

惑星形成研究への招待

片岡章雅

〈国立天文台科学研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: aki.kataoka.astro@gmail.com



惑星形成研究において、原始惑星系円盤の観測結果がここまで無視できないものになるとは、誰も予想していなかったのではないのでしょうか。ALMA望遠鏡によって明らかとなった惑星形成の現場は、リング・ギャップといった副構造に満ちており、更には形成中の周惑星円盤まで見えるようになってきました。これらは理論研究も刺激し、惑星形成の研究はまさに黄金期を迎えているといつてよいでしょう。本稿では、本分野の盛り上がりにも触れながら、私が進めてきたダスト合体成長と原始惑星系円盤のミリ波偏光観測について紹介し、今後の分野の展望も議論していきます。

1. はじめに

私が天文学の研究を志したのは大した理由はありません。2008年の夏、当時京大の学部2年生だった私は、夏休みが暇だと思ってネットサーフィンをしていたら、たまたま国立天文台野辺山の学部生向け実習を見つけ、運よく実習を受けさせてもらえました。野辺山実習では、45 m望遠鏡を用いて星形成領域DR21のアンモニア輝線観測を行い、電波天文の面白さを知りました。量子力学も知らないのに、その後、すばる実習にもお世話になり、京大ではひので衛星データによる太陽研究の課題演習を経て、4年生後半からなんとなく理論研究を志し、当時京大助教だった野村英子さんのもと惑星形成の研究をスタートしました*1。

もしこれを読んでいるあなたが学部生で、現在進路に悩んでいるとすれば、まずはよく調べて、この天文月報までたどり着いたものだと思います。素晴らしいです。時代によって研究に必要とされる能力は異なり、その完全な予測は難しいものの、望遠鏡の計画など予測可能な未来もあります。

す。また、天文に限らずどの分野の研究も非常に魅力的であり、本稿は他の分野をけなすものではありません。その代わりに、惑星形成研究がいかにか面白いか、今後も更に面白そうかについて語りますので、ご参考にしていただければ幸いです。

本稿では、惑星形成分野の現在の一般像に触れつつ、私の研究が貢献した部分及び今後の展開についてお話ししていきます。なお、私の研究の中核をなす成果の解説については、以前執筆した2つの天文月報記事を参照していただきたいと思います [2, 3]。また、本稿で紹介する研究成果は、私の主著論文 [4-10] 及び森智宏さん [11, 12]、植田高啓さん [13, 14]、大橋聡史さん [15-17]、辰馬未沙子さん [18]、土井聖明さん [19] らがリードした論文を基にしています。

2. 惑星形成の大問題：惑星ができない

惑星形成研究の何が面白いのか？人によって答えは違うと思いますが、私の答えは「簡単に考えると惑星ができない」というところにあると思っています。まず、惑星形成を宇宙における固体の

*1 天文学を志す人が全員こんな偶然で研究内容を決めているわけではありません。研究分野の決め方に悩んでいる人には、総研大で僕の3年先輩に当たる富田賢吾さんの研究奨励賞受賞記事 [1] をお勧めします。

サイズ成長過程だと捉え、その初期状態と最終状態を考えましょう。宇宙にある固体は、漸近巨星分枝星（AGB星）の周りや超新星爆発においてミクロンサイズのダストとして誕生します。これが初期状態です。一方で最終状態は、太陽系や太陽系外惑星の観測で明らかとなったように、数千キロメートルにも及ぶ固体惑星やガス惑星コアです。すなわち、惑星形成とは、 $1\mu\text{m}$ から 1000 km までの、サイズで12桁・質量で36桁にも及ぶサイズ成長の過程だと捉えることができます。

しかしそこには「サイズ成長の壁」がいくつも存在します。ちょっと想像してみてください。そのへんに落ちていた小石と小石をぶつくとくっつくでしょうか？ おそらくくっつかないでしょう [20]。あるいは、氷の塊を 100 m/s の速さでぶついたら、どうなるでしょうか。多分粉々になってしまいます [21]。もしこの理解が宇宙でも正しく、小石程度、すなわちセンチメートルサイズのものがこれ以上付着成長できないとすれば惑星は形成されません。惑星形成理論はこのような壁を突破せねばならないのです*2。

惑星形成研究が更に面白いのは、天文観測によってまさにこのダスト成長の現場を捉えて直接観測し、理論の検証ができる点です。原始惑星系円盤と呼ばれる天体は、若い原始星の周りに誕生します。特に観測しやすい円盤としては、太陽系の近くにはおよそ $100\text{--}150\text{ pc}$ あたりに、年齢数百万年程度の比較的若い星形成領域が十個程度存在しており、それぞれの領域に円盤が $100\text{--}300$ 天体ほど存在しています [25]。これらの天体において、ダストの質量はどの程度で、どう分布してい

