

星周ダストの赤外線観測

岡本美子 (茨城大理)

要旨：最近の赤外線天文学の進展に伴い、各種天体におけるダストスペクトルの詳細な観測が行われるようになってきた。この講演では、最近の赤外線観測に基づく若い星の星周ダストについての理解の概要について述べる。

星は、分子雲コア内の物質が自己重力によって落下し、中に形成した降着円盤を通して物質を集めて誕生する。この降着円盤は、系の角運動量の reservoir であり、また惑星系形成の現場であると考えられる。この円盤の中では、ダストが合体成長し、微惑星を形成、さらにそれらが衝突合体を繰り返して原始惑星を形成すると考えられている。またこれらの固体物質は、円盤の中でダスト状態で、あるいは微惑星に取り込まれたあとに、物質的にも変化していると考えられる。最近では赤外線天文観測が進み、系外の原始惑星系円盤やデブリ円盤についてダスト物質の観測を詳細に行うことが可能になってきた。これによって、系外惑星系形成での物質進化を、隕石や太陽系天体に基づく太陽系形成論と比較できる段階にきた。

これまでの惑星系形成シナリオにおいて星周ダスト観測で検証すべきなのは、

- ・ダスト成長の検出：ダストサイズから微惑星までの成長がどのように進むか
- ・円盤でのダストの物質進化・熱史：太陽系での物質進化との比較
- ・惑星系形成に伴う円盤構造進化
 - 特に惑星形成領域となる内側部分の構造と理論（N体計算他）との比較

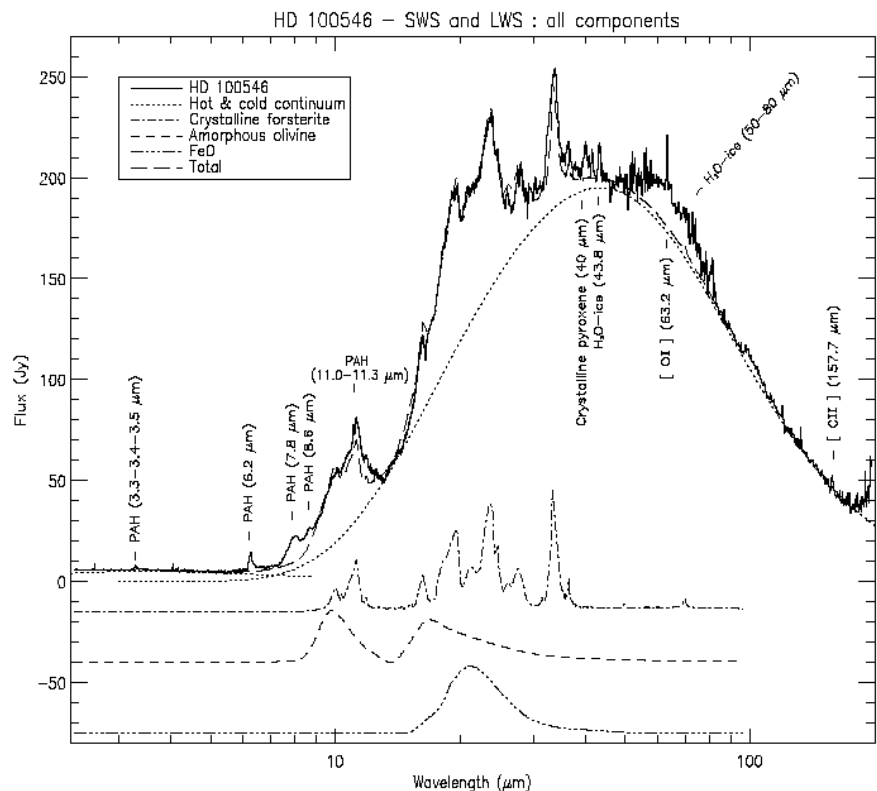
などであろう。赤外線ダスト分光観測は、これらの理解に有意義である。というのは、多くのダストが赤外線特有のバンドスペクトルを示し、温度的にも赤外線域で強く放射を行うからである。中でもシリケートダストについては、様々な天体で強く検出され、

また実験室分光のデータが豊富にそろっていることから研究が進んでおり、波長分散

(R)数百の分光観測によって、ダストの性質（鉱物種、組成、サイズ、結晶性、温度など）を調べることが可能である。

シリケート観測の歴史をざっと見ると、1990年代までとそれ以降ではかなり劇的な変化があった。1990年代前半までは、シリケート観測に有用な中間赤外線観測の波長分散はせいぜい100程度であった。この頃には、若い星の周りの星周円盤にシリケートがあること、シリケートは星間物質や原始

