

散乱光における原始惑星系円盤表層の水氷ダスト分布の影響

高附 翔馬 (東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻)

Abstract

原始惑星系円盤における水氷の分布を探ることは惑星形成や生命の起源において重要なことである。水氷の半径方向の分布を探ることは一般的に難しいが、2008年に井上らによって新たな観測手法が提案された。これは K バンド ($2.15\mu\text{m}$)、 H_2O バンド ($3.1\mu\text{m}$)、 L' バンド ($3.75\mu\text{m}$) の3色を用いる手法であるが、2009年に本田らによって HD142527 の星周円盤に初めて適用された。彼らによって、この手法の有効性と HD142527 原始惑星系円盤表層の 140AU 以遠に氷が存在することに成功しているが、散乱光の赤化が説明できなかつた。この散乱光の赤化は HD100546 でもみられるが、散乱光の赤化の原因として Mulders らはダストサイズによる散乱の角度依存性を挙げている。一方で、岡らの計算によると早期型 (A,B 型) の原始惑星系円盤表層には UV 光脱離過程により、氷微粒子は安定に存在できないという結果がある (Oka et al 2012)。HD100546 は若い B 型星であるため、UV 光脱離過程が効いていれば HD100546 原始惑星系円盤表層には水氷が安定に存在できないはずである。これと Mulders らのダストモデルに水氷ダストが考慮されていないことから、本研究では水氷ダストと光脱離過程に注目し、これらがどのように観測されるかを K、 H_2O 、 L' それぞれのバンドで 2D モンテカルロ輻射輸送計算を使って調べた。光脱離過程の効果により、($K - \text{H}_2\text{O}$ と $\text{H}_2\text{O} - L'$) のカラー差が 1 等ほど小さくなる結果が得られた。また、水氷の分布が ($K - \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O} - L'$) のカラー差から読み取ることができることがわかった。

1 Introduction

太陽系では太陽に近い順から岩石惑星、ガス惑星、氷惑星と分布している。この理由として、水氷の有無が関係していると考えられている。これは低温な遠方では固体物質が増加し、ガスを捕獲するのに十分な質量のコアが形成可能であると考えられているからである。また、生命発生の議論において水の存在は重要であり、水の起源については彗星等によって水が地球に供給されたという説もある。原始惑星系円盤における水氷の分布を探ることは惑星形成や生命の起源において有益なことである。

しかし、原始惑星系円盤において水氷の分布に関する観測情報は非常に限られている。水氷の半径方向の分布を探ることは一般的に難しいが、井上らによって新たな観測手法が提案された (Inoue et al.(2008))。この手法は本田らによって HD142527 の星周円盤に初めて適用され、手法の有効性と HD142527 原始惑星系円盤表層の 140AU 以遠に氷が存在することに成功した (Honda et al.(2009))。この HD142527 の散乱光は赤化しており、HD100546 でも同様の赤化が

みられている。散乱光の赤化の原因として Mulders et al.(2012) ではダストサイズによる散乱の角度依存性を挙げているが、水氷ダストは考慮されていないため、水氷ダストによる影響はわからない。一方で、Oka et al. (2012) の計算によると早期型 (A,B 型) の原始惑星系円盤表層には UV 光脱離過程により、氷微粒子は安定に存在できないという結果がある。HD100546 は若い B 型星であるため、UV 光脱離過程が効いていれば HD100546 原始惑星系円盤表層には水氷が安定に存在できないはずである。そこで、本研究では水氷ダストと光脱離過程に注目し、これらがどのように観測されるかを K、 H_2O 、 L' それぞれのバンドで調べていく。

2 Methods

吸収が散乱に比べて強く効く場合、強く効かない場合と比べて散乱光の輻射強度は小さくなる。これは吸収が起こる典型的な表面が散乱が起こる典型的な表面に比べ円盤中心面から高い位置にくるため、中

心星から出た光が散乱されて観測者に届くまでに吸収によって減衰するからである (図 2)。

円盤に水氷が存在すると散乱アルベドの定義

$$\omega = \frac{\kappa_{\text{sca}}}{\kappa_{\text{abs}} + \kappa_{\text{sca}}}, \quad (1)$$