て、サイズや組成がどうなっているかを観測から導くことができれば、それは直接惑星形成を観測し、理論を検証することになるわけです。

3. ALMA でわかった円盤の全体像

では、近年急速に明らかとなってきた、原始惑星系円盤の全体像について触れたいと思います。図1は、Class IIと呼ばれる原始惑星系円盤のダスト質量分布関数です。これらの円盤のダスト質量は、中央値が10地球質量程度だとわかります*3。なお、ここで測っている質量は、ミクロンからミリ・センチメートルのダストの質量です。なぜなら、ダストはそのサイズが波長より大きくなると、急速にオパシティが下がるため、メートルサイズやキロメートルのサイズの天体がどれだけあってもミリ波の明るさにはほとんど寄与しないからです [5, 32]。最も単純に考えれば、今観

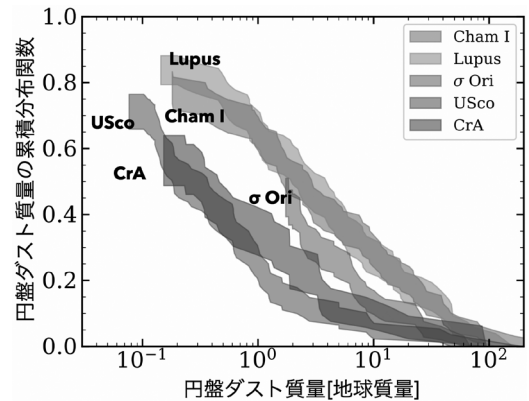


図1 星形成領域ごとのClassII原始惑星系円盤のダスト質量の分布関数 [26]。領域と引用論文は以下の通り。Chameleon I [27], Lupus [28], σOri [29], Upper Scorpius [30], Corona Australis [26]。

*2 解決策の一つとして、ダストの付着成長時に隙間を持ったダスト集合体の構造を持つことを考慮した研究も行われています。その結果、いくつかの成長の壁が自然に突破できることも明らかになりました [4, 22-24]。

*3 干渉計を用いた原始惑星系円盤の観測的研究は、野辺山ミリ波干渉計を用いた研究が先駆的でした [31]。当時の円盤観測では、数百auの半径・ガス質量が0.1太陽質量もあるような異様に大きく重い円盤というイメージが付いたかもしれませんが、これらは明るい~10天体の情報です。ALMAの登場による感度向上で、各領域ごとに~100天体の質量中央値を出すことができ、円盤の全体像が明らかとなったのです。

測されているこれらのダストが、将来惑星へと成長するでしょう。実際、系外惑星の固体質量の分布と原始惑星系円盤のダスト質量分布を比較する研究も可能になってきました [33, 34].

このような全体像に加えて、明るく大きな天体に対しては高解像度観測もなされています。HL Tauに代表されるように、原始惑星系円盤では、リング・ギャップ構造が一般的であることもわかってきました [35]. ただし、それがすべての円盤に当てはまるわけではなく、「明るい天体についてはリング構造が多い」という観測バイアスには留意すべきでしょう。今後は、これまで詳細がわかっていなかった小さな円盤の研究も進んでいくことでしょう。

ここから、惑星形成の理解を更に一步進めるにはどうすべきでしょうか。研究者によって掘り下げる方法は全く違いますが、我々はダストサイズやその付着成長過程に着目して研究を進めています。

まず、ダストサイズはどう惑星形成の大問題に関わるでしょうか。ダストのダイナミクスは、ダストの大きさに強く依存します [36]. そもそも、円盤の運動は質量の大部分を占めているガスに支配されています。ガスは動径方向に圧力勾配があるため、わずかにケプラー回転より遅い速度で回転しています。その中でダストは、マイクロメートルくらい小さければガスと一緒に動き、ミリメートルやメートルサイズのように大きければガスと独立に運動しようとしています。その結果、例えばダストサイズがミリメートルサイズであれば、円盤寿命以下で中心星に落ちてしまうため何らかのせき止めが必要です。ミリメートルサイズでダスト成長を止めるメカニズムも必要です [37]. また、ミリメートルダストがあるとすると何らかの不安定性により微惑星形成を駆動する可能性があります [38]. これらの物理はダストサイズに非常に敏感なため、観測的にダストサイズを見積もることは惑星形成を強く制限します。更に発展

させて、もしダストの組成や空隙の情報までわかれば、組成による壊れやすさや空隙による成長促進の議論へと発展していきます [4, 22]. このように、観測からダストサイズを決定することは、惑星形成におけるダストの物理の重要な制限に繋がります。

これまでのミリ波観測において、ダストはミリメートルくらいの大きさであろうと言われていました [39]. 波長1 mmと3 mmの円盤の明るさを比較することでそのSED (Spectral Energy Distribution; 天体全体のエネルギースペクトル)の傾きを導きます。このSEDの傾き、すなわちスペクトル指数は、通常の星間ダストかつ光学的に薄い放射を仮定すると、3.7程度であることが知られています [40]. 円盤ではこの値が1.5-3.0程度であり、明らかにSEDの傾きが浅くなっています。これを説明するには、ダストのオパシティの傾きが緩やかである必要があり、そのためにはミリメートルやセンチメートルダストが必要である、というロジックです。本分野ではこの理解は未だに支持されています [41]. これに対し我々は、ミリ波偏光という全く違うアプローチを用いて挑んでいます。

