

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成30年度

受付番号 201860160

氏名 小野 智弘

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地 (派遣先国名) 用務地: プリンストン大学 (国名: 米国)
2. 研究課題名 (和文) ※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。
原始惑星系円盤上の巨大渦から解き明かす円盤進化と惑星形成過程
3. 派遣期間: 平成 30年 10月 1日 ~ 令和 2年 3月 31日
4. 受入機関名及び部局名
プリンストン大学宇宙物理科学専攻
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

【研究実施状況】

本研究課題では、原始惑星系円盤 (以下、円盤) における微惑星形成過程の解明を目指した。微惑星はメートル-キロメートルサイズの天体であり、マイクロメートルサイズの固体微粒子 (ダスト) が円盤内で惑星に成長する際の間状態だ。微惑星形成は惑星形成における重要な未解明課程であり、その理解のためには多くの理論的困難を乗り越える必要がある。最新の研究によって、円盤中にダストを集積・濃縮する機構があれば微惑星形成を説明することができると指摘されるようになってきた。

一方で、円盤観測の発展は近年著しい。円盤がリング・スパイラル・三日月といった特徴的な構造を持つことが ALMA 望遠鏡等などの最新機器による観測によって明らかにされてきた。特に、リング構造は円盤中に普遍的に存在する。このような構造を持つ円盤は、流体不安定性によってガス渦が形成されやすい環境である。ガス渦は周囲のダストを集積・濃縮するため、ガス渦中での微惑星形成に期待が集まっている。しかし、ガス渦中での微惑星形成について調べた研究は今まで行われてこなかった。

本研究課題では、ガス渦中での微惑星形成を理解することを目的として研究を行ってきた。目的達成のために、18ヶ月間で6つの小研究(1) Athena++コード開発への貢献、(2) ガス渦移動に関する研究、(3) ガス渦によって生成される円盤構造の発見、(4) ガス渦による速度摂動の観測可能性についての理解、(5) 新しいガス渦散逸機構の発見、(6) ストリーミング不安定性非軸対称モードの解析に取り組んできた。以下では、それぞれの小研究における研究実施状況を報告する。

(1) Athena++コード開発への貢献

本研究課題では Athena++コードを用いた数値流体計算が主な研究手法であった。Athena++コードは2016年に公開された、輻射磁気流体計算コードである。長らく業界の標準的な数値流体計算コードであった Athena コードを最新の思想に基づいて完全再設計したものであり、次世代の標準コードとして注目されている。受入研究者である Stone 教授をリーダーとする国際研究ネットワークによって、Athena++コードの開発は日々精力的に行われている。研究員もその国際研究ネットワークに参入し、Athena++コードの開発に貢献した。研究員が担当したのは、(i) 軌道移流法の実装と (ii) ローカルシアリングボックスの改良である。これらの機能を実装することは本研究課題を遂行する上で不可欠であった。

(i) 軌道移流法の実装

円盤に関して数値流体計算を行う際、問題となるのが速い回転速度である。円盤の回転速度はほぼケプラー回転であり、一般的には音速に比べて十分速い。そのため、数値計算の時間刻みが小さくなり、莫大な計算コストが必要となる傾向がある。それを緩和するのが、軌道移流法である。軌道移流法では速いケプラー回転成分と遅いその他の成分を別々に解くことで流体計算の高速化を実現する。研究員は軌道移流法を Athena++コードに実装した。軌道移流法の実装には演算子分割法が用いられる。しかし、従来のコードで用いられていたのは 1 次の演算子分割法であった。これでは、1 次精度でしか結果が得られない。研究員は 2 次の演算子分割法を用いて、軌道移流法を Athena++コードに実装した。これによって、軌道移流法を用いた計算であっても 2 次精度を保証することができるようになった。また、研究員が実装した起動移流法は格子細分化法を用いた数値計算に対しても適応している点においても新しい。

(ii) ローカルシアリングボックスの改良

ローカルシアリングボックスは円盤を局所近似した系であり、円盤内で起こるスケールの小さい物理現象を調べる際に広く活用される。ローカルシアリングボックスを数値計算で扱うためには、シア一周境界を実装する必要がある。シア一周境界は既に国際研究ネットワークを通して Athena++に実装されていた。しかし、その実装は冗長で不十分なものであった。得られる結果の精度は低く、質量やエネルギーといった保存則を破ることがあるという問題を抱えていた。研究員はシア一周境界で用いられる機能の大半が軌道移流法と共通していることに着目し、シア一周境界の実装と軌道移流法の実装の大部分を統合することで冗長性を解消した。また、流体フラックスを修正するルーティンを組み込むことで、ローカルシアリングボックス内の数値計算においても保存量が良く保存されるようにした。さらに、入念なテスト計算によって最適化を行い、精度を大幅に改善することに成功した。

