

# 赤外線天文衛星「あかり」と近赤外線望遠鏡 IRSF により検出した デブリ円盤の特性

渡邊 華 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

デブリ円盤とは、年齢  $10^{7-9}$  yr の主系列星が持つダストの円盤を指す。ダストは、惑星の源となる微惑星が衝突合体を繰り返す際に供給されていると考えられ、ダスト量の時間進化は定常進化モデルで説明されてきた。しかし、これまでのデブリ円盤のサンプルは、数十～百 AU に位置する冷たいダストから構成されるものが多く、数 AU に位置する円盤の研究には、暖かいダストの放射を検出する中間赤外線での探査が必要であった。デブリ円盤は、ダスト円盤の赤外放射を、主星の放射に対する超過放射として検出する。本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の中間赤外線全天サーベイデータで検出した天体に対して、IRSF で中心星の明るさを精度よく決定し、 $18 \mu\text{m}$  帯での超過放射の有無を判定した。さらに、検出したデブリ円盤に対し、その SED から円盤の特徴 (ジオメトリとダストの性質) を推定した。探査の結果、主系列星 681 天体の中から 53 天体のデブリ円盤を検出した。主星放射の見積もりに IRSF の観測結果を用いたことで、近傍で明るい主星のデブリ円盤の検出精度を向上することに成功した。検出したデブリ円盤の中には、定常進化モデルでは説明できないほど、年齢に対して超過比の大きい天体が存在する。また、殆どの天体は単一リングの黒体放射で説明できたが、中には  $1 \mu\text{m}$  以下のシリケートの存在を示す天体、数年間でダスト量の時間変動を示唆する天体も存在する。これらは、巨大衝突など突発的なイベントの存在を示唆し、少なくとも定常進化だけでは、全てのデブリ円盤を説明できないことを示している。

## 1 Introduction

デブリ円盤とは年齢  $10^{7-9}$  yr の主系列星が持つ、光学的に薄いダストの円盤である。近年の Spitzer 赤外線宇宙望遠鏡などの観測により、恒星の 5-30 % にデブリ円盤が観測されている。この円盤のダストは、原始惑星系円盤時代から生存したダストと考えることができない。なぜならば、デブリ円盤を持つ主星の年齢と比較した際、原始惑星系円盤由来のダストが散逸するタイムスケールが短いからである。そのため、デブリ円盤のダストは、微惑星が衝突合体を繰り返すことで常時供給されていると考えられている (定常進化モデル)。惑星も微惑星の衝突合体で形成されると考えられるため、デブリ円盤は惑星形成過程と密接に関係する可能性がある。しかし、デブリ円盤と惑星の相関関係を説明できるパラメータは、現状では存在しない。

デブリ円盤を新しく検出するには、赤外線天文衛星による、星の広域探査が有効である。温度 3,000-

10,000 K の主星からの放射に対して、中間赤外線域で星周円盤のダストからの熱放射を直接観測する。この方法は、デブリ円盤を空間分解する必要がないため、遠方の星に対しても探査が可能である。

本研究の目的は、主星から数 AU に存在するデブリ円盤のサンプル数を増やし、これらのデブリ円盤の時間進化や特性を議論することである。本研究の特徴は二点ある。一点目は、「あかり」の全天サーベイデータを用いることで、デブリ円盤を無バイアスに検出することができることである。二点目は、主星の放射を IRSF 望遠鏡で見積もることで、太陽近傍の明るい主星の放射を精度よく測光することができることである。

## 2 デブリ円盤の検出

### 2.1 主星放射の見積もり

サンプルから赤外超過を検出するためには、主星の放射を精度良く見積もることが重要である。主星放射は、可視（B、Vバンド）と近赤外線（J、H、K sバンド）の測光データを、主星のスペクトルのモデルである（Kurucz モデル; Kurucz 1992）で fitting し、見積もった。可視光である B、V バンドの測光値は、Tycho-2 Spectral Catalog (Wright et al. 2003) から取得した。近赤外線帯である J、H、Ks バンドの測光値は、2MASS (2 Micron All Sky Survey) カタログと照合した。しかし、明るい天体が検出器飽和により測光精度が悪かったため、IRSF 望遠鏡を用いて測光精度の悪い天体の追観測を行った。図 1 に、IRSF 観測による近赤外線での測光精度の向上と、それによる 18  $\mu\text{m}$  帯での超過検出の精度向上の様子を示す。