図1 Herbig Be型星HD100546のISOによる赤外線スペクトル。



惑星系円盤の段階では9.7 μm にピークを持つ幅の広いフィーチャを示し非晶質らしいが、一部の彗星やダスト超過の著しいベガ型星であるが、*か座* 星などでは9.7 μm のフィーチャに加えて11.2 μm のサブピークを示し結晶性のオリビンが存在すること、がわかっていた。そのため、シリケートダストの結晶化が、円盤の中で惑星系形成が進むことと関連があるのではないかと考えられ、実験室ではシリケートの加熱による結晶化実験やスペクトルデータの取得が進んだ。また、太陽系彗星の一部に結晶化シリケートが見られる点については、太陽系外縁部の低温な領域で形成され、大量の氷を含む彗星が、なぜ高温(>~1000K)でないと生成されないシリケート結晶を含むのかについては、大きな謎とされ、様々なモデルが提案された。1990年代後半になると、欧州の赤外線宇宙天文台(ISO)が、赤外線全域について、大気吸収に邪魔されない質のよいスペクトルデータを大量にもたらした。ここでの波長分散は数百以上に改善され、ダストスペクトルの詳細な解析が可能になり、天体鉱物学(astromineralogy)と呼ばれる新しい分野を切り開いた。さまざまな新しいダストバンド放射を発見したが、中でも、原始惑星系円盤であるHD100546に著しい結晶化シリケート放射を発見したことが、星周ダスト分光の観点からは重要であった。HD100546は、10ミクロン帯のほかにも、20-40ミクロン領域にたくさんの結晶化 forsterite のバンドピークが見られ(前頁図; Malfait et al. 1998)、しかもそのスペクトルはハールポップ彗星のものに酷似していた。これによって、若い星の星周円盤ダスト分光の機運がさらに高まり、稼動し始めた地上8m級大口径望遠鏡や、次の世代の宇宙赤外線望遠鏡によるダスト分光観測がさらに進むようになった。以下、我々のグループの観測の結果を中心に最近の円盤シリケートダストについての理解について紹介する。

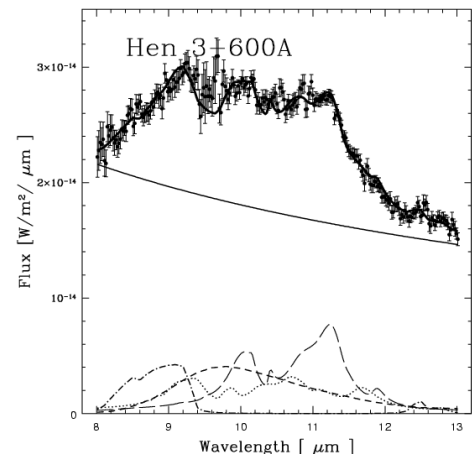
1. 結晶化シリケートサーベイと結晶化の年代

我々のグループでは、星周円盤の10ミクロン帯分光を Herbig Ae/Be 型星(中質量星周の原始惑星系円盤)や T Tauri 型星(太陽質量程度の星の原始惑星系円盤)について行い、結晶化シリケートの有無を調べる研究を進めてきた。その結果、原始惑星系円盤段階でも数十%の頻度で結晶化したシリケートが存在することがわかってきた。特に、T Tauri 型星である Hen 3-600 では、S/Nの良いスペクトルに複数の結晶化シリケートピークが顕著に現れており、太陽程度の小質量星の周りでもシリケートの結晶化が起きていることを初めて示した(右下; Honda et al. 2003)。

同様の赤外線衛星(ISO, SST)による観測なども含めて最近の結果を見渡すと、やはり原始惑星系円盤段階でもすでにかの天体で結晶化シリケートが現れていることから、シリケートが結晶化するような加熱イベントは、円盤の比較的初期にすでに起こったと考えられる。また、観測されているスペクトルへのモデルフィットから、結晶の存在度を求めることができるが、原始惑星系円盤段階では結晶化度の年齢依存性ははっきりは見えていない。これは加熱イベントが初期に起こってしまっただけに終わっていることによるのか、あるいは観測効果として、「見えるフィーチャ」の中の結晶化度が一定になるようなメカニズムが働いているのかについてはまだ不明である。