上記の 2 点に関して、研究員が主導して開発を行った。これによって、円盤計算にかかる数値計算コストが減少し、ローカルシアリングボックス中での精度の良い計算が可能となった。研究員が行った改善を内包した Athena++コードは今後のアップデートで公開される予定である。また、これらの結果をまとめ、国際科学誌に論文を投稿することを Stone 教授と検討している。

(2) ガス渦移動に関する研究

円盤中のガス渦は円盤上にスパイラル状の密度波を励起させる。密度波を介して円盤と角運動量を交換することで、ガス渦は中心星方向に移動していく。ガス渦中での微惑星形成を実現するためには、渦移動がダスト成長に比べて長いタイムスケールで起こることが必要となる。渦移動の速さは渦のサイズや形状によって変化することが知られているが、その依存性を理論的に説明した研究は過去になかった。ガス渦と同様に、惑星は励起された密度波を介して角運動量を円盤と交換すること動径方向に移動する。研究員は惑星移動に関する先行研究を参考に、渦移動について調べた。

(1)で改良した Athena++コードを用いて、2次元数値流体計算をローカルシアリングボックス内で行った。ガス渦に伴う密度波を解析し、密度波によって運ばれる角運動量のフラックスを計算した。ガス渦のサイズ・形状を変化させながら角運動量フラックスの大きさを調べることで、渦移動の性質を定量的に理解するに至った。結果として、極端に大きなガス渦でない限り渦移動のタイムスケールは十分に長いことが明らかになった。以上の結果を国際科学誌で発表するべく、論文の投稿準備を行っている。

(3) ガス渦によって生成される円盤構造の発見

遷移円盤は中心に穴を持つ原始惑星系円盤である。遷移円盤の穴を形成するメカニズムの候補としては惑星円盤間重力相互作用・光蒸発・円盤風が挙げられているが、まだ決着はついていない。一部の遷移円盤において、三日月状構造の存在が確認されている。三日月状構造を説明するモデルとして最も有力なのは巨大ガス渦である。(2)の結果から、一般的に巨大ガス渦の渦移動は非常に速い。しかし、円盤が穴を持つ時、渦移動は穴の外縁で大きく減速することが期待される。研究員は(1)で改良した Athena++コードを用いて、穴をもった円盤上での巨大ガス渦の挙動を 2次元数値流体計算で調べた。

予想された通り、巨大ガス渦の移動はギャップの外縁近辺で大きく減速した。しかし、渦移動が完全に止まることはなく、巨大ガス渦がギャップを埋めながらゆっくりと内側に落下していくことが新たに分かった。さらに、穴の中に複数のリング構造が出現した。これは、ガス渦によって励起された密度波が共鳴現象を起こすことによって現れたのだと考えられる。一方、穴の中に惑星を置いた場合は、リング構造は現れないことが分かった。そのため、穴の中にリング構造が存在するかどうかで、穴の成因が惑星かどうかを判別できると期待される。以上の結果を国際科学誌で発表するべく、論文の投稿準備を行っている。また、三日月構造を持つ遷移円盤において、穴の中にリング構造があるかどうかを調べるための観測提案を ALMA 望遠鏡に対して行うべく準備を勧めている。

(4) ガス渦による速度摂動の観測可能性についての理解

分子線の観測によって、円盤ガスの速度構造を知ることができる。近年の観測で、ガスの速度場がケプラー回転に対して局所的に乖離する天体が複数見つかった。この速度乖離を説明するモデルとしては、円盤内に存在する惑星によるものが考えられてきた。惑星円盤間重力相互作用の結果、惑星近傍では円盤の速度場が大きく乱されるからである。しかし、ガス渦も局所的な速度乖離を引き起こす。しかし、ガス渦が引き起こす速度乖離について調べられた研究は過去になかった。

研究員は(1)で改良した Athena++コードを用いて3次元数値流体計算を行い、ガス渦と惑星それぞれによって引き起こされる速度乖離を調べた。結果として、ガス渦による速度乖離は惑星の場合に比べて空間的に広がっており、乖離の方向が逆であることが分かった。このことから、円盤分子線の観測で速度乖離の方向を検出することで、速度乖離の原因が惑星であるかガス渦であるかを特定できると期待される。また、ガス渦による速度摂動を観測で検出するためには、ある程度大きく強いガス渦が必要であることが分かった。本小研究はプリンストン高等研究所の Fung 研究員との共同研究である。以上の結果を国際科学誌で発表するべく、研究員が筆頭著者として論文の投稿準備を進めている。

