



遠赤外 [C II] 輝線の熱的なふるまい

望月賢治

〈文部省宇宙科学研究所赤外線天体物理部門 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: mochi@astro.isas.ac.jp

中性星間ガスから放射される [C II] 158 ミクロン輝線の遠赤外連続波に対する強度比は、銀河面でひろくほぼ一定です。これは、ガス/ダストの加熱比がほぼ一定で、ガスの冷却を [C II] 輝線が支配していることを示しています。銀河面の典型的値と比較して、大質量の早期型星周辺では小さな強度比が観測されます。この小さな比を作っている要因を特定するには、宇宙科学研究所の新しい気球実験が有効でしょう。

1. [C II] 158 ミクロン輝線

星間ガス中にある炭素の一階電離イオンは、基底状態に、電子の軌道-スピン角運動量相互作用に起因する微細構造をもちます。ガス中の水素分子などと衝突することでこの準位が励起されると、自発放射によって波長 158 ミクロンの光子を出します。この光子がガス雲から外に出ると、ガス粒子がもつ運動エネルギーを外に持ち出し、結果としてガスを冷却します。この輝線は、一般の渦巻銀河中で、水素が電離していない電氣的に中性の星間ガス冷却を支配します¹⁾。

[C II] 輝線の観測は、よく、光解離領域モデルとよばれる一群の数値シミュレーション^{2), 3)}と比較されます。このモデルは、分子雲の内部で、熱収支と化学平衡を位置の関数として同時に解くところに特徴があります。熱収支を考慮することは、冷却を支配する輝線の強度を考えるには不可欠なはずですが、しかし、観測を数値計算と比較した論文では化学面に焦点をあてたものが多く、[C II] 輝線の熱的なふるまいを正しく議論した例はあまりありません。これは、初期の [C II] 輝線の観測が、明るい早期型星のごく近傍、[C II] 輝線が熱収支に影響を及ぼさないような領域に集中していたためでしょう。

現在ではさまざまな物理状態の星間物質から遠赤外輝線が観測されていて、その多くの場面で [C II] 輝線が熱収支に重要な役割を担っています。ですから、これからの解析は以前より熱収支に重きをおく必要があります。本稿では、[C II] 輝線の熱的なふるまいに注目して、かんたんな近似を用いて概観します。

定常状態にある星間ガスから放射される輝線の放射率（単位体積単位時間あたり、輝線として出るエネルギー） E は、二つの変数を用いて記述できます。ひとつはガスの加熱率（単位体積単位時間あたり、ガスに供給されるエネルギー） Γ_{gas} 、もうひとつはガスを加熱したエネルギーのうち注目している輝線が持ち出す割合 f です。

$$E = f \Gamma_{\text{gas}} \quad (1)$$

この輝線が冷却を支配していれば近似的に $f = 1$ ですから、輝線の強度は Γ_{gas} さえ決まればわかります。

ガスの密度は？ 光学的厚みは？ 輝線を放射する粒子の存在量は？ そして温度は？……そうした変数は、 Γ_{gas} が定めれば、熱収支を支配する輝線に着目している限り考える必要がありません。なぜなら、与えられた環境のもとで式 (1) を満たす

ように、その輝線が自分で温度を調節するからです。そこが [C II] のような輝線のおもしろいところです。

2. 気球望遠鏡 BICE の成果

宇宙科学研究所の気球望遠鏡 BICE (the Balloon-borne Infrared Carbon Explorer) は、銀河面にひろがった [C II] 輝線を、15' の角分解能でひろく観測しました⁴⁾。この観測の最大の成果は、[C II] 輝線と遠赤外連続波の強度比が、ほとんどの領域でほぼ一定であることを示したことです。遠赤外連続波の放射率 $E_{\text{FIR cont}}$ は、中性星間物質中のダストの加熱率 Γ_{dust} に相当します。銀河面ではほぼ一定の輝線／連続波強度比は、一般に [C II] 輝線が中性星間ガスの冷却を支配している (およそ $f_{[\text{C II}]} = 1$) ことと、ガス／ダストの加熱率比

$$\frac{\Gamma_{\text{gas}}}{\Gamma_{\text{dust}}} = \frac{E_{[\text{C II}]} / f_{[\text{C II}]}}{E_{\text{FIR cont}}} \quad (2)$$