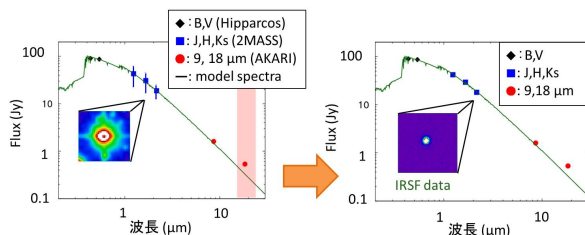


図 1: IRSF 観測による近赤外線での測光精度の向上と、それによる 18  $\mu\text{m}$  帯での超過検出の精度向上を示した図。横軸は波長 [ $\mu\text{m}$ ]、縦軸は Flux [Jy] である。

### 2.2 赤外超過判定

各サンプルに対し、波長 18  $\mu\text{m}$  帯における、測光値と主星の放射の差  $F_{\text{disk},18}$  を主星の放射  $F_{*,18}$  で割って、超過比  $R_{18}$  を求め、頻度分布を作成した。精度の観点から 2MASS、IRSF サンプルを分離し、頻度分布を正規分布と仮定し、ガウシアンで fitting を行った。超過比が  $3\sigma$  を超える天体をデブリ円盤と判断した。また、どちらのサンプルも平均値が 0 より高い値が得られた。このことは、赤外超過天体が

多いことを示唆するが、本研究では安全のため、システムティックエラーとした。

### 2.3 超過放射からデブリ円盤の特性導出

次に円盤の赤外線 SED を作成し、SED から円盤の特性（ジオメトリとダストの性質）を推定する。円盤の SED の作成にあたり、「あかり」9  $\mu\text{m}$ , 18  $\mu\text{m}$  データに加え、アーカイブから WISE 12  $\mu\text{m}$ , 22  $\mu\text{m}$ 、Spitzer 24  $\mu\text{m}$  のデータを取得し、利用する。円盤の光度は、観測者からの距離の不定性を含むので、距離に依存しない超過比  $R_\nu(\nu)$  を fitting に用いる。

まずは  $R_\nu(\nu)$  を、図 2 のような単一リング構造に分布したダストからの黒体放射で説明を試みる。このモデルでは、距離に依存しない超過比  $R_\nu(\nu)$  は、以下の式で表せる (Kobayashi & Lohne 2013)。

$$R_\nu(\nu) = \frac{F_{\text{disk},\nu}}{F_{*,\nu}} = \frac{\tau \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} 2r B_\nu(T_{\text{disk}}) dr}{\frac{L_*}{4\pi\sigma T_*^4} B_\nu(T_*)} \quad (1)$$

上式の分母は主星温度  $T_*$  での黒体放射のフラックス、分子は円盤温度  $T_{\text{disk}}$  での黒体放射のフラックスを表す。 $\tau$  は円盤の光学的厚み、 $r$  は主星からデブリ円盤までの距離を表し、 $r_{\text{in}}$ 、 $r_{\text{out}}$  はそれぞれ円盤の内縁と外縁を表す。 $\sigma$  はシュテファン・ボルツマン定数、 $L_*$  は主星の輝度である。この fitting で得られるパラメータは、デブリ円盤の光学的厚み  $\tau$  と、温度  $T_{\text{disk}}$  である。

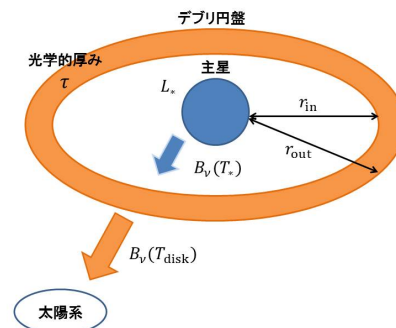


図 2: 円盤の fitting における各パラメータの概念図

単一リングの黒体放射で説明できない天体については、ダストの光学特性  $Q_{\text{abs},\nu}$  も考慮したスペクトルで説明を試みる (詳しくは 4.2 節で説明する)。

