

風に吹かれて

—気球搭載望遠鏡による遠赤外 [CII] 線サーベイ観測—

中川 貴雄

宇宙科学研究所 〒229 神奈川県相模原市由野台 3-1-1

e-mail: nakagawa@astro.isas.ac.jp

遠赤外 [CII] スペクトル線は、中性星間ガスのエネルギー収支に最も重要な役割を果たすスペクトル線です。私たちは、気球搭載の [CII] 専用観測器 BICE を開発し、これを用いて [CII] スペクトル線の大規模サーベイ観測を行ってきました。その結果、光解離領域に代表される「温かな星間ガス」の様々な存在形態が明らかになってきました。

1. はじめに

1.1 星間ガスの加熱と冷却

宇宙の空間の大半は、星間ガスによって占められています。その星間ガスは、星と相互作用をしながら、銀河系全体にわたる複雑な生態系を形成しています。この生態系の理解の鍵を握るのは、星間ガスのエネルギー収支と化学進化の解明です。

星間ガスの質量の大半を占める中性ガスのエネルギー収支についてここでは考えてみます。その加熱源として、ライマン限界以下のエネルギーの光子を考えます。これらの光子は、星間ガスを直接暖めることができません。星間塵を介した複雑な経路でガスを暖めます(図1)。こうして暖められた星間ガスは、主にスペクトル線の放出によって冷却されます。スペクトル線の中で最も明るく、星間ガスの冷却に有効に働いて

いるのが、電離炭素(C⁺)の放射する遠赤外[CII] スペクトル線($^2P_{3/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$, 波長 157.7409 μm)です。その明るさは、たとえばミリ波 CO(J=1-0) 線に比べると、1000 倍以上と見積られています。したがって、星間雲のエネルギー収支の解明には、このスペクトル線の観測は欠かすことができません。

1.2 光解離領域

[CII] スペクトル線の観測と密接に関連している領域に、「光解離領域」があります。この名前は分子が光解離されている領域のことを指していますが、最近ではもう少し広く、「星間ガスの物理や化学が、紫外光によって大きく影響を受ける領域」

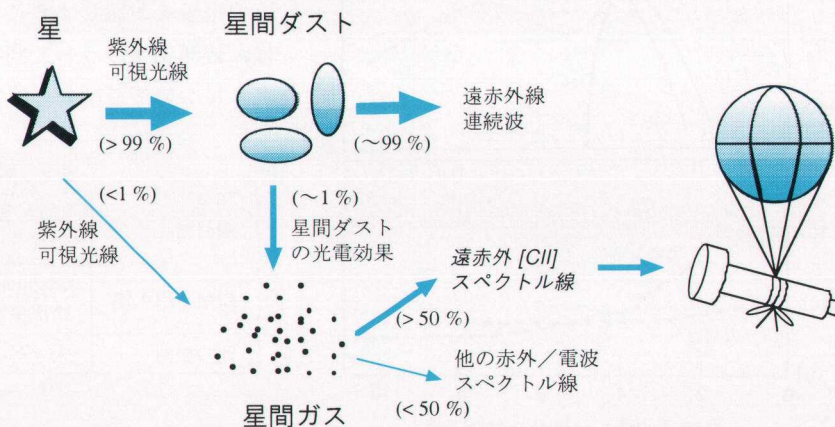


図1 中性星間雲の加熱と冷却機構

という意味で使われています。

光解離領域の代表的な構造を図2に示します¹⁾。光解離領域のなかでは、紫外光の染み込み方によって、化学組成が変化します。光解離領域の表面では、炭素は一般に炭素イオン (C⁺) になっていますが、光解離領域の中に進み、紫外光が減衰していくにしたがって、中性炭素 (C) や一酸化炭素分子 (CO) になります。また、ガスは上記のように星間塵を介して暖められますが、紫外光の強い表面近くでは、塵よりガスがはるかに高温になります。この様な領域からは [C II] スペクトル線が効率的に放射されることが期待されます。

さて、上記の定義に基づくと、HI雲の大半は光解離領域です。また、分子雲でも紫外光の入り込んでいる部分は光解離領域です。すなわち、星間ガスのかなりの部分は実は光解離領域なのです。

1.3 今までの観測

このように星間ガスの理解にとって欠かせない [C II] スペクトル線なのですが、その強度を広い範囲にわたって観測することは、地上観測が不可能でもあり、非常に困難です。空間的に広がった [C II] スペクトル線の先駆的な観測は、私達のグループによって汎用の気球搭載赤外線望遠鏡 BIRT を用いて行われましたが、領域は限られて