がひろく一定であることを示しています。

ガスとダストの加熱は、物理的に深く結びついています。ダストは、星からの光子を吸収して暖まります。このとき、光電効果によって、ある確率でダストから電子が飛び出します。この電子が周囲のガス粒子と衝突することで運動エネルギーを分配し、ガスを加熱します。中性星間ガスは、分子雲の中心部でない限り、ほとんどこの効果で加熱されます。ですから、ガス／ダストの加熱率比は、ダストが吸収した光子のエネルギーを電子が持ち出す割合 ϵ に等しく、式 (2) から、

$$\epsilon = \frac{E_{[\text{C II}]} / f_{[\text{C II}]}}{E_{\text{FIR cont}}} \quad (3)$$

となります。一定の遠赤外 [C II]／連続波強度比は、[C II] 輝線がガス冷却を支配していれば、ひとつの微視的な変数 ϵ がほぼ一定であることで実現されるのです。

3. 小さな輝線／連続波強度比

BICE の銀河面サーベイでは、遠赤外 [C II]／連続波強度比がほぼ一定のひろがった成分に加えて、ところどころに比が小さい領域が見られます。こうした領域は明るい早期型星の近傍で、分子雲が強い紫外光にさらされています。このような環境で強度比が小さくなる理由として、以下にあげる 2 つが考えられています。

3.1 [O I] 輝線によるガス冷却

遠赤外域の観測としては高い 1' 程度の角分解能で、これまでもっとも広く [C II] 輝線の分布が描かれたのは、オリオン星雲周辺⁵⁾です。早期型星トラペジウムを中心にもっているこの領域では、星から 10' 離れても、[C II] 輝線の強度を [O I] 63 ミクロン輝線の強度が上回っています。観測された範囲では、[C II] 輝線がガスの冷却を支配していない ($f_{[\text{C II}]} < 1$) のです。

[O I] 輝線を放射する O 原子は、分子雲の表面で C^+ イオンと共存しています。[O I] 63 ミクロン輝線は [C II] 輝線と比較して励起に高温・高密度を必要とするのですが、ガスの加熱率が [C II] 輝線の手には負えないほど大きくなると、代わってガス冷却を担います。紫外光を強く放射している早期型星は近くにある分子雲を激しく加熱するので、その分子雲が高い密度をもっていればその表面で [O I] 輝線が卓越するのです。

3.2 ダストの帯電

式 (3) を見てわかるように、小さな [C II]／連続波強度比は、[O I] 輝線が冷却を支配する場合のような小さい $f_{[\text{C II}]}$ か、小さなガス／ダスト加熱比 ϵ の、どちらかで起こります。早期型星近傍のような紫外光の強い領域で ϵ を小さくする効果としては、ダストの帯電があります。

ダストは、光電子を放出すると正に帯電します。このダストにさらに光子が当たっても、負の電荷を

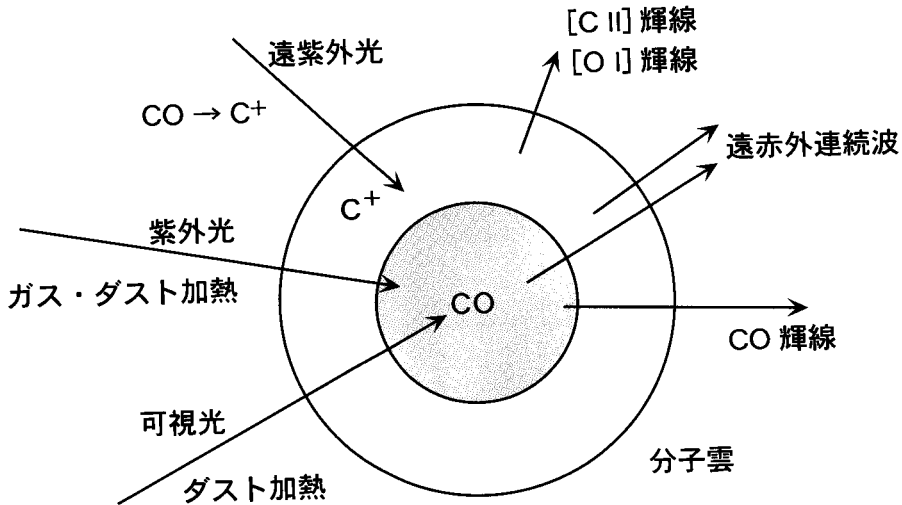


図1 分子雲と星間輻射場の相互作用。分子雲の表面には周囲の星からの光が当たる。ガス中の炭素は遠紫外光によって分子雲表面付近で C^+ イオンの形態をとり、分子雲の内部ではCO分子にとりこまれる。入射紫外光はダストを介した光電効果でガスを暖める。ダストを暖める輻射は紫外から可視の広い波長域におよぶため、分子雲のより内部に届く。