4. 見逃されていたミリ波ダスト散乱

ここで、一見全く関係なさそうに思える偏光観測について考えてみましょう。偏光とは、横波である電磁波において、進行方向に垂直な電場が何らかの法則性をもって同期している状態です。原始惑星系円盤における偏光は、赤外線の波長でよく観測されてきました。例えば、すばる望遠鏡に取り付けられたHiCIAOは、赤外偏光観測によって原始惑星系円盤のスパイラル構造を発見しました [42]. その一方で、ALMAが使うミリ波のような長波長では赤外散乱偏光と同様の手法が使えないこともわかっていました。これは、中心星が長波長に行けば行くほど暗くなるからです。さらには、ミクロンサイズのダストの散乱効率率は長波

長では極端に下がるため、散乱はほとんど無視できます。このような理由で、ミリ波の散乱偏光は、全く検討されていませんでした。

しかし、ミリ波におけるダスト散乱偏光は全く無視できるものではないとわかったのが我々の研究です [6]。ここまで述べてとおり、ミリ波の散乱偏光は (1) 中心星が暗くて光源がない、(2) ダストの散乱効率はミリ波では低いという2つの問題がありました。(1) については、ダストの熱放射が別のダストに散乱されることを考慮して解決しました。とあるダストに対し、別のダストの熱放射が等方的に入射すれば、その散乱光は無偏光となります。しかし、非等方に入射すれば、その非等方性に応じて偏光が残ります。我々はこれをダスト熱放射の自己散乱と名づけました*4。(2) については、ダストの大きさを考慮することで解決できます。多くの天体で、ダストは暗にミクロンサイズが仮定されます。散乱は、波長とダストサイズが同程度のときに強くなるため、ミリ波におけるダスト散乱は無視できます。ところが原始惑星系円盤では、ダストは付着成長し、おそらく波長と同程度のサイズを持つダストが多く存在します。とすれば、散乱は無視できないわけです。

我々は輻射輸送計算を行い、(ダスト半径) \approx (波長) $/2\pi$ 程度であれば、1-3%程度の偏光を出すことを突き止めました。図2は、期待される偏光度に比例する無次元量を、ダストサイズの関数として書いたものです。偏光パターンは偏光観測波長での輻射場の非等方性に対応して異なりますが、例えばある程度傾斜角がある円盤であれば、偏光ベクトルは短軸に並行になります。このような、円盤の観測者との相対的な幾何学で偏光ベクトルが決まるようなメカニズムは、散乱以外では考えにくいでしょう。そのため、短軸に並行な偏

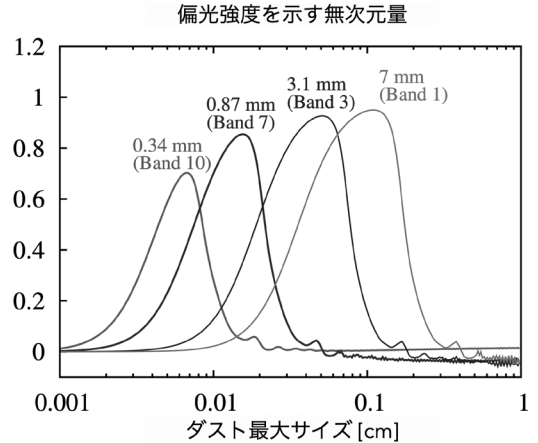


図2 原始惑星系円盤の熱放射の自己散乱に起因する偏光強度の予測。数字は、ALMAにおける観測波長と対応するバンドを示す [6]。

光パターンが見つければ、散乱偏光だと思って良いでしょう。

ALMAによって、初めて複数の円盤でミリ波偏光が検出されました [8, 9, 45-49]。その結果、図3に示すとおり、ここまで議論してきた散乱偏光が多くの天体で検出されました。しかし、驚くべきことに、多くの散乱偏光は、波長0.9 mmの観測で見つかりました。これは、単純に考えれば、ダスト半径がおよそ $\sim 100 \mu\text{m}$ 程度であることを示しています。もちろん、観測バイアスもあるでしょうが、本当にダストサイズがミリメートルやセンチメートルサイズだったなら、波長0.9 mmでは全く偏光が受からないはずでした。更に、HL TauではALMAのバンド3, 6, 7の3波長帯 (3.1, 1.3, 0.9 mm) で偏光が検出され、散乱偏光成分は0.9 mmで最も強く、3.1 mmに行くにつれて急激に弱くなることもわかりました [9]。これは、1990年代からの常識であった「円盤ダストサイズはミリメートル」という常識とは異なる結果です。これが、ミリ波偏光観測によ

*4 非等方輻射場における散乱偏光という物理自体は広く知られており、例えば宇宙背景放射のE-mode偏光 [43] や超新星爆発の三次元構造の推定 [44] に利用されています。