いました²⁾。また最近になって、COBE 衛星が、[C II] スペクトル線の全天観測を行いました³⁾、その空間分解能は7度と大変に悪いものでした。

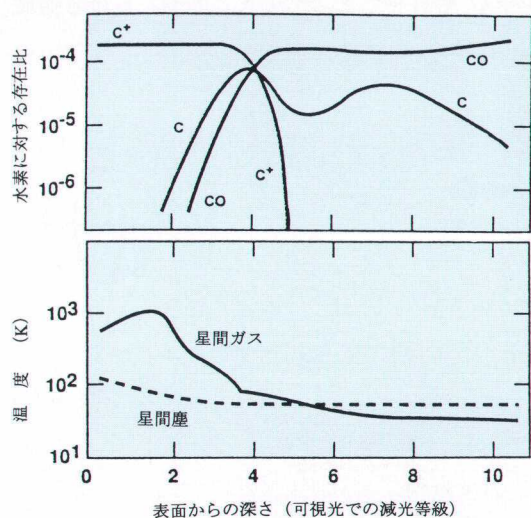
私達は、[C II] スペクトル線のサーベイ観測に最適化した気球搭載観測器を用いて、高感度でかつ広領域に渡る完全なサーベイ観測を行うことを計画しました。紫外光の影響を受けながら刻々と変化していく星間ガスの生態系を、[C II] スペクトル線の観測を軸に大局的にとらえたいということが私達の目的です。

2. 観 測

[C II] サーベイ観測専用私達が開発したのが、BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) と呼ばれるシステムです⁴⁾。BICE の空間分解能は15'です。BICE の最大の特徴は、観測目的を [C II] サーベイ観測に限定することにより、観測効率を極めて高くしたことです。

BICE による観測実験を、様々な気球基地から行いました。1990年と1994年には三陸大気球観測所から、1991年には米国テキサス州の NSBF (National Scientific Balloon Facility) より、1992年にはオーストラリア北部準州アリススプリングス気球基地から、それぞれ気球放球を行いました。

その結果、表1に示すような様々な天体を観測することができました。限られた紙面ではとてもその全貌をお話しすることはできません。以下では、観測結果のうちで興味深いいくつかのトピックスについてご紹介します。



表面からの深さ (可視光での減光等級)

図2 光解離領域の構造

表1：観測領域

銀河面	25° < 銀経 < 60° 銀緯 ±3°~4°
銀河系内天体	Cygnus-X 領域, ρ Ophiuchi 暗黒星雲, オリオン領域
他の銀河	大マゼラン雲

3. 埋もれた B 型星

- ρ Ophiuchi 暗黒星雲-

電波の連続波の熱的成分や水素の再結合線の強度分布は、水素の電離ポテンシャル (13.6 eV) よりもエネルギーの高い紫外線の分布を表します。一方、[C II] スペクトル線の放出には、炭素の電離ポテンシャル (11.3 eV) よりもエネルギーの高い紫外線があれば十分です。したがって、その両者の比は、「星間放射場のスペクトル」という重要なパラメータを反映するはずで

す。星間放射場のスペクトルが、狭い領域内でも大きく変わっている例が、実際に私達の観測で検出されました。 ρ Ophiuchi 暗黒星雲です⁵⁾。

図 3a に、BICE によって観測された ρ Ophiuchi 暗黒星雲での [C II] 輝線分布を示します。HII 領域の分布を示す 2.3 GHz の電波連続波の分布を図 3b に、分子雲の分布を示す CO 輝線の分布を図 3c にあわせて示します。これらの分布は、お互いに大きく異なっています。

まず、分子雲の存在を表す CO 輝線が強く検出されているピークでは、[C II] スペクトル線も強く検出されていますが、電波連続波はほとんど検出されていません。 ρ Ophiuchi 暗黒星雲は活発な星生成領域です。ただし、そこでは O 型星は生まれておらず、最も早期型星でも B 型星です。この CO ピークの領域には、実は三つの B 型星 (HD 147889, S-1, SR 3) が埋もれていることがわかっています (図 3a)。したがって濃密な分子雲を、埋もれた B 型星が照らして光解離領域を形成し、そこから強い [C II] 輝線が放出されているものと思われます。ただし、励起星が B 型星であったために、水素が電離されず、H II 領域を伴わない [C II] 領域として観測されたのです。

さて、[C II] スペクトル線には、CO ピーク以外にも西南に伸びた成分が見られます。この成分は可視星である σ Sco によって励起されているものと思われます。 σ Sco は、この領域内では最も早

期型の星であり、小さいながらも H II 領域を形成しています (図 3b)、一方、CO はここからはほとんど検出されていません (図 3c)。したがって、分子雲はここではほとんど完全に光解離されているようです。

