

# CO depletion

東京大学理学系研究科物理学専攻  
山本研究室 修士課程1年  
柴田 大輝

## 1 Introduction

### 1.1 Carbon Monoxide

Carbon Monoxide(以下 CO) は星間空間上で  $H_2$  について多い物質である ( $[CO] \simeq 10^4 [H_2]$ ). CO は分子雲の観測において様々な目的で用いられ, その中には例えば以下のようなものがある.

1. **coolan of molecular cloud** : 分子雲中の CO は周囲の物質との衝突によって励起される. しかし, 励起された CO は安定化のため基底状態にもどると同時に photon を放出する (spontaneous emission). 放出された photon は再び別の分子に吸収されその分子を励起するが, optical depth の浅い cloud の場合には一部の photon は吸収されずに cloud の外に逃げてしまう. これは, cloud の運動エネルギーが photon に変換されて cloud から出て行くことに相当するので, 結果的に cloud が冷却されることを意味する.
2. **tracer of molecular cloud** : CO の binding energy は  $11.1\text{eV}$  と高く, 分子雲中でも安定して存在する. また, CO は permanent electric dipole moment を持っており, 電波領域に強力な回転遷移の radiation をする. そのため, 1970 年に Orion において発見されて以来分子雲の tracer として用いられてきた. (参考: Wilson, R. W., et al. ApJ, 161, L43, 1970)
3. **deuterium fractionation** : 星間空間上では deuterium fractionation という現象が起きているが, この現象が CO の存在によって促進される (後述 4 章). これにより, 観測結果に影響が出てくる.

### 1.2 CO depletion とは

分子雲中には無数の dust が存在し, 分子雲中の物質が dust と衝突することで dust に吸着される. この現象を depletion といい, CO についても depletion が起こる (CO depletion). この現象によって気相中の CO の abundance が変化し, その結果 CO depletion を考慮しなければ観測結果を間違っで見積もってしまうことになる. なお, CO depletion は  $20\text{K}$  以下で起きる. それ以上の温度になったら dust から CO は蒸発する (3 章参照).

CO depletion は, 観測的には 1999 年に P. Caselli によって初めて示された.

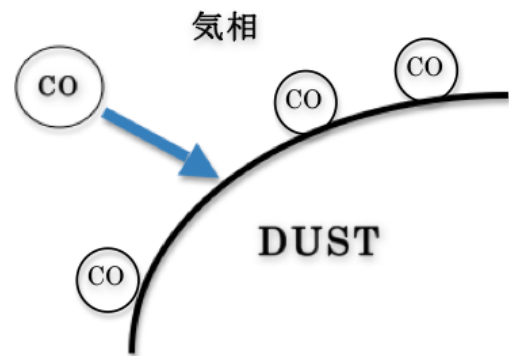


図 1: CO depletion

## 2 CO depletionの発見

CO depletion は、観測的には P. Caselli によって初めて示された。この章では P. Caselli による CO depletion の発見論文のレビューをする (参考:P. Caselli et al., ApJ, 523, L165, 1999).

### 2.1 観測

P. Caselli は IRAM 30m 望遠鏡を用いて 2 年間 L1544 を観測した。L1544 は Taurus にある starless core としてよく知られている天体である (図 2)。この天体を持ちいて、 $C^{18}O$ ,  $C^{17}O$ ,  $DCO^+$ ,  $HC_{18}O^+$ ,  $D_{13}CO^+$ ,  $H_{13}CO^+$ ,  $HC_3N$ ,  $N_2D^+$  などが観測された。