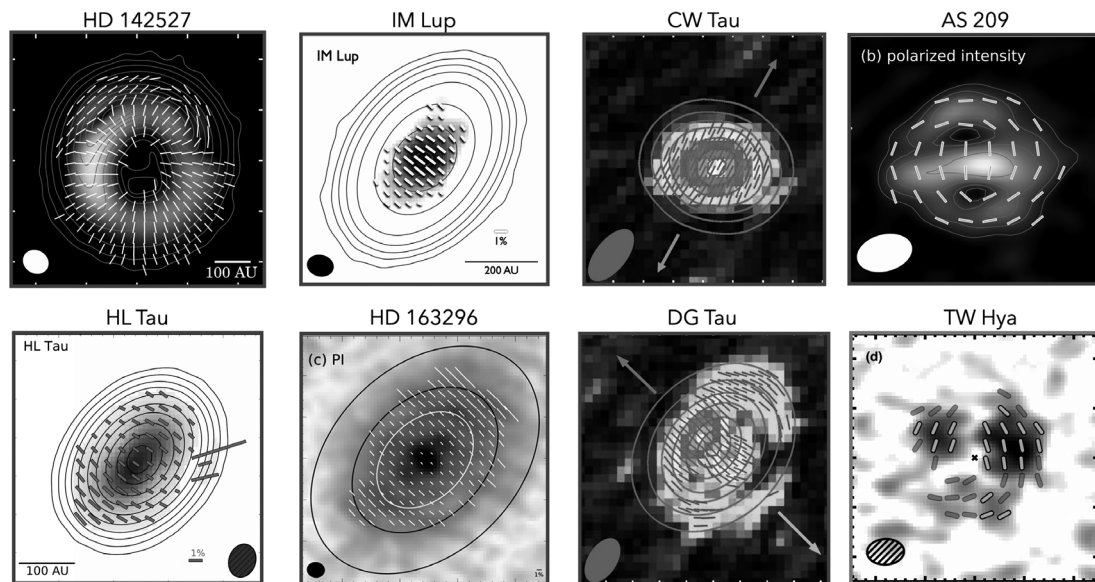


図3 Class II円盤の偏光観測の例。図上の線分は偏光ベクトルの向きを表す。CW Tau及びDG Tauの矢印はジェット
トの方向を表す [7, 11, 45, 46, 49-51].

てもたらされた惑星形成に関する最も大きな知見と呼べるでしょう。

5. ダストの種は壊れやすいのか？

偏光が検出された天体のミリ波放射は、主に $100\ \mu\text{m}$ サイズのダストから放射されていることがわかりました。もし、多くの原始惑星系円盤でのダストサイズが、これまでの理解のセンチメートルやミリメートルではなく、 $100\ \mu\text{m}$ しかないのであれば、惑星形成におけるダスト成長の理解を大幅に更新しなければなりません。しかし我々は、結論を過度に一般化する前にこれまでの偏光観測について天体ごとにしっかりとモデリングすることを試みました。特に、本当にミリメートルサイズダストの可能性を排除してよいのかについて検討してきました。

5.1 IRS 48

一部の天体は、ダスト連続波が方位角方向に偏っていることが知られています。観測されてきた穴あき円盤の中では24%ほどにこのような非軸対称性が確認されています [52]。さて、HD

142527やIRS 48は、このような偏った分布を持つ円盤の代表的な天体です。これらの天体は偏光も観測されており、どちらも自己散乱由来の偏光が検出されていると考えられています [8, 15]。さて、それではこれらの天体の典型的なダストサイズは、本当に $100\ \mu\text{m}$ なのでしょうか。ここではIRS48のモデリングについて紹介します [17]。従来センチメートルサイズのダストを仮定してモデリングされていたのは、SEDの議論が主な理由です。この天体はVLAの9 mm帯でデータが取得されており、波長9 mmでもダスト熱放射が明るいことがわかっています。通常、このような長波長で明るいSEDを説明するには、大きいダストが有利です。これは、大きいダストのほうがオパシティの波長依存性がゆるく、長波長で明るい成分を説明しやすいためです。しかし、図4に示すとおり、ALMAによって自己散乱由来の偏光が検出されました。これは、センチメートルダストが支配的だとすると再現できません。この研究では、ダストの量を多くして、0.9 mm帯で光学的厚さが7程度の非常に重たいダストを用意す