もつ電子は静電気力によってダストにひきとめられたり、飛び出すときに中性のダストの場合より余分にエネルギーを失ったりします。結果として、ダストに同じエネルギーが吸収されてもガスに与えられるエネルギーは少なくなり、 ϵ は減少します。ダストの電荷は、ダストから電子が飛び出す率と、帯電したダストと電子が再結合する率との釣りあいによって決まります。単位体積あたり光電効果が起こる率は、ガスの密度 n と、光電子を出すのに有効な波長域での輻射強度 I_{gas} の積、 nI_{gas} に比例します。一方、単位体積あたりの再結合率は n^2 に比例します。そのため、ダストの電荷は、一次近似でこの二つの比、 I_{gas}/n という変数で決まります。 I_{gas}/n が大きいと、ダストの電荷は正に傾き、 ϵ が、すなわち[C II]/連続波強度比が小さくなります。

4. そのほかの効果

[C II]/連続波強度比は、そのほかの要因でも小さくなりえます。BICEでみられる早期型星近傍の比の落ち込みに寄与しないものとしては、次のような効果があります。

4.1 CO 輝線によるガス冷却

[C II], [O I] 以外の輝線が分子雲のガス冷却を特徴づける場合もあります。たとえば、[O I] 63 ミクロン輝線が有効な場合よりさらにガス加熱率が高い場合には、[Si II] 35 ミクロン輝線が有効です。この輝線を放射する Si^+ イオンも C^+ イオンやO原子と同様に分子雲の表面に多く存在するので、これらの冷却源の入れ代わりは星間空間の化学平衡とはほとんど独立に起こります。これに対し、分子雲のより深い場所に存在するCO分子(図1)に

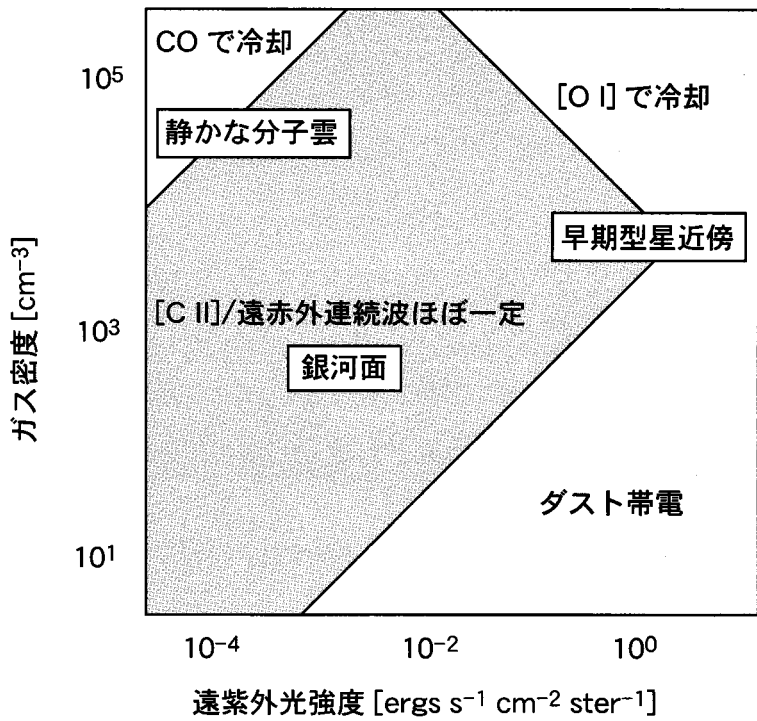


図2 遠赤外の [C II] 輝線/連続波強度比が小さくなる場合を、ガス密度-紫外光強度の平面で概念的に示す。濃い青色の部分は強度比が大きく（およそ 6×10^3 ）ほぼ一定値をとる。薄い青色の部分は、本文に書かれた効果によって強度比が小さくなる。