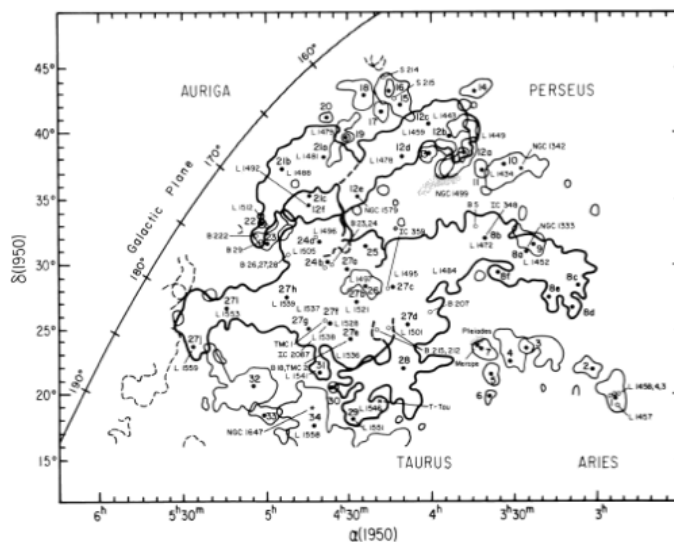
### 2.2 結果

図 3 が観測結果である。図 3 左図では、gray map は分子、solid line は dust の連続波<sup>1</sup> の contour map が表されている。連続波の contour map については、それぞれピークの 30%, 50%, 70%, 90% が表されている。図 3 右図は offset decl.  $-23''$  における各 line であり、それぞれ各分子の観測値およびモデルによる値が表されている。ここで、CO ではなく  $C_{17}O$  が用いられているのは、CO は optical depth が大きいために周囲の cloud に埋れているためである。一方で、 $C_{17}O$  は optical depth がうすい。実際にこの論文の後半で hyperfine の観測によって強度比が理論と一致して薄いことが示されている。

図 3 左図を見ると、 $N_2D^+$  は dust の連続波の分布とほぼ一致している。これは一般的な形態論からも一致することが言われている。このことから、 $N_2D^+$  と dust の連続波のピークが一致し、二つの質量分布がほとんど一致することがわかる。一方  $C_{17}O$  については、dust の連続波のピークの部分で  $C_{17}O$  の分布がへこんでおり、dust の連続波の分布の少ないところで  $C_{17}O$  がピークになっている。このことから、二つの質量分布が異なり dust の多いところで  $C_{17}O$  が少なく dust の少ないところで  $C_{17}O$  が多いことがわかる。

また、図 3 右図を見ると  $N_2H^+$  はピークが中心集中しているが  $C^{17}O$  はピークが反転していることがわかる。これは、 $C_{17}O$  は density の高いところでなくなっており本来たくさんあるべきところで少なくなっていることを意味する。

これらのことから、dust によって CO depletion が起こっていることがわかる<sup>2</sup>。



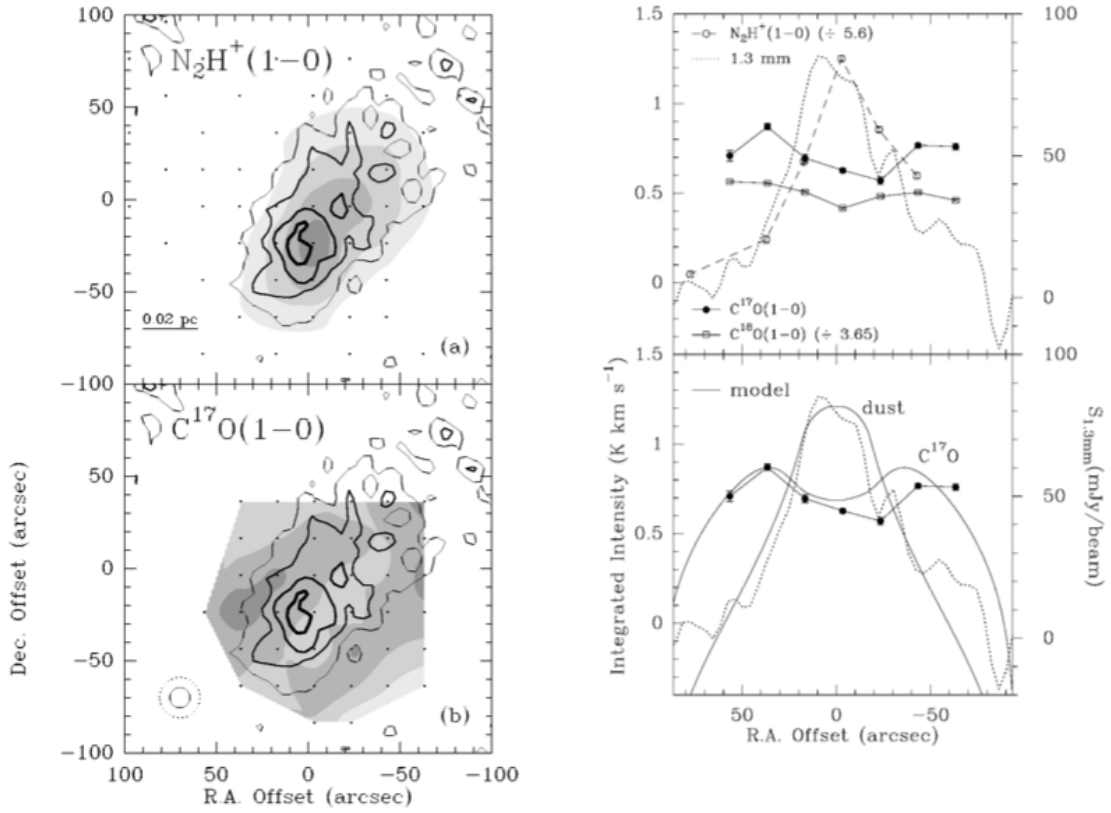


図 3: 観測結果. 左図では, gray map は分子, solid line は dust の連続波の contour map を表す. 右図は offset decl.  $-23''$  における各 line であり, それぞれ各分子の観測値およびモデルによる値を表す.