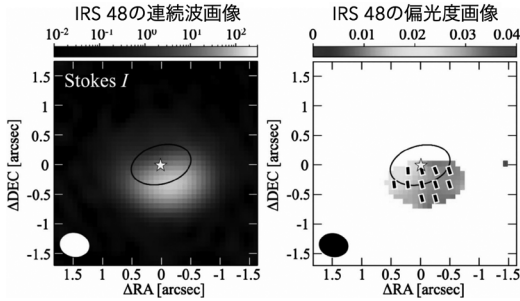


図4 IRS 48の偏光観測結果 [17]. ALMA Band 7にて偏光度1%程度の偏光が検出され、ミリ波自己散乱でよく説明できる。

ると、100 μm サイズであっても、SEDと散乱偏光を同時に説明できることを示しました。すなわち、IRS48については、100 μm が確からしいといえます。

5.2 HD 163296

別の天体ではどうでしょうか。例えば、リング・ギャップ構造は偏光観測の解釈を変えないのでしょうか。多くの偏光観測は、わずか0.1–3.0%程度の偏光を検出するために高い感度の観測が必要であり、結果的に高い空間分解能の観測は少なくなっています。図5に示すように、HD 163296はこれまでの偏光観測の中で唯一リング・ギャップ構造を捉えられる高空間分解能で行われています。HD 163296円盤は、67 au 及び100 au にリング構造が確認されている天体です [53]。Band 7で行われた偏光観測は、リングよりもギャップのほうが高い偏光度を示しています [49]。これはどういうことでしょうか。ダストサイズをパラメータとしてモデリングを行った結果、リングは光学的に厚くダストサイズは完全には制限できない一方で、ギャップは100 μm 程度のダストが存在しないといけないことがわかりました。ただし、偏光の分解能はぎりぎりリング・ギャップ構造を分解したものであり、空間分解できていない構造をより詳細に考慮する必要は残されています。すなわち、この天体も、100 μm サイズが確からしい一方で、光学的に厚いリングの

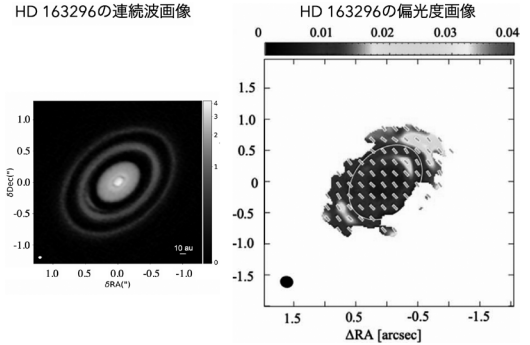


図5 HD 163296の高解像度連続波画像と偏光観測結果の比較 [16, 49, 53]。リング・ギャップ構造における偏光度の違いが検出されている。

中にはミリメートルやもっと大きなダストが隠されている可能性があります。

5.3 HL Tau

では、光学的に厚い構造を考えればすべてうまくいくのでしょうか。本当にミリメートルダストは光学的に厚い構造の裏に隠せば解決するのでしょうか。物事はそう簡単ではないようです。例えばHL Tauは多波長連続波観測と偏光観測がなされており [9, 45, 54]、このような解析に適しています。ここで、ダストの鉛直分布を考えてみましょう。ミリメートルダストが仮に光学的に厚い円盤の赤道面に滞留していたとします。もしもガス乱流が強ければ、ミリメートルダストは上空に巻き上げられて、ミリ波放射を支配し、その結果偏光は弱くなってしまいます。そのため、光学的に厚い分布で偏光とSEDを同時に説明するためには、乱流は十分弱くないといけません。図6に示すように、もし鉛直方向のダストサイズ分布を考えると、ミリメートルサイズのダストが存在すれば、乱流が強ければミリ波放射を支配することがわかります。HL Tau円盤の中心付近のSEDと偏光を解析した結果、ミリメートルサイズのダストを赤道面に留めるためには、乱流強度は $\alpha_i < 10^{-5}$ と制限できました [14]。これは非常に強い制限です。観測的には、輝線の非熱的広がりを検出しようとする観測が多くありますが、これまで1天体

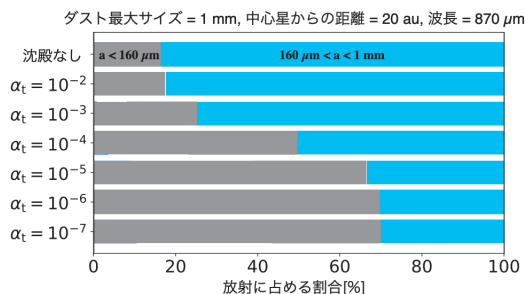


図6 HL Tauの偏光観測の解析結果。灰色が160 μm 以下のダスト、青が160 μm 以上1 mm以下のダストの、ミリ波光度に貢献する割合を表す。乱流が強ければ大きいダストも巻き上げられてしまい、大きなダストをミリ波光球面より下に「隠せ」ない[14].

を除き検出されておらず、多くの天体で $\alpha_t < 10^{-3}$ と制限されています [55]. 理論的には、円盤は磁気回転不安定性により乱流状態であると考えられてきましたが、これまでの観測的制限から、磁気回転不安定性が働かないデッドゾーン等である可能性もあります。ただし、例えば磁気回転不安定性が働かないとしても、流体不安定性である鉛直シア不安定性 (Vertical Shear Instability) が働くと考えられるため [56], $\alpha_t < 10^{-5}$ のような弱乱流強度を達成するのはやはり困難です。そうだとすれば、やはりミリメートルダストを赤道面に「隠す」ことすら難しいのかもしれませんが。

5.4 個別研究のまとめ

ここまで3つの研究で見てきたとおり、ミリメートルサイズのダストの存在を許すためには、リングのような副構造が光学的に厚いと考え、ミリ波の光球面の下にミリメートルサイズのダストを隠すのがよさそうです。しかし、これには非現実的に低い乱流強度が必要となります。個人的にはそれよりは、えいやっと100 μm ダストを仮定してしまったほうが簡単には思いますが、その結論を確かめるにはもう少し解析が必要そうです。