一方、さらに進化が進んだ段階についてもサーベイが行われている。我々のグループでは、ベガ型星では、*か座* 星につづく二例目として HD145263 に結晶化シ

図2 すばるで観測した T Tauri 型星 Hen 3-600 の中間赤外線スペクトル(黒点)。非晶質シリケート(細かい破線)と結晶質 forsterite (荒い破線)など5成分でモデルフィット。



リケイトを検出した(Honda et al. 2004; 右図)。この星の結晶化シリケイトの特徴は、結晶に起因する 11 ミクロンフィーチャのピークが 11.4 μm 付近にある点で、これはほとんどの天体で、シリケイトの結晶に起因するスペクトルは 11.2 μm 付近にピークが来るほぼ Mg-rich forsterite に起因する事実とは異なる。HD145263 の場合、バンドピークは Fe を含む olivine である fayalite 起源の可能性がある。ベガ型星のダストは原始惑星系円盤からの生き残りではなく、小天体に取り込まれた後に二次的に放出されつつあると考えられているので、HD145263 では、小天体が内部で熱変性を起こして Fe を含む結晶を生成したのかもしれない。

2. ダスト成長 (Honda 2005; Fujiwara et al. in prep)

10 ミクロン帯のシリケイトダスト放射のうち、特に非晶質な成分については、そのバンドのピークと形が粒子サイズによ

って変化する。感度があるサイズ範囲は 0.1 ミクロン~数ミクロンである。小さいものは 9.7 μm 付近に単ピークがある三角形に近いバンドフィーチャを示すが、サイズが大きくなると、ピークが長いほうにシフトしながら平坦になってゆき、数ミクロンサイズでは台形的なフィーチャに変化する。我々の円盤シリケイト放射スペクトル観測の結果からは、幅の狭いものから広いものまであり、円盤によって、フィーチャを示すダストサイズが異なっていることを示唆する。一方、シリケイトフィーチャ強度と円盤の活動性(H 線光度、円盤質量)との相関を調べると、円盤活動が弱まっている円盤ほどフィーチャ強度が下がる傾向がある。これは、円盤の進化が進むにつれて、フィーチャ放射をするようなミクロンサイズ以下のダストが減少していることを示している可能性がある。

3. 円盤内のシリケイト分布

上で観測されているようなシリケイトは、では動径方向にどのように分布しているのだろうか。特に結晶化やサイズ成長は、どの動径範囲で起こるのかによって、原因となる加熱メカニズムやダストの合体成長のタイムスケールを制限する。しかし実はこのような観測は非常に高い空間分解能での観測を必要とするため簡単ではなく、ようやくデータが出始めてきたところである。

原始惑星系円盤では、中間赤外線干渉計(MIDI)を用いた観測によって、円盤中心部と円盤全体のスペクトルを比較した研究について最近報告された。それによれば、結晶化シリケイトのスペクトルが見られた Herbig Ae/Be 型星で、円盤の中心部 (<5AU) ではより結晶化フィーチャの割合が高いことが示された(van Boekel et al. 2004; 右図)。つまり、原始惑星系円盤では、シリケイトダストの加熱イベントはごく中心部で起こっている可能性が高い(少なくとも

図3 すばるで観測したベガ型星 HD145263 の中間赤外線スペクトル(下)。Hen3-600 に比べて肩が長波長によっている。

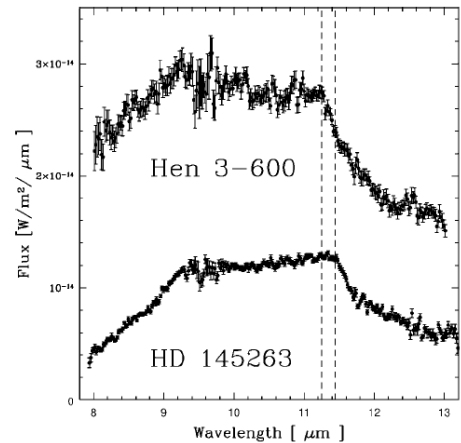
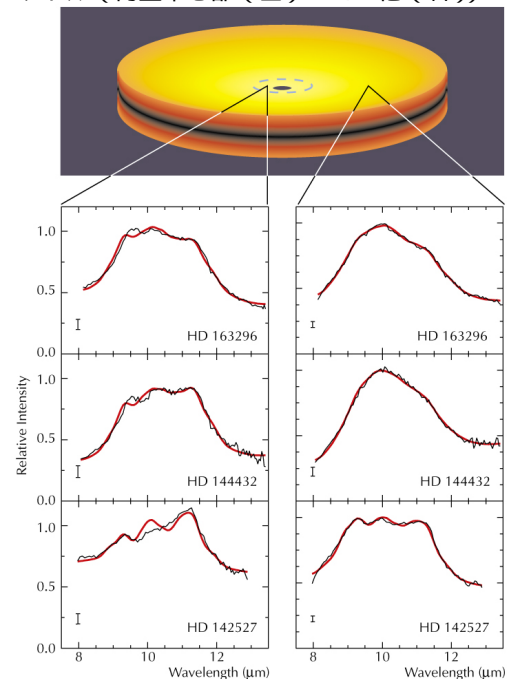