### 2.3 定量的な解析

2.2 節では観測された line の intensity から CO depletion について述べたが, ここでは column density の値から定量的に CO depletion について考える.

P. Caselli は, 観測結果から得られた中心付近の column density の値を用いて定量的に CO depletion の存在を示している. 観測結果からは  $C^{17}O$  と  $H_2$  の column density の値の比として

$$\frac{N(C^{17}O)}{N(H_2)} \simeq 5 \times 10^{-9} \quad (1)$$

が得られている. 一方, canonical value からは,

$$\frac{N(C^{17}O)}{N(H_2)} \simeq 4.7 \times 10^{-8} \quad (2)$$

が得られている<sup>3</sup>. この二つを比べてみると, 中心付近では  $C^{17}O$  の量が一桁少なく CO depletion が起こっていることがわかる.

<sup>3</sup>Frerking et al. 1982, ApJ, 262, 590 による.  $\rho$  OPh, Taurus molecular cloud の星の値から求められた基準値による.

### 3 depletion した CO のその後

星間空間における dust へは CO 以外の様々な物質も depletion する。depletion をした CO のその後の反応を考える上では、H 原子の dust への depletion が重要になってくる。図4に示したように、dust に吸着した分子はポテンシャルの井戸の底に安定して存在している<sup>4</sup>。しかし、星間空間でのタイムスケールは長いので、トンネル効果により H 原子がポテンシャルの井戸の間を移動する。ここで、CO は mass が大きいので H 原子と比べれば事実上移動しないとみなせる。この移動により H 原子と CO が同じ井戸に入るとそこで反応が起こる。その反応例として、以下のような反応がある。

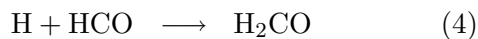
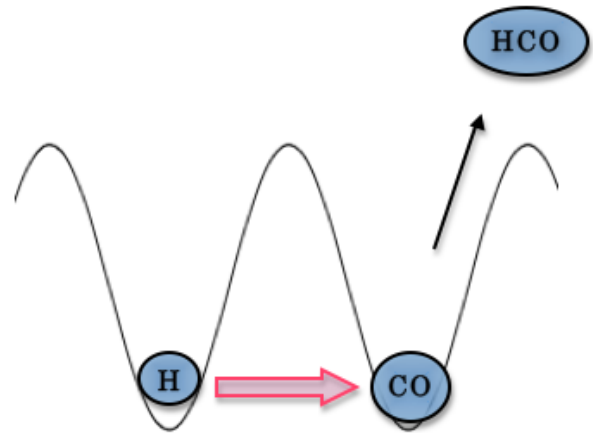


図 4: depletion をした CO と H の反応の模式図

これらの反応は星間空間 (気相) 上ではほとんど起こらない。生成物は一つであるため反応時に反応

前の持っている運動エネルギーを捨てなければならないが、星間空間上では運動エネルギーを捨てることができないためである。dust 上であれば dust へ運動エネルギーを捨てることができる。また、星間空間は三次元であるが dust 上での運動は二次元であり、dust 上では次元が一つ落ちるために衝突確率も増える。

これまでの話は星の core がなく、温度が 20K 以下での話である。星の core ができて、cloud 全体の温度が上がってくるとここで生成された分子は dust から蒸発する。例えば CO は 20K で dust から蒸発する。

図 4 は一連の現象の模式図である。このようにして、dust に吸着された CO は他の分子と dust 上で反応し、星の core ができて温度が上昇すると共に気相ではほとんど作られない様々な分子を放出する。

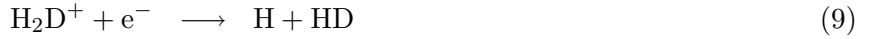
<sup>4</sup>ここでのポテンシャルとは H に対するポテンシャルである。