このように、 ρ Ophiuchi 暗黒星雲では、星間放射場のスペクトルの局所的な変化が、[C II] スペクトル線と他波長との観測との比較によって、はっきりとあらわれました。

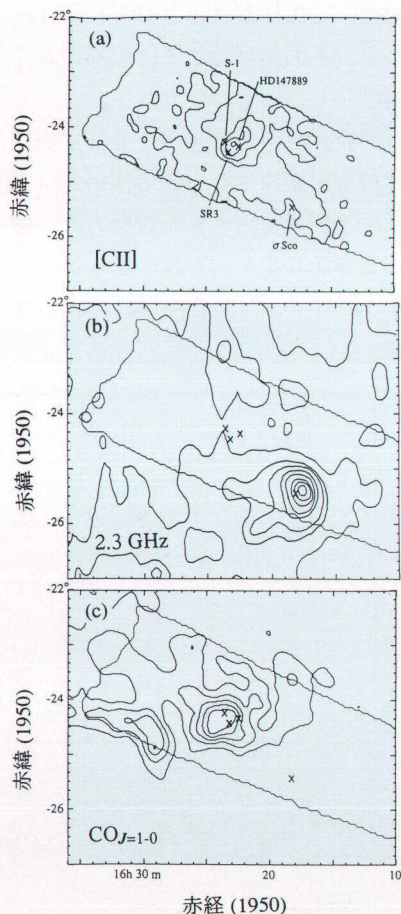


図 3 ρ Ophiuchi 暗黒星雲⁵⁾。細い実線は、遠赤外 [C II] スペクトル線の観測の範囲を示します。また×印は、[C II] スペクトル線の励起に関与していると思われる B 型星の位置を表します。(a) [C II] スペクトル線、(b) 電波連続波、(c) CO スペクトル線。

4. ソフトな輻射場-銀河中心-

4.1 異常に弱い [C II] スペクトル線

[C II] スペクトル線と遠赤外連続波の空間分布とは、一般には、お互いに変異により相関を示しますが、一箇所だけはっきりと異なった分布を示した領域がありました。銀河中心です (表紙と図4)⁶⁾。

図4aに[C II] スペクトル線の強度の銀経分布を、図4bに遠赤外連続波の強度の銀経分布を、図4cにその両者の比を、それぞれ示します。銀河中心方向では、この比ははっきりとした「へこみ」を示します。その領域は広く、銀河中心をはさんで±数百パーセクにもわたります。

遠赤外連続波は全エネルギーをほぼ表すため、遠赤外連続波が銀河中心方向で強い (図4b) ということは、星間輻射場もまた銀河方向で強くなっていることを示します。それにもかかわらず、[C II] 輝線は銀河中心方向で相対的に弱くなっているのです。

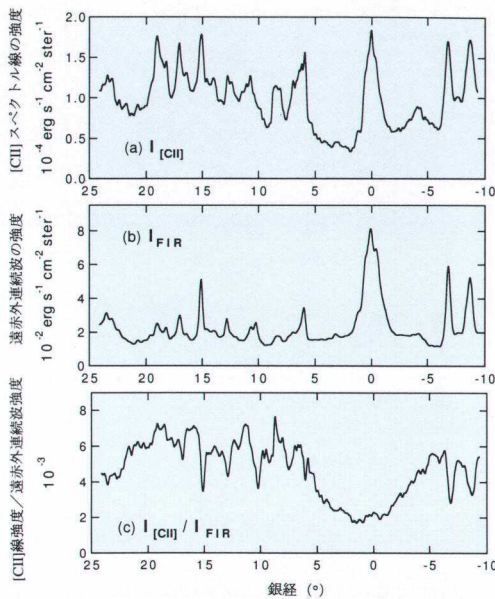


図4 (a) [C II] スペクトル線強度の銀経分布。
(b) 遠赤外連続波強度の銀経分布。
(c) [C II] スペクトル線強度の遠赤外連続波強度に対する比の銀経分布。

4.2 ソフトな輻射場

銀河中心 500 パーセクには、全銀河系の分子ガスの約 1 割にも相当する 10^8 太陽質量の分子ガスが存在すると見積られています。さらに銀河中心の分子ガスは、平均して数密度 $\sim 10^4 \text{cm}^{-3}$ 、温度 $\sim 70 \text{K}$ と、銀河ディスクの分子ガス (数密度 $\sim 10^{2.5} \text{cm}^{-3}$ 、温度 $\sim 15 \text{K}$) よりもはるかに高密度・高温です。