よる冷却は、 $C^+ - CO$ の化学平衡に影響されます。分子雲中のガス全体を加熱するエネルギーのうち、半分以上が内側の CO 分子領域で吸収されていれば、CO 分子輝線が [C II] 輝線以上にエネルギーを持ち出すはずでず。

分子雲中での CO 分子の C^+ イオンへの変換は、主に遠紫外光子による $CO \rightarrow C$ の解離と $C \rightarrow C^+$ の電離によります。一方、 C^+ イオンの CO 分子への変換はガス中の二体反応を通じて行われます。そのため、 $C^+ - CO$ の化学平衡は、ダスト帯電の場合と同様の形、 $I_{FUV}(x) / n$ ($I_{FUV}(x)$ は、分子雲の表面から深さ x での遠紫外光強度) という変数で決まります。すなわち、分子雲中での C^+ 領域と CO 領域の境界は、 $I_{FUV}(x) / n$ がある定数 $K(C^+ / CO)$ になる深さ $x(C^+ / CO)$ に来ます。 $I_{FUV}(x)$ は、表面に入

射する遠紫外光の強度が I_{FUV}^0 のとき、遠紫外光が分子雲中で減衰される典型的な長さ l_{FUV} を用いて

$$I_{FUV}(x) = I_{FUV}^0 \exp\left[-\frac{x}{l_{FUV}}\right] \tag{4}$$

で表せます。 n が一様なら、

$$x(C^+ / CO) = l_{FUV} \ln\left[\frac{1}{K(C^+ / CO)} \frac{I_{FUV}^0}{n}\right] \tag{5}$$

となります。

ガスを加熱する放射を十分吸収するほど分子雲が厚い場合に限ると、ガス加熱に有効な波長域の放射が分子雲中で減衰される距離 l_{gas} と比較して $x(C^+ / CO)$ が小さい場合



$$\ln \left[\frac{1}{K(C^+/CO)} \frac{I_{FUV}^0}{n} \right] < \frac{l_{gas}}{l_{FUV}} \quad (6)$$

に、CO 分子輝線の冷却が支配的になります。

式 (6) からわかるように、CO 分子輝線による冷却は、入射遠紫外光が弱い領域で有効⁶⁾です。残念ながら、このような領域では、[C II] 輝線や、冷却を支配する CO 分子のやや高めの回転準位輝線が弱く、熱収支を直接とらえる観測は困難です。

4.2 熱ダイアグラム

ここまで述べた効果によって [C II]/連続波強度比が減少する範囲を I_{FUV}^0 と n の変数空間で図 2 に表します。図中には I_{FUV}^0 , n のおよその値が示してありますが、これはガス加熱が遠紫外光に支配される古典的なモデル⁷⁾を用いた場合のものです。

4.3 軟らかな輻射場

BICE があげた二番目に大きな観測成果は、[C II]/連続波強度比が、早期型星近傍だけでなく、銀河系の中心付近 1 kpc にわたって系統的に小さい⁸⁾と見いだしたことです。詳しくは以前の天文月報記事⁹⁾で解説されています。銀河系の中心付近では、銀河バルジに含まれる晩期型星のためにガスを加熱する星間輻射場が軟らかくなっています。エネルギーの低い光子はダストに吸収されても光電子を放射しないため、波長で平均したガスの加熱効率 ϵ は軟らかな輻射のもとで減少します。この効果が、銀河系中心の小さな [C II]/連続波強度比を作っている主な要因のようです。

分子雲に入射する星の光は、

- (1) CO \rightarrow C⁺ の化学反応をおこす遠紫外光、
- (2) ガスを加熱する紫外光、
- (3) ダストを加熱する紫外・可視光、

の三つに分類することができます。初期に [C II] 輝線が観測されてきた明るい早期型星の近傍では紫外光が卓越するので、これらの区別はあまり重要ではありませんでした。しかし、BICE のように、

