式から Barnard's Loop での WIM による [C II] 158 μ m 輝線放射の値を求める。[C II] の強度は $4 \times 10^{-4} \text{ ergs s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{ster}^{-1}$ となった。EMの値は Reich (1978) の電波 Continuum の観測から求めた。

したがって、WIM からの [C II] 158 μ m 輝線放射と考えて説明できることがわかる。

5. 結論

1. 気球搭載望遠鏡 BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) を用いて、太陽系に最も近い大質量星の星形成領域であるオリオン領域の [C II] 158 μ m 輝線サーベイ観測に成功した。観測領域はこれまでの数百倍に及ぶ。

2. オリオン領域には、広く [C II] 158 μ m 輝線放射が存在することが明らかになった。[C II] 158 μ m 輝線放射は次の3つのH II領域に付随した領域で顕著にみられた。

- (1) M42 領域…赤経 5h35m、赤緯-5° (1950) 付近に $2^\circ \times 3^\circ$ の範囲に広がっている。
- (2) NGC2024 領域…赤経 5h40m、赤緯-2° (1950) 付近に $1.3^\circ \times 3^\circ$ の範囲に広がっている。
- (3) Barnard's Loop 領域…Barnard's Loop に沿って帯状に伸びている。

3. オリオン領域の [C II] 158 μ m 輝線の起源は場所によって異なることが明らかになった。

Wolfire et al.(1990) のモデルを用いて放射の起源を説明することを試みた。結果は以下のとおりである。

(1) M42 領域

(1-1) M42 中心領域…高密度 ($>10^4 \text{ cm}^{-3}$)、強紫外光 ($\sim 10^3$) の PDR 起源。

(1-2) M42 東部領域…モデルでは説明不可。CO が完全解離されている領域からの [C II] 158 μ m 輝線放射である可能性がある。

(1-3) M42 南部領域…高密度 ($10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-3}$)、弱紫外光 (10–100) の PDR 起源。

(2) NGC2024 領域

(2-1) NGC2024 中心領域…高密度 ($>10^4 \text{ cm}^{-3}$)、強紫外光 ($\sim 10^3$) の PDR 起源。

(2-2) IC434 領域…高密度 ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$)、弱紫外光 (10–100) の PDR 起源で説明できる。

(2-3) NGC2024 東部領域…高密度 ($10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$)、弱紫外光 (10–100) の PDR 起源。

(3) Barnard's Loop 領域

…PDR モデルでは説明不可。おそらく WIM 起源と考えられる。

4. 今回の観測によって、今まで確実に検出されていなかった、高密度で紫外光が弱い領域 (M42 南部領域、IC434 領域、NGC2024 東部領域) と PDR 起源ではない [C II] 放射をとまなう領域 (Barnard's Loop 領域) の検出に成功した。

参考文献

- Becklin, E. E. & Neugebauer, G. 1967, ApJ, 147, 799
- Blaauw, A. 1964, ARA & A, 2, 213
- Cowie, L. L., Songaila, A., & York, D.G. 1979, ApJ, 230, 469
- Genzel, R. & Stutzki, J. 1989, ARA & A, 27, 41
- Helou, G., Khan, I.R., Malek, L., & Boehmer, L. 1988, ApJS, 68, 151
- Hollenbach, D.J., Takahashi, T., & Tielens, A.G.G.M. 1991, ApJ, 377, 192
- Kleinmann, D.E. & Low, F.J. 1967, ApJ, 149, L1
- Maddalena, R.J., Moeis, M., Moscowitz, J., & Thaddeus, P. 1986, ApJ, 303, 375
- Matsuhara, H., et al. 1989, ApJ, 339, L67
- Nakagawa, T., Okuda, H., Shibai, H., Matsuhara, H., Kobayashi, Y., Hiromoto, N. 1990, SPIE, 1235, 97
- Redch, W. 1978, A & A, 64, 407
- Stacey, G.J., Jaffe, D.T., Geis, N., Genzel, R., Harris, A.I., Poglitsch, A., Stutzki, J., & Townes, C.H. 1993, ApJ, 404, 219
- Tielens, A.G.G.M., & Hollenbach, D. 1985, ApJ, 291, 722
- Wolfire, M.G., Tielens, A.G.G.M., & Hollenbach, D. 1990, ApJ, 358, 116