もちろん、スペクトル指数を用いたダスト研究も進展しています。TW HyaやHL Tauといった、明るく大きな天体は、空間分解したスペクトル指

数が得られています [54, 57]. 特に中間領域ではスペクトル指数が2.5程度であり、ミリメートルダストを考えることが最も適しています。大規模なサーベイ観測では、明るい天体の1 mmと3 mmの明るさを測定しそのスペクトルを導いています [41]. その結果、やはりスペクトル指数は1.5-3程度が支配的であり、ミリメートルダストを支持します。もちろん、空間分解できていない光学的に厚い成分を考える必要があるのは上で述べたとおりですが、完全にすべてを説明できるモデルはまだできていないというのが現状です。

6. ダストマイクロ物理の進展

ここまでダストの散乱偏光とその惑星形成への示唆について話してきましたが、ここでミリ波偏光の別の可能性についても触れておきます。これまでの偏光観測では、散乱だけでは説明できない偏光成分も検出されています。これらの偏光成分は、偏光ベクトルの向きが波長に依存しないことから、ひしゃげたダストが何らかの方向に整列し、その偏光成分を見ていると考えられています。銀河系や星形成領域では、ダストは磁場に整列しているため、この偏光を用いて磁力線の方向が調べられてきました。ところが、原始惑星系円盤では様子が違います。まず、通常円盤で磁場整列の可能性はないでしょう。HL Tauは3 mm波帯で、円盤の回転方向に平行な偏光を見せています [9]. もしこれが磁場整列であれば、磁場は円盤において動径方向を向いていなければいけません。しかし、円盤の磁場は基本的には回転方向にキリキリ巻になるトロイダル成分が卓越していると考えられるため、磁場整列は除外できます。理論的にも、ダストが大きいと磁場整列にかかる時間が長くなり、他の整列メカニズムが卓越するという直感とも一致しています。輻射場の方向に整列する可能性が指摘されてきましたが、現象論的に最も確からしいのは、ガス流体の流れ場に整列しているという案です [11, 12]. ただし、それ

にはそもそも超音速な流れ場が必要であると指摘されたり [58], ダストとガスの速度差のベクトルの向きを考えると説明できないとも考えられます [10]. すなわち, 整列由来のダスト偏光は, まだメカニズムがわかっていないといっただいでしょう. これは, まだ理解できておらず, ダストミクロ物理の理解が偏光観測によって更に発展する可能性を含んでいると言えます.

7. ngVLA時代への期待

これからの時代はどうなっていくのでしょうか. ALMAが稼働し始めて10年が経過しました. 波長1 mmでの円盤全体像と明るい天体の構造はわかり, ある程度メインの観測は成熟したといっただいでしょう. 一方で, ALMAは運用開始後に機能が追加されています. 例えば, 偏光観測は開始されて5年程度です. おそらく, 偏光観測の結果は今後も次々と出てくるでしょう. また, 複数天体に対して長時間観測をするラージプログラムが稼働しており, DSHARP (Disk Substructures at High Angular Resolution Project) やMAPS (The Molecules with ALMA at Planet-forming Scales) の成果が出ています [59, 60]. 今後10年ほどでは, 偏光観測・輝線観測・多波長連続波の結果を利用して, ガス・ダストの全体像や, 化学的成果, ガスダイナミクスなどにより円盤の多彩な顔が明らかになっていくでしょう.

この分野で最も期待されている将来望遠鏡計画の1つがngVLAです. 2024年頃に建設開始, 2030年代中盤の本格運用を目指し, 米国を中心に世界の天文学コミュニティが協力しながら検討が進められています*5. この望遠鏡は, 円盤の熱放射が見える波長3 mm及び7 mm帯で飛躍的に感度が上がることが期待されます. すると, 現在の1 mm波帯を中心とした観測では見通せない, 円盤中心領域におけるダストの描像がわかってき

ます. これは, 太陽系形成領域に対応しており, 地球のような惑星の形成環境がわかるようになるでしょう. また, サーベイ観測では, 現在1 mmでしかわからない全体像が, 3 mm, 7 mmでもわかるようになり, スペクトルの全体像がわかるようになります. 1 mmから7 mmまでの偏光が連続スペクトルとして取得できれば, いよいよダストの大きさだけでなく, 空隙や組成も強く制限されるようになるでしょう. このように, 今後も観測からの知識の更新があり続けるという意味でも, 天文観測を考慮した惑星形成分野はますます発展し続けていくと期待しています.

このような非常に活発で魅力的な惑星形成分野の発展を中から楽しみつつ, 私自身の研究がこの分野の発展に寄与するよう, 今後とも研究に精進していきます.

8. 研究者と家族

天文月報2021年11月号にて, 「天文学会男女共同参画20年の歩み」という記事があり, その中で天文学会の男女共同参画事業についてまとめられていました [61]. そこには, 年会一時保育に関連して「(保育サービスを利用した男性会員が)「助けてほしいと言えなかった」と言って加藤万里子さんに怒られたという逸話も残っている」との記述もありました. そこで, この場を借りてほんの少しだけ, コロナ禍での各種研究会のオンライン開催でどれだけ救われたかを書かせていただきます.