一方、銀河中心では、星形成活動の一般的な指標 (超新星残骸や H_2O メーザー) が比較的少ししか見つかっていません。そのため、高密度の分子ガスが大量に存在するにもかかわらず、分子ガスの単位質量あたりの星形成率は、銀河ディスクよりもむしろ低いのではないかとされています。

一般的な銀河ディスクでは、星間輻射場は若い OB 型星からの放射によるものが主と考えられています。しかし、銀河中心では、現在の星形成率が低いにもかかわらず、星間輻射場が強いのですから、若い星の星間輻射場への寄与は比較的小さく、むしろ晩期型星の寄与が大きいのではないかと考えられます。

CO を光解離して C を作ったり、C を電離して C^+ イオンを作るには、約 11 eV 以上のエネルギーを持つ光子が必要です。星間輻射場のかなりが晩期型星からの放射によるものであるとすると、星間輻射場の中の 11 eV 以上の光子の割合が減ってしまう (輻射場のスペクトルがソフトになる) はずですが、したがって、星間輻射場が豊富にあるにもかかわらず、 C^+ イオンが作られる割合は減少し、[C II] スペクトル線が弱くなると、私達は考えました。

4.3 温かな分子雲

星間輻射場がソフトになると、星間ガスにはもうひとつ新たな影響があります。一般に、光解離領域でどこまで紫外線がしみこむかは、星間塵の吸収によって決められます。しかし、星間輻射場、特に電離・解離光子が弱くなると、星間塵の吸収ではなく、分子の自己吸収によって光解離光子の

しみこむ深さが決められてしまいます。

分子の自己吸収が効くと、分子雲にも影響が出ます。前述のように、光解離領域のガスの温度は、紫外線の影響を受けて、表面ほど高くなっています(図2)。したがって、どこでC⁺/C/COの遷移が起こるかによって、その遷移域でのガスの温度が変わります。光解離領域分子の自己吸収によってC⁺/C/COの遷移領域の深さが決まる場合には、その深さは相対的に表面に近づくため、遷移領域でのガスの温度は上がることになります。

星間輻射場のスペクトルの変化にともない、C⁺/C/CO遷移領域のガスの温度がどのように変化をするかを、図5に示します。星間輻射場がソフトになると(有効温度が低くなると)、遷移領域のガス温度としては、むしろ高くなっています。分子の自己吸収が支配的な場合は、解離光子だけが先に消費されるため、一般的な輻射場が比較的まだ強いところでC⁺/C/CO遷移がおきます。そのため、星間輻射場がソフトになると、分子雲の表面のC領域やCO領域でのガス温度は逆に上がってしまうのです。

全く独立の話であった「銀河中心での弱い[C II]スペクトル線」と「銀河中心での温かい分子雲」とが、このようにして「ソフトな星間輻射場」というひとつのパラメータで統一的に説明されたのです。銀河中心において分子ガスを高温に暖めるメカニズムは、様々な活動的なメカニズムが今ま

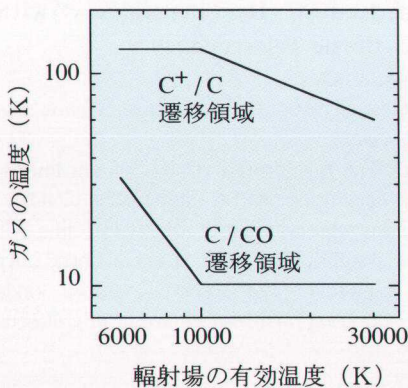


図5 輻射場の有効温度とガスの温度との関係

で提案されてきましたが、私達はこの「ソフトな星間輻射場」という機構が、分子ガスを暖める機構として大変に重要であると考えています。

5. 重元素存在比の影響-大マゼラン雲-

一般に紫外光はほとんど塵粒子に吸収されます。したがって、塵粒子/ガスの質量比が変化すると、星間物質と紫外光の相互作用のしかたは、大きく変わるはずですが、この影響を調べる対象として、私達は大マゼラン雲を選びました。

大マゼラン雲は、水素に対する重元素の存在比が、私達の銀河系での値よりもかなり低いという重要な性質を持っています。例えば、炭素/水素存在比は、銀河系のわずか1/4です。さらに塵粒子は重元素から構成されていますから、このように重元素比が低くなると、同時に塵粒子/ガスの質量比もまた小さくなります。すると紫外光が、塵粒子に吸収されにくくなり、星間雲のより奥まで染み込みようになり、星間ガスは紫外線の影響をより多く受けるようになるはずですが、