より、波長 $3\mu\text{m}$ で吸収のピークが表れる (図 1(b))。したがって、水氷が円盤表面に存在する場合、散乱光の SED において $3\mu\text{m}$ 付近で溝ができることが予想される。この溝の深さは水氷の割合が多くなるほど大きくなると考えられる。よって、K バンド ($2.15\mu\text{m}$)、 H_2O バンド ($3.1\mu\text{m}$)、 L' バンド ($3.75\mu\text{m}$) の 3 色のカラー差をみることで、水氷の吸収の効果を議論できる。用いるカラー差は 2 の用に等級差で表す。

$$(K - \text{H}_2\text{O})_{\text{sca}} = -2.5 \log \frac{I_{\text{K}}^{\text{sca}}}{I_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sca}}}, \quad (2)$$

$$\Delta(K - \text{H}_2\text{O}) = (K - \text{H}_2\text{O})_{\text{sca}} - (K - \text{H}_2\text{O})_{\text{star}}. \quad (3)$$

この等級差を中心星輻射の等級差で規格化したものを式 3 で定義する。この規格化した等級差は正に行くほど中心星輻射に比べ赤化していることを表し、負にいくほど青化していることを表す。

2.1 Numerical method

2D モンテカルロ法を用いている。光源を中心星のみとし、中心星から光子を飛ばし観測者方向に散乱された光子をカウントした。ダストが数 μm の放射をする場合の温度はウィーンの変位則、

$$T = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{max}}}, \quad (4)$$

より約 1000K である。ダスト温度が $\sim 1000\text{K}$ となるのは中心星付近であるため、今回注目する水氷が存在しうる領域 (数十 AU) からの光は中心星の散乱光のみとみなせる。

3 Model

ダストをシリケイトと水氷の 2 成分とし内部密度一様な球としたとき、散乱アルベドと散乱断面積は図 1 のようになる (Inoue et al. (2008))。図の実線、

表 1: 中心星と円盤の設定値

パラメータ	値
L_*	$36L_\odot$
T_{eff}	10500 K
R_{in}	0.5 AU
R_{out}	500 AU
d	103 pc

破線、点線はそれぞれダストサイズが $0.1, 1, 10\mu\text{m}$ の値を表している。本研究では $1\mu\text{m}$ のダストを仮定して計算を行った。中心星、円盤の構造について設定した値を表 1 に示した。軸対称な円盤を仮定し、密度構造、温度構造は Oka et al. (2012) のコードで計算した値を用いた。

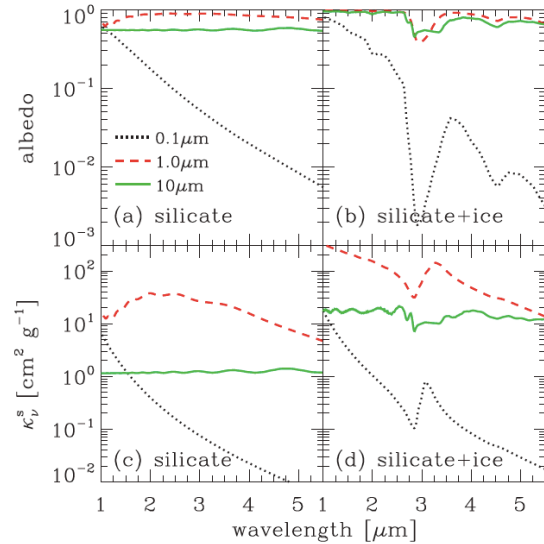


図 1: 散乱アルベドと質量散乱断面積: (a) シリケイトダストのアルベド, (b) シリケイト+水氷ダストのアルベド, (c) シリケイトダストの質量散乱断面積, (d) シリケイト+水氷ダストの質量散乱断面積。アバundanceはシリケイトと水氷ダストについてそれぞれ 0.0043, 0.0094 である (Miyake & Nakagawa.(1993))。実線、破線、点線はそれぞれダストサイズが $0.1, 1, 10\mu\text{m}$ の値。Inoue et al. (2008) fig.2 より。