(5) 新しいガス渦散逸機構の発見

ガス渦は円盤中の乱流が強い場合、粘性散逸によって破壊されることが知られている。一方、乱流が弱い場合は、渦は常に長時間存在できると考えられていた。研究員とプリンストン高等研究所の Fung 研究員は、円盤中の冷却過程によってガス渦が破壊されることを新たに発見した。乱流が弱いことを仮定し2次元数値流体計算を行い、ローカルシアリングボックス中のガス渦がどのように進化するのかを調べた。円盤が等温的もしくは断熱的である場合、ガス渦は散逸せず長時間存在できる。一方で、等温と断熱の中間状態にある場合、ガス渦は素早く散逸することが分かった。現在、この新しい渦散逸機構を理解すべく、Fung 研究員と活発に議論を交わしながら解析を進めている。本性研究の結果は、Fung 研究員が筆頭著者として国際科学誌に論文を投稿する予定である。

(6) ストリーミング不安定性非軸対称モードの解析

ガス渦中での微惑星形成を考える上で大きな役割を果たすと考えられるのが、ストリーミング不安定性である。ガス渦によってダストが集積・濃縮されることでストリーミング不安定性が起こり、ダストが一気に成長することで微惑星形成に至る。ストリーミング不安定性の軸対称モードはこれまで精力的に調べられてきたが、非軸対称モードはほとんど調べられてこなかった。しかし、ガス渦は円盤から見て非軸対称な構造であり、非軸対称モードが重要になると考えられる。そこで、研究員はストリーミング不安定性の非軸対称モードについて線形解析を行い、非軸対称モードの成長について調べた。

線形解析の結果、一般的に非軸対称モードが持つ成長率が軸対称モードの成長率を上回ることが分かった。また、非軸対称モードの成長率は時間によって変化する。初期は成長段階であっても、時間が経つと減衰段階に移行することが明らかとなった。軌道方向の波長が長いものほど成長から減衰に転じるのにかかる時間が遅く、短いものほど早々に減衰を始める。そのため、ストリーミング不安定性が飽和を起した時に最も成長しているモードが実際に重要となってくる。言い換えれば、初期に与えられる摂動の大きさに依存して、非軸対称モードの成長が決定される。本小研究はロスアラモス国立研究所の Li 教授との共同研究である。以上の結果を国際科学誌で発表するべく、研究員が筆頭著者として論文の投稿準備を進めている。

【成果の発表】

研究員は9ヶ月間の在任期間で【研究実施状況】で述べた6つの小研究に取り組んだ。それぞれ結果は出ているが、詳細を詰める作業に時間がかかり、在任期間中に成果を出版するまでは至らなかった。小研究(2)・(3)・(4)・(6)についての論文を投稿準備中であり、早い段階で出版できると考えている。また、小研究(1)・(5)に関しても速やかに出版準備を進めていく所存である。

【関係学会への参加状況】

在任期間中に2つの研究集会①Athena++ Workshop 2019と②New Horizons in Planetary Systemsに参加した。①はその名の通り、Athena++コードのデベロッパー・ユーザーが一同に介したものである。そこにおいて、ユーザーの需要を吸い上げた結果【研究実施状況】(1)に取り組むこととなった。また、共通のコードを使用する研究者達との交流を通じて、研究員の知見を深めることができた。②は惑星形成に関わる広い領域を扱った大きな研究集会であった。少し領域が異なる研究について、最新の研究状況を共有できた。この研究集会における最大の収穫は、新たな共同研究を開始できたことである。その結果、小研究(2)にはビクトリア大学 Dong 助教授が参加し、ロスアラモス国立研究所 Li 教授と小研究(6)が新たに始まった。Dong 助教授は惑星移動のスペシャリストであり、その知見は渦移動を理解する上で大きな助けとなった。また、Li 教授は原始惑星系円盤におけるガス渦生成機構の一つであるロスビー波不安定性を発見した一人であり、ガス渦に対する造詣が深い。

【総括】

本研究課題の目的は、ガス渦中での微惑星形成を理解することであった。当初の計画では、ガス渦中でのダスト集積・濃縮を直接的に数値流体計算で明らかにする予定であった。しかし、在任期間中にその段階まで至れなかったことは痛恨の極みである。しかしながら、プリンストン大学で行った6つの小研究はどれも重要であり、将来的に微惑星形成を解明するための礎になると考えている。また、Athena++コード開発の国際研究ネットワークにしたことは研究員の今後のキャリアにとって大きな財産になると期待している。最後に、このような貴重な研究機会を与えていただいたことに感謝を申し上げる。