### 3 Results

探査の結果、全 681 天体中、新検出 9 天体を含む 53 天体のデブリ円盤を検出した。2MASS サンプル 395 天体中 34 天体、IRSF サンプル 286 天体中 23 天体である。合計の検出率は  $\sim 8\%$  で、先行研究 (Fujiwara et al. 2013) の  $\sim 6\%$  と不定性の範囲内で矛盾はない。スペクトルごとの検出率は、BA 型星で  $19\%$  であるのに対し、FGK 型星では  $3\%$  となった。また、検出したデブリ円盤の超過比を、単一リングの黒体放射で説明を試みたところ、53 天体中 29 天体がこのモデルで説明可能であった。

### 4 Discussion

#### 4.1 デブリ円盤の時間進化

まず、デブリ円盤の進化を統計的に議論する。図 3 に、G 型星に対して先行研究と本研究のデブリ円盤のサンプルの、年齢に対する超過比をプロットする。デブリ円盤の超過比の時間変化は、定常進化モデル (Kobayashi & Lohne 2013) でよく説明されてきた。このモデルでは、年齢  $t$  の星における超過比は、ダストの散逸のタイムスケール  $t_0$  を用いて、 $R = \frac{t_0}{t}$  で表される。ダストの散逸のタイムスケール  $t_0$  は、Kobayashi & Lohne (2013) より、(2) 式で表せる。

$$t_0 \sim 1.3 \left( \frac{s_{\text{max}}}{3000\text{km}} \right)^{0.96} \left( \frac{r}{2.5\text{AU}} \right)^{2.18} \left( \frac{e}{0.1} \right)^{-1.4} [\text{Gyr}] \quad (2)$$

$s_{\text{max}}$  はデブリ円盤内の最大の微惑星の半径、 $r$  は主星からデブリ円盤の位置、 $e$  は離心率である。図 3 中の最も若く超過比の大きな天体に合致するように  $t_0$  を設定した結果、G 型星では  $t_0 = 0.2 \text{ Gyr}$  となった。図 2 中の赤色で示した天体に着目すると、定常進化を仮定した場合、これらの天体は  $t_0 = 5 \text{ Gyr}$  を要求する。しかし、 $t_0 = 5 \text{ Gyr}$  に対応する若くて超過比の大きな天体は存在しない。つまり、これらの

天体は年齢に対して超過比が過大であるため、定常進化では説明できない。このことは、一時的にダスト量を増やす巨大衝突などのイベントを示唆する。

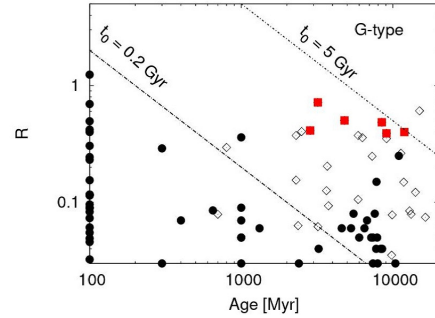


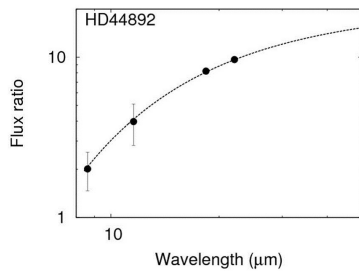
図 3: G 型星での波長  $18 \mu\text{m}$  の超過比と主星の年齢の比較。横軸が主星の年齢 [Myr] で、縦軸が超過比である。黒丸が先行研究 (Spitzer) のデータ、菱形、四角は本研究の全てのサンプル、デブリ円盤のサンプルである。

#### 4.2 デブリ円盤の構造とダストの特性

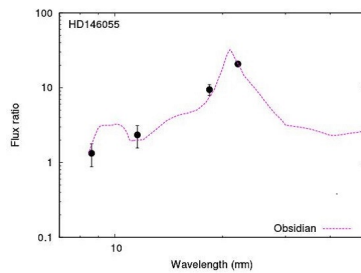
本研究で検出したデブリ円盤 53 天体中、29 天体が単一リングの黒体放射で説明可能であった。また、単一リングの黒体放射で説明できなかった天体 24 天体に対し、鉱物であるシリケートの光学特性を考慮に入れた放射モデルで fitting を行った。さらに、黒体放射でもシリケートでも説明できなかった天体に対して想定される解釈を議論する。