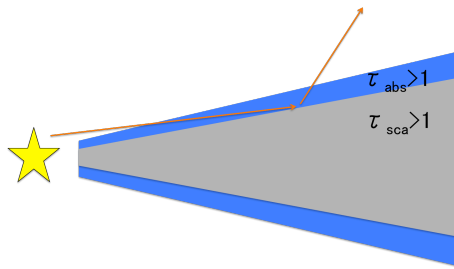


図 2: 円盤からの散乱光のイメージ。灰色の部分は散乱における光学的深さが 1 以上の領域を表し、青色の部分は吸収における光学的深さが 1 以上の領域を表す。

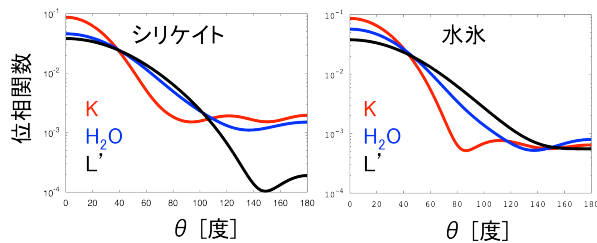


図 3: $1\mu\text{m}$ のシリケートダスト (左) と水氷ダスト (右) の位相関数。赤線は K バンド ($2.15\mu\text{m}$)、青線は H_2O バンド ($3.1\mu\text{m}$)、黒線は L' バンド ($3.75\mu\text{m}$) に対応する。

4 Results

観測者に対する円盤の傾き $\text{inclination}=0^\circ$ 及び 45° のカラー差を動径方向にとったグラフをそれぞれ図 4、図 5 に表した。青は光脱離なし、赤は光脱離あり、黒は水氷なしの場合を示している。初めに、 $\Delta(K-H_2O)$ と $\Delta(H_2O-L')$ に注目する。 $\Delta(K-H_2O)$ の値が負になり、 $\Delta(H_2O-L')$ の値が正になっていることから H_2O バンドの水氷の吸収が出ていることがわかる。また、光脱離ありの場合に比べ光脱離なしは $\Delta(K-H_2O)$ と $\Delta(H_2O-L')$ の絶対値が大きいことから、光脱離により水氷が少なくなっている効果が表れている。

また、水氷がある場合 (赤と青) 図 4 の $\Delta(K-H_2O)$ と $\Delta(H_2O-L')$ のグラフにおいて、絶対値の上昇がみられる。Okamoto et al. (2012) の円盤モデルでは $3.5 \sim 130\text{AU}$ の間で全 H_2O に対する H_2O ice の質量比が増加するため、その効果が反映されていると考

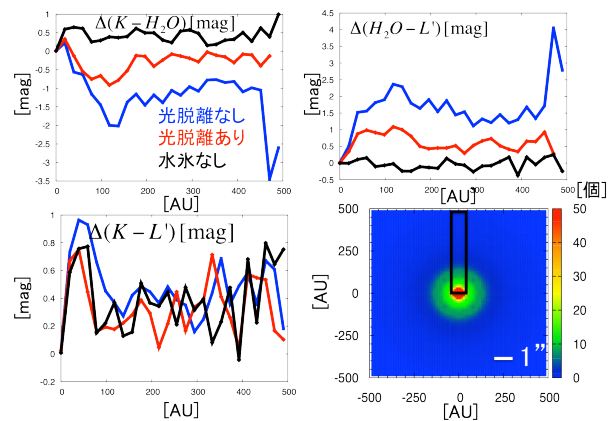


図 4: Inclination = 0° のカラー差を右下図の縦軸方向にとった図。右下図の黒線で囲っている部分はカラー差をとった領域を表す。中心星のカラー差を縦軸の 0 にして規格化している。青は光脱離なし、赤は光脱離あり、黒は水氷なしの場合を示す。値がばらばらついているのはモンテカルロ法による統計的揺らぎによるものである。右下図は K バンドにおいて、各場所から観測者方向にきた光子の数を色で表している (面輝度に対応する)。

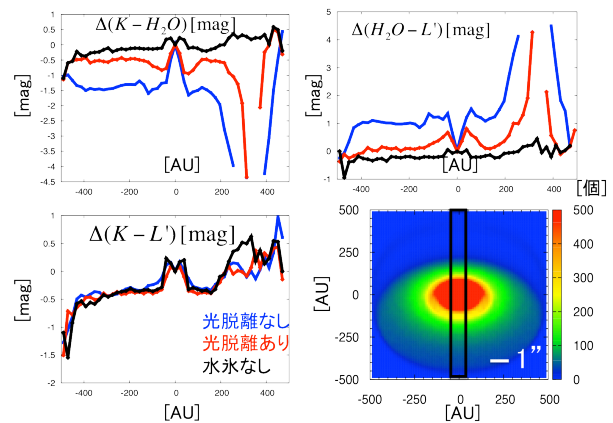


図 5: Inclination = 45° のカラー差を動径方向にとった図。

える。

次に、図 4 と図 5 の $\Delta(K-L')$ について注目する。図 4 $\Delta(K-L')$ の赤化 (値が正) と図 5 $\Delta(K-L')$ の $\pm 50\text{AU}$ における符号の逆転について、各波長ごとの位相関数の違いを読み取ることができる。