## 4 Deuterium fractionation

### 4.1 Deuterium fractionation とは

冷たい分子雲中で、重水素が分子によって濃縮されるということが知られている。cosmic abundance による D/H 比は  $10^{-5}$  であることが知られている。一方で、冷たい分子雲の観測によると冷たい分子雲中の分子における D/H 比 (例えば  $[\text{DCN}]/[\text{HCN}]$  など) は  $0.01\sim 0.1$  であり、cosmic abundance による D/H 比よりもはるかに大きな値を示す。この現象を deuterium fractionation (重水素濃縮) という。

deuterium fractionation のメカニズムにおいて重要なのは以下の反応である。



反応 (7) は 230K の発熱反応であるので、冷たい分子雲中では吸熱反応となる逆反応は無視できる。そのため、 $\text{H}_2\text{D}^+$  の abundance が優位に上昇する。さらに、 $\text{H}_2\text{D}^+$  を通じて様々な分子に重水素が送り込まれる<sup>5</sup>。この結果として、冷たい分子雲中の分子における D/H 比は cosmic abundance による D/H 比よりもはるかな大きな値を示すことになる。

実際に、平衡状態を仮定して速度方程式を立てると

$$\frac{d[\text{H}_2\text{D}^+]}{dt} = k[\text{H}_3^+][\text{HD}] - k[\text{H}_2\text{D}^+][\text{CO}] - k_r[\text{H}_2\text{D}^+][\text{e}^-] = 0 \quad (10)$$

となる。ここで、 $k$  は反応 (7)(8) の rate coefficient,  $k_r$  は反応 (9) の rate coefficient であり、それぞれ ion-molecule reaction の rate coefficient, dissociative recombination の rate coefficient を表すので  $k \simeq 2 \times 10^{-9}$ ,  $k_r \simeq 10^{-7}$  である。これを解いて  $[\text{CO}] \sim 10^{-4}[\text{H}_2]$ ,  $[\text{e}^-] \sim 10^{-7}[\text{H}_2]$ <sup>6</sup> を代入すると

$$\frac{[\text{H}_2\text{D}^+]}{[\text{H}_3^+]} = \frac{k[\text{HD}]}{k[\text{CO}] + k_r[\text{e}^-]} \simeq 10^{-1} \quad (11)$$

となり、確かに cosmic abundance による D/H 比よりも大きな値になる。

このように、冷たい分子雲中では deuterium fractionation が起きていることがわかる。

### 4.2 CO depletion による影響

式 (11) を見ると、分母に  $[\text{CO}]$  と  $[\text{e}^-]$  があり deuterium fractionation の度合いはこの二つの相対的な存在度に依存することがわかる。depletion がない状態では  $[\text{CO}] \sim 10^{-4}[\text{H}_2]$ ,  $[\text{e}^-] \sim 10^{-7}[\text{H}_2]$  なので  $[\text{CO}] \gg [\text{e}^-]$  である。depletion によって  $[\text{CO}]$  が  $1/10$  になると  $[\text{CO}] \sim [\text{e}^-]$  となるので CO と  $\text{e}^-$  の反応 (式 (8) と (9)) は同程度になる。さらに depletion が進んで  $[\text{CO}]$  が  $1/100$  以下になると  $[\text{CO}] \ll [\text{e}^-]$  になるので、 $\text{e}^-$  の反応がメインの反応となる。

このように、depletion が進むと  $\frac{[\text{H}_2\text{D}^+]}{[\text{H}_3^+]}$  が上昇し deuterium fractionation の度合いがより大きくなる。

---

<sup>5</sup> $\text{H}_3^+ + \text{X} \longrightarrow \text{HX}^+ + \text{H}_2$

<sup>6</sup> $[\text{CO}]$  の値は宇宙における標準値 (Rangevin rate) より、 $[\text{e}^-]$  の値は宇宙線による  $[\text{H}_2]$  の破壊反応より求められる。

## 5 参考文献

- Wilson, R. W., et al. 1970, ApJ, 161, L43
- P. Caselli et al., 1999, ApJ, 523, L165
- Ungerechts et al., 1987, ApJS, 63, 645
- Word-Thompson et al., 1999, MNRAS, 305, 143
- Frerking et al. 1982, ApJ, 262, 590
- Lyman Spitzer, Jr., 高窪 啓弥 訳, 『星間物理学—星間媒質における物理的諸過程』, 共立出版株式会社 (1980)
- Steven W. Stahler, Francesco Palla, The Formation of Stars, Wiley(2004)
- A. G. G. M. Tielens, The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, Cambridge(2005)