FIG. 1.—Observed 8–13 μm spectrum of the Vega-like star candidate HD 145263 (lower spectrum) together with the T Tauri star Hen 3-600A (upper spectrum) for comparison (Honda et al. 2003). Large scatter in the 9.3–9.9 μm region is due to the atmospheric ozone absorption. HD 145263 shows the 11.44 μm shoulder, while Hen 3-600A shows the 11.24 μm forsterite feature.

図4 Herbig Ae/Be 型星の MIDI による赤外線スペクトル(円盤中心部(左)とその他(右))



Mid-IR Spectra of Inner and Outer Discs Around Three Young Stars



も中心部で強く起こっているのだろう)。一方で、太陽系彗星の結晶化シリケートサーベイ観測も進んできている。それによれば、従来結晶が検出されてきたオールト雲起源彗星だけでなく、カイパーベルト起源彗星にも結晶化シリケートが存在することがわかってきた(Stansberry et al. 2004; Watanabe et al. in prep)。太陽系彗星結晶化シリケートを説明するモデルとしては、大別すると、円盤中心部の星に近いところで生成された後に円盤外部まで運ばれたとするものと、中心星のX線フレア活動や降着活動によって円盤内で衝撃波が発生し加熱された、とするものがある。うち、後者については、せいぜい~10AU付近までしか加熱できないと考えられている。オールト雲天体の生成領域は木星軌道の内側、カイパーベルト天体はその場だと考えられているので、彗星の結晶化シリケートは、円盤中心部で生成されたものが拡散輸送などによって外部に運ばれたものかもしれない。

我々のグループでは、ベガ型星であるがが座 星の円盤で、シリケートの空間分布の詳細な観測を行った。15AU程度の分解能で得たスペクトルを場所ごとにモデルフィットを行い解析したところ、円盤内のシリケートは種類によって異なる分布をしていることが明らかになった。これを示したのが下図である。がが座 星の場合、結晶化シリケートや、数ミクロンサイズの非晶質シリケートは中心集中している一方で、サブミクロンサイズの非晶質シリケートは中心ではむしろ減少し、特定の動径に集中している。後者は、放射圧によって~十年のタイムスケールで観測された領域から外部に吹き飛ばされてしまうサイズであり、おそらく、集中が見られる動径位置で放出されたものであろう。つまり、その場に、ダストを今でも活発に放出している場所があると考えられ、おそらくは帯状に分布した微惑星に対応しているものと考えている。そこで放出されたダストのうち、ミクロンサイズのはポインティングロバートソン効果によって円盤中心へと落ちていき、中心部で加熱され、結晶へと変性するものと考えられる(Okamoto et al. 2004)。本結果は、惑星が形成されるような、数十AUよりも内側でのダスト分布とその供給源の分布を明らかにできた点で画期的だった。

このように、ダストの空間分布を、そのサイズ・種類・結晶性ごとに明らかにすることで、円盤で起こった熱史、物質進化史、あるいはダイナミクスまで分かっていくことが最近の研究で示されつつある。現在のところ観測装置の空間分解能は、円盤サイズと比べてぎりぎりのところにあるが、今後も我々のグループでは同様の空間分解観測をまずは現存の装置群で続けてゆきたいと考えている。さらに次世代の望遠鏡では、このような系外惑星系形成におけるダストの空間分布の理解が、惑星系形成を理解するための大きな鍵となると期待している。

なると期待している。

References

Honda et al. 2003, ApJ, 585, L59
 Honda et al. 2004, ApJ, 610, L49
 Honda et al. 2005, Thesis in Tokyo Univ.
 Malfait et al. 1998, A&A, 332, L25
 Okamoto et al. 2004, Nature, 431, 660
 Stansberry et al. 2004, ApJS, 154, 463
 Van Boekel et al. 2004, Nature, 432, 479

図4 すばるで観測したがが座 星の円盤におけるシリケートの分布。