中心星輻射に対して散乱の光学的深さが 1 となる高さを h_{sca} とすると、 $h_{\text{sca}}/r \sim 0.1$ 程度である。よって、図 6 より inclination が 0° , 45° において 1 次散乱光の散乱角はそれぞれ $80 \pm 5^\circ$, $35 \pm 5^\circ$ である。図 3 より、inclination = 0° の場合の散乱角である 80° 付近をみると、K バンドよりも L' バンドの方が散乱されやすい。これが図 4 $\Delta(K - L')$ の赤化 (値が正) につながっていると考える。

一方、inclination = 45° の場合も同様に 35° 付近をみると、K バンドと L' バンドの位相関数の大小が逆転している。ここで、 h_{sca}/r について考えると、フレアアップしている円盤モデルを用いているため、円盤内側ほど値が小さく 1 次散乱光の散乱角が大きくなる。この r 方向の散乱角の変化によって位相関数の大小が逆転し、図 5 $\Delta(K - L')$ の $\pm 50 \text{AU}$ における符号の逆転につながっていると考える。

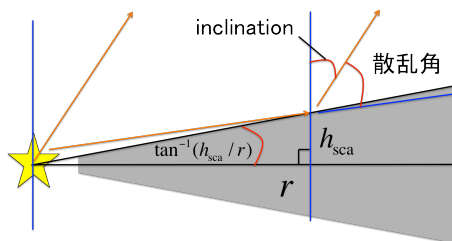


図 6: 1 次散乱における、散乱角と inclination, h_{sca}/r の関係。

5 Discussion

図 3 より、ダストサイズ ~ 波長の領域において位相関数はダストサイズ/波長比に対して敏感である。各波長間の位相関数が散乱角ごとに大きく変わるため、同じダストモデルでも inclination によってカラー差の傾向が変わる。逆に、同様のカラー差の傾向が違うダストモデルでもあり得るため、別サイズの計算との比較が必要である。また、本研究の結果では統計的揺らぎが大きくみられる。特に、円盤外側の密度が低い領域では散乱される光子の数が少ないため、その影響がより大きい。全体のカラー差の傾向をみる上でも精度を上げた計算が必要であると考え。また、光脱離過程の有無は $\Delta(K - \text{H}_2\text{O})$ と $\Delta(\text{H}_2\text{O} - L')$

のカラー差図において顕著に出てるが、アバundanceによる水氷の量と情報が縮退していないか確認が必要である。さらに、この円盤モデルは HD100546 を想定しているため、観測結果と比較した議論を今後していきたい。

6 Conclusion

原始惑星系円盤表層に水氷が存在したとき、どのように観測されるかを 2D モンテカルロ輻射輸送を用いて計算した。

光脱離過程の有無は $\Delta(K - \text{H}_2\text{O})$ と $\Delta(\text{H}_2\text{O} - L')$ のカラー差図において顕著に出るが、アバundanceによる水氷の量等と情報が縮退していないか確認が必要である。

水氷の分布 (全 H_2O に対する H_2Oice の質量比が変わる領域) は $\Delta(K - \text{H}_2\text{O})$ と $\Delta(\text{H}_2\text{O} - L')$ から読み取ることができる。

Reference

- [1] Craig F. Bohren and Donald R. Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. 1998. WILEY-VCH
- [2] Honda M, Inoue AK, Fukagawa M, Oka A, Nakamoto T, Ishii M, Terada H, Takato N, Kawakita H, Okamoto YK, Shibai H, Tamura M, Kudo T, Itoh Y. 2009. The Astrophysical Journal Letters 690: L110-L113
- [3] Inoue, A. K., Honda, M., Nakamoto, T., & Oka, A. 2008, PASJ, 60, 557
- [4] Miyake K. & Nakagawa Y. 1993. Icarus, 106, 20
- [5] Mulders GD, Min M, Dominik C, Debes JH. 2012. Astronomy & Astrophysics 549, A112
- [6] Oka A, Inoue AK, Nakamoto T, Honda M. 2012. Around Herbig Ae/Be Stars The Astrophysical Journal 747, 138