私は現在35歳で, 幸い2人の子供に恵まれました. 2020年4月以降, コロナ禍で強制的にすべての研究会がオンラインになったことで, これまで月1-2度あった国内外の出張がすべてなくなり, パートナーに過度な負担をかけずに研究会に参加することができました. 子ども自身も, 普段と同じ保育園に通えることで負担は減ったようで

*5 <https://ngvla.nao.ac.jp/> より引用

す。私に限らず、育児・介護といった家族の事情によりケア責任者となった人たちは救われた人が多かったと想像します。

オンライン研究会が安価かつ手軽に可能となったことは、学会運営側にとってもメリットが大きいです。先の月報の記事によれば、天文学会の年会保育サービス利用者は、900名程度の学会参加者に対して6-10家族程度だそうです。すなわち、100人以下の小規模研究会では、潜在的保育サービス利用者はせいぜい1家族いるかないか程度であり、その状態での保育サービスの提供は効率が悪いと言わざるを得ません。すなわち、このような声を挙げる人は研究会では必然的に個人単位になってしまいます。オンライン研究会であれば、ケア責任者も普通の保育・介護サービスを利用しながら研究会に参加することができ、学会運営側も追加負担なくケア責任者が参加できる運営が可能でしょう。

一方で、もう一步変わってくれば更にありがたい例はあります。例えばですが、つつい「研究会の真の価値は飲み会だ」と言っていないでしょうか。「時間を取って対面で喋る」メリットが大きいのは同意しますが、飲み会に参加できない／したくない研究者を排除していないでしょうか。例えばこの問題は、口頭講演をツメツメにしたプログラムを作成するのではなく、研究会中にコーヒータイムや議論時間をとることで解決しないものでしょうか。また、研究会を土曜日や祝日、あるいは午後6時以降の通常保育等のサービスが使えない時間に開催することで、研究者本人やそのパートナーが犠牲になっていないでしょうか。

私は、決してすべての研究会をオンラインにすべきと言っているわけではありません。自分自身も、コロナ禍になる前に対面での議論がキャリア形成に大きく影響したと感じていますし、コロナ禍における大学院生やPDの方の機会喪失はなんとしても補完すべきものだと認識しています。オ

ンライン参加のように、技術の発展に伴って、コロナ禍が過ぎ去った後も多くの人が研究会に参加し続けられるよう、うまい落としどころが見つかることを願っています。

一人の研究者にとって、ケア責任者である期間は一時的であるケースが多いと思われます。ケア責任者がドロップアウトせずに済む天文学業界となっていくことを期待いたします。

9. 最後 に

ここまで、偏光を中心とした原始惑星系円盤のALMA観測に触れつつ、惑星形成への観測的制限がいかに面白く発展してきているかについて触れてきました。限られたスペースでは触れることはできませんでしたが、このほかにも面白い研究の展開が期待できます。例えばダストの空隙率進化を利用した成長の壁の突破理論はまだまだ発展していますし、偏光を用いることで初めて空隙率の制限も可能となりました [62]。更には、はやぶさ2等の探査ミッションのおかげで、太陽系天体との物理量の比較も可能となりました [18]。また、円盤の観測に関しても、散乱による連続波の減光を用いてもやはりダストサイズは数百マイクロメートルであるとわかってきました。これ以外にも、原始惑星系円盤の連続波観測から間接的に乱流とダストサイズの比を測る取り組みもしています [19]。

詳細な研究そのものが面白いとつつい忘れがちになってしまうのですが、結局この研究が惑星形成という分野の大問題に対してどう位置づけられ、どう貢献するかは常に意識せねばなりません。惑星形成の現場を直接見れるという面白さを活かして、今後とも惑星形成研究の発展に貢献できるよう研究していきます。

謝 辞

この度は2020年度日本天文学会研究奨励賞という名誉ある賞をいただき大変光栄に思います。

ここまでの研究を支えてくださったすべての方に感謝申し上げます。修士時代の指導教員である野村英子さん・博士時代の指導教員である富阪幸治さん、ドイツPD時代のCornelis Dullemondさんをはじめ、ダストN体計算においては田中秀和さん、奥住聡さん、和田浩二さんに、偏光理論・観測においては塚越崇さん、武藤恭之さん、永井洋さんら、ほかにも数えきれない人々にお世話になりました。私より更に若い共同研究者にも恵まれ、大橋聡史さん、植田高啓さん、辰馬未沙子さん、土井聖明さんらには、面白い研究をリードしていただいています。また、本原稿の締め切りについて、育児休業を理由とした締切延長をご快諾いただいた編集委員の皆様にも感謝いたします。