図 4 は、円盤の超過比の  $R_\nu(\lambda)$  の fitting 結果の一例である。(a) は単一リングの黒体放射で説明できる天体、(b) はシリケートの含有で説明できる天体、(c) は時間変動を考えないと説明できない天体である。

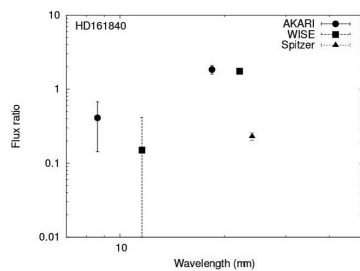
円盤のシリケート放射を考慮するためには、単一リングの黒体放射を仮定した (1) 式に、シリケートの吸収係数  $Q_{\text{abs,silicate}}(\nu)$  をかける。本研究では、Astronomical Silicate, Obsidian, Olivine, Pyroxene の四種類を考慮した。fitting の結果、2 天体が Obsidian、1 天体が Olivine、2 天体が Pyroxene で計 5 天体がこのモデルで説明可能であった。散逸タイムスケールが早い小さなシリケートダストが、デブリ円盤に



(a) 単一リングの黒体放射で説明できる天体



(b) シリケートの含有で説明できる天体



(c) 時間変動を考えないと説明できない天体

図 4: 円盤の超過比  $R_{\nu}(\lambda)$  の fitting 結果。全て横軸は波長 [ $\mu\text{m}$ ]、縦軸は超過比  $R_{\nu}(\lambda)$  である。

存在する可能性がある。このことは最近の衝突イベントによるダスト供給の可能性を示唆する。

単一リングの黒体放射でも、シリケートの含有でも説明できなかった天体の一つである HD161840 の超過比を、「あかり」、WISE、Spitzer 衛星の観測結果ごとに図 4(c) に示す。この天体はシリケートダストの光学特性で説明できないほど、超過比のばらつきが大きい。この天体は、Spitzer で観測した 2005 年、あかりで観測した 2006 年、WISE で観測した 2010 年で、円盤のフラックスが変化していたのであれば、説明が可能である。ダスト量が数年で変化し

たことは、巨大衝突など最近のイベントを示唆する。

## 5 Conclusion

主星から数 AU に位置するデブリ円盤の時間進化、特性を議論するため、「あかり」全天サーベイデータと、IRSF 望遠鏡による追観測を組み合わせ、波長 18  $\mu\text{m}$  帯で超過放射を示すデブリ円盤を探索した。

その結果、主系列星 681 天体中、新検出の 9 天体を含む 53 天体のデブリ円盤を検出した。円盤の検出率は  $\sim 8\%$  で先行研究と矛盾がない。

検出したデブリ円盤について、超過比の年齢依存性を調べたところ、定常進化モデルでは説明できないほど、年齢に対して超過比の大きい天体が存在した。

円盤を単一リングの黒体放射で説明を試みたところ、このモデルでは説明できない天体が存在した。この内 5 天体は、シリケートの光学特性を考慮することで説明できた。シリケートの存在は、散逸のタイムスケールが短い 1  $\mu\text{m}$  以下の小さいダストの存在を示す。また 1 天体は、観測時期によって超過放射が変動したと考えると説明できる。

定常進化モデルで説明できない円盤が存在すること、散逸のタイムスケールの短いダストが存在する円盤が存在すること、ダスト放射の数年での変化が示唆されること、は非定常プロセスの存在、すなわち巨大衝突など最近の衝突イベントの存在を示唆する。

## Reference

Kobayashi, H., T., Lonhene, 2013, MNRAS, 422, 3266  
 Kobayashi, H., Tanaka, H., 2010, Icar, 206, 735  
 Kurucz, R. L., 1992, in 149, IAU Symp., 225