私達は、大マゼラン雲のほぼ全域から強い[C II]スペクトル線を検出しました⁷⁾。大マゼラン雲の観測で最も重要な点は、銀河全体にわたって[C II]スペクトル線がミリ波CO輝線に比べて相対的に強いということです(図6)。大マゼラン雲での[C II]/CO強度比は、銀河系での値よりも、約一桁も(!)大きな値を示しているのです。

C⁺/C/CO遷移領域の深さは、多くの場合には塵粒子による紫外光の減衰によって決定されています。したがって、大マゼラン雲のように塵粒子の相対存在比が小さきところでは、紫外光が星間雲の奥深くまで染み込むことができ、光解離領域が大きくなります。簡単のために、星間雲が有限の大きさを持つ球であるとすると、光解離領域が大きくなるとその割合で分子雲が小さくなります(図7)。このため分子雲を反映するミリ波CO輝線に対して、光解離領域を反映する[C II]スペクトル線の強度が、相対的に強まると考えられます。

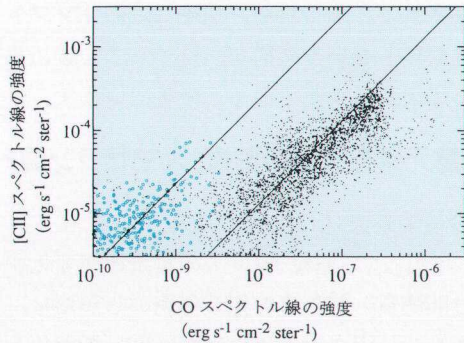


図6 [C II] スペクトル線強度とCO スペクトル線との関係。青丸が大マゼラン雲のデータ，黒点が私達の銀河系のデータ。

両銀河での雲の典型的な大きさが共通で、 10^{22} cm^{-2} 程度の柱密度を持っていると仮定すれば、観測された一桁の相対強度の差を説明することができることがわかりました。

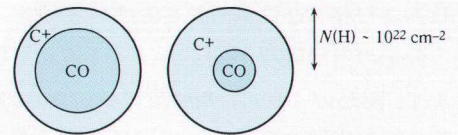
私達の [C II] 輝線の観測により、銀河全体のスケールでみても、重元素の存在比の違いにより、このように星間雲の性質に系統的な差が生まれうるということが明らかになったのです。

6. 最後 に

世界中の気球基地に出かけ、風に吹かれるままに、気球による観測実験を行ってきました。

実際の観測にあたっては、様々なことがありました。気球がどうしても高度をあげなかったり、観測器が突然気球から切り離されて落ちてきたり、姿勢制御ができないまま一晩無駄なコマンドをうち続けたり……。しかし、その都度、海や牧場や砂漠の中へ、漁船や四輪駆動車やヘリコプターを使って出かけ、観測器を回収し、壊れたところを修理し、再び観測に挑みました。そして最終的には様々な観測を行うことができ、興味深いトピックスをいくつも見つけることができました。

しかし、様々なトピックスを総合し、「刻々と変化しつつある星間雲の生態系を大局的に明らかにする」という当初の目標に関しては、未だ道半ばというところ です。



銀河系の星間雲 大マゼラン雲の星間雲

図7 星間雲の構造

謝 辞

[C II] 線観測およびその観測器開発に関して、私は今回、研究奨励賞をいただきました。ありがとうございます。この研究は、宇宙研 BICE グループの共同研究です。その意味では、今回の受賞は、私達 BICE グループの受賞でもあります。

なお、この観測の一部は、米国アリゾナ大学スチュワード天文台との共同実験です。また、この観測で用いている検出器は、郵政省通信総合研究所との共同開発によるものです。さらに BICE の開発にあたっては、宇宙科学研究所気球工学グループの全面的な支援を受けました。支援を受けた全ての人々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Tielens A. G. G. M., Hollenbach D. 1985, ApJ 291, 722
- 2) Shibai H. et al. 1991, ApJ 374, 522
- 3) Bennett C. et al. 1994, ApJ 434, 587
- 4) 中川貴雄 1995, 天文月報 88, 221
- 5) Yui Y. Y. et al. 1993, ApJ 419, L37
- 6) Nakagawa T. et al. 1995, ApJ in print
- 7) Mochizuki K. et al. 1994, ApJ 430, L37

Far-Infrared [C II] Line Survey with a Balloon-Borne Telescope.

Takao NAKAGAWA

The Institute of Space & Astronautical Science, Sagami-hara, Kanagawa.

Abstract: The far-infrared [C II] $158 \mu\text{m}$ line is the dominant coolant of neutral interstellar clouds. We made survey observations of the [C II] line with a dedicated system called BICE (Balloon-borne Infrared Carbon Explorer). We observed various kinds of objects. Observational results are briefly discussed.