参考文献

- [1] 富田賢吾, 2018, 天文月報, 111, 750
 [2] 片岡章雅, 2017, 天文月報, 110, 333
 [3] 片岡章雅, 2014, 天文月報, 107, 278
 [4] Kataoka, A., et al., 2013, A&A, 557, L4
 [5] Kataoka, A., et al., 2014, A&A, 568, A42
 [6] Kataoka, A., et al., 2015, ApJ, 809, 78
 [7] Kataoka, A., et al., 2016, ApJ, 820, 54
 [8] Kataoka, A., et al., 2016, ApJ, 831, L12
 [9] Kataoka, A., et al., 2017, ApJ, 844, L5
 [10] Kataoka, A., et al., 2019, ApJ, 874, L6
 [11] Mori, T., et al., 2019, ApJ, 883, 16
 [12] Mori, T., & Kataoka, A., 2021, ApJ, 908, 153
 [13] Ueda, T., et al., 2020, ApJ, 893, 125
 [14] Ueda, T., et al., 2021, ApJ, 913, 117
 [15] Ohashi, S., et al., 2018, ApJ, 864, 81
 [16] Ohashi, S., & Kataoka, A., 2019, ApJ, 886, 103
 [17] Ohashi, S., et al., 2020, ApJ, 900, 81
 [18] Tatsuuma, M., et al., 2019, ApJ, 874, 159
 [19] Doi, K., & Kataoka, A., 2021, ApJ, 912, 164
 [20] Zsom, A., et al., 2010, A&A, 513, A57
 [21] Blum, J., & Wurm, G., 2008, ARA&A, 46, 21
 [22] Okuzumi, S., et al., 2012, ApJ, 752, 106
 [23] Kataoka, A., et al., 2013, A&A, 554, A4
 [24] Kobayashi, H., & Tanaka, H., 2021, ApJ, 922, 16
 [25] Hernández, J., et al., 2007, ApJ, 662, 1067
 [26] Cazzoletti, P., et al., 2019, A&A, 626, A11
 [27] Pascucci, I., et al., 2016, ApJ, 831, 125
 [28] Ansdell, M., et al., 2016, ApJ, 828, 46
 [29] Ansdell, M., et al., 2017, AJ, 153, 240
 [30] Barenfeld, S. A., et al., 2016, ApJ, 827, 142
 [31] Kitamura, Y., et al., 2002, ApJ, 581, 357
 [32] Miyake, K., & Nakagawa, Y., 1993, Icarus, 106, 20
 [33] Manara, C. F., et al., 2018, A&A, 618, L3
 [34] Mulders, G. D., et al., 2021, ApJ, 920, 66
 [35] ALMA Partnership, et al., 2015, ApJ, 808, L3
 [36] Nakagawa, Y., et al., 1986, Icarus, 67, 375
 [37] Pinilla, P., et al., 2012, A&A, 545, A81
 [38] Johansen, A., et al., 2007, Nature, 448, 1022
 [39] Beckwith, S. V. W., & Sargent, A. I., 1991, ApJ, 381, 250
 [40] Planck Collaboration, et al., 2014, A&A, 564, A45
 [41] Tazzari, M., et al., 2021, MNRAS, 506, 2804
 [42] Muto, T., et al., 2012, ApJ, 748, L22
 [43] Rees, M. J., 1968, ApJ, 153, L1
 [44] Tanaka, M., et al., 2021, ApJ, 754, 63
 [45] Stephens, I. W., et al., 2017, ApJ, 851, 55
 [46] Hull, C. L. H., et al., 2018, ApJ, 860, 82
 [47] Sadavoy, S. I., et al., 2019, ApJS, 245, 2
 [48] Harrison, R. E., et al., 2019, ApJ, 877, L2
 [49] Dent, W. R. F., et al., 2019, MNRAS, 482, L29
 [50] Bacciotti, F., et al., 2018, ApJ, 865, L12
 [51] Teague, R., et al., 2021, ApJ, 922, 139
 [52] Francis, L., & van der Marel, N., 2020, ApJ, 892, 111
 [53] Isella, A., et al., 2018, ApJ, 869, L49
 [54] Carrasco-González, C., et al., 2019, ApJ, 883, 71
 [55] Flaherty, K., et al., 2020, ApJ, 895, 109
 [56] Nelson, R. P., et al., 2013, MNRAS, 435, 2610
 [57] Macías, E., et al., 2021, A&A, 648, A33
 [58] Yang, H., et al., 2019, MNRAS, 483, 2371
 [59] Andrews, S. M., et al., 2018, ApJ, 869, L41
 [60] Öberg, K. I., et al., 2021, ApJS, 257, 1
 [61] 馬場彩, 2021, 天文月報, 114, 688
 [62] Tazaki, R., et al., 2019, ApJ, 885, 52

Invitation to Planet Formation Research

Akimasa KATAOKA

National Astronomical Observatory of Japan,
 Division of Theoretical Astronomy, 2-21-1
 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: ALMA has revealed that planet formation sites are full of substructures such as rings and gaps and that even circumplanetary disks are in the process of formation. These phenomena have stimulated theoretical studies, and planet formation is entering a golden age. In this article, I will introduce the theory of dust coagulation and ALMA polarization observations that I have been working, and discuss the future prospects of the field.