一般の銀河系面からの輻射をとらえる観測を理解するには、区別して考える必要があります。

この三つの波長域のうち、(1) と (3) は境界が比較的よくわかっています。(2) の低エネルギー側の境界としては、大きさ 0.1 ミクロン程度のダストグレインの仕事関数、6 eV 程度⁷⁾が古典的には用いられてきました。しかし、今では、これよりはるかに小さな、数オングストロームまでのダストが星間空間に多く存在することがわかっています。ある程度小さなダストは光学的に薄く、光子に対する吸収断面積はダストの体積に比例します。一方、電子に対する衝突断面積は幾何学的な断面積に比例します。そのため、小さなダストは電子と結びつきやすい性質もっています。こうしたダストが電子と結合して負に帯電していると、この電子は可視光程度のエネルギーでも光電子として放出されます。この境界は、式 (3) 中の ϵ や式 (6) 中の l_{gas} を決定する¹⁰⁾、熱収支にとって大事な量です。

日本で初めての赤外線宇宙望遠鏡 IRTS (Infrared Telescope in Space) は、小さなダストに特徴的なスペクトルが、グレインが放射する遠赤外連続波と非常によい相関をもっていることを示しました¹¹⁾。これは、両者が同程度のエネルギーの光子で加熱されている可能性を示唆します。小さなダストが可視光を効率よく吸収するには負に帯電している必要がありますから、負に帯電した小さなダストは星間空間で一般的なものかもしれません。

5. これからの発展

1999 年 11 月には、宇宙科学研究所とインドの TIFR (TATA Institute of Fundamental Research, balloon facility) の共同プロジェクトとして、インドでの [C II] 気球実験が始まります。この実験で用いられる望遠鏡は、およそ 1' の角分解能と、およそ 1 平方度の観測域を両立します。

この望遠鏡を用いれば、早期型星の周囲で [C II]/連続波強度比が小さくなっている領域の二次元構造をはじめて描き出すことができます。§3



であげた二つの効果は図2に示したように密度について異なる依存性をもちますから、得られた構造をほかの波長の観測と比較することが、二つの効果を区別するための鍵となるでしょう。それを通して、ダストを介したガス加熱のモデルに制限を与えることも期待できます。この原稿が天文月報に掲載するには、きっと最初の成果が出ていることでしょう。

赤外線宇宙天文台 ISO (Infrared Space Observatory) に搭載された LWS (Long-Wavelength Spectrometer) では、さまざまな物理状態の星間物質がさまざまな遠赤外輝線で観測されました。LWS が取得した大量のデータは解析が続けられていますが、遠赤外域で明るい早期型星近傍が優先されています。このような領域は従来 [C II] 輝線が観測されてきた領域とよく似ています。このため、[C II] 輝線に限っていえば、いまのところ LWS は一部の系外銀河を除いてめざましい成果をあげたわけではありません。現在、LWS が得たデータの多くは公開され、世界中の研究者がその解析を自由に行うことができます。今後、これまでは検出できなかったような弱い [C II] 輝線についても解析が進み、本稿で述べたようなさまざまな領域での中性星間ガスの熱収支がわかってくることでしょう。

参考文献

- 1) Braine J., Hughes D. H., 1999, A&A 344, 779
- 2) Hollenbach D. J., Takahashi T., Tielens A. G. G. M., 1991, ApJ 377, 192
- 3) Mochizuki K., Nakagawa T., 1999, ApJ, submitted
- 4) Nakagawa T., et al., 1998, ApJS 115, 259
- 5) Herrmann S. C., et al., 1997, ApJ 481, 343
- 6) Wolfire M. G., Hollenbach D., Tielens A. G. G. M., 1993, ApJ 402, 195
- 7) de Jong T., 1980, Highlights of Astronomy 5, 301
- 8) Nakagawa T., et al., 1995, ApJ 455, L35
- 9) 中川貴雄, 1995, 天文月報 88, 453
- 10) Lepp S., Dalgarno A., 1988, ApJ 335, 769
- 11) Shibai H., et al., 1997, in Diffuse Infrared Radiation and the IRTS (ASP Conf. Ser. 124) ed. H. Okuda, et al. (San Francisco: ASP), 218

A Thermal Aspect of the Far-Infrared [C II] Line Emission

Kenji MOCHIZUKI

Infrared Astrophysics Division, The Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510

Abstract: An intensity ratio of the [C II] 158 micron line to the far-infrared continuum is nearly constant along the Galactic Plane. This indicates that the heating ratio of gas to dust is nearly constant, and that the gas-cooling is dominated by the [C II] emission. Smaller ratios are observed around massive early-type stars than in the general Galactic Plane. The mechanism causing these smaller ratios will be identified with a new balloon-telescope system.