

星形成シミュレーションのこれまでとこれから

富田 賢吾

〈大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

e-mail: tomida@astro-osaka.jp



星形成過程の理論的研究ではさまざまな物理過程を取り入れた現実的な数値シミュレーションが可能になり、近年のこの分野における課題であった磁気制動問題がほぼ解決されたと言えます。一方、最近のALMAによる観測の進展により、原始惑星系円盤、特に若い原始星周囲の円盤の多様性と進化の様子が明らかになりつつあります。現在では観測と理論モデルの直接比較、特にsynthetic observationと呼ばれる輻射輸送計算により理論モデルを疑似的に「観測」して実際の観測と比較する研究が重要視されています。本稿ではこれらの星・円盤形成研究の最近の進展をまとめるとともに、その中でわれわれの取り組みを紹介したいと思います。

1. なぜ星形成を研究するのか

もう十年以上も前の話ですが、当時京都大学宇宙物理学教室の4年生であった私は大学院の進学先とこれからの研究分野を考えていました。その時に条件として考えたことは、1) が自分の意志で研究を進め主導的役割を果たせること、2) 自分の能力と志向に合致していること、3) 今後十年間で大きな進展が期待できること、4) 幅広い分野に関わる本質的で重要なテーマであること、でした。私は学生時代から計算機やプログラミングに多少興味があったので数値シミュレーションを用いた宇宙物理学の理論にしようというのは早い段階から決めていましたが、そこから先は院試の直前まで大いに悩み、多くの先生方に相談したり自分で情報収集をしたりして最終的に二つにまで絞り込みました。一つは星形成、もう一つは数値相対論でした。一見全く違う両極端のテーマに見えるかもしれませんが、高度な数値シミュレーションを駆使して複雑な問題に取り組むという点では共通していますし、星形成分野ではアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) が私の

大学院修了と同時期に稼働することが予定されており、数値相対論の分野では米国のAdvanced LIGOや日本のKAGRA等により重力波の観測が進むことが期待されていたから、どちらも魅力的なテーマに見えました。いろいろ悩んだ挙げ句に総合研究大学院大学に進み、国立天文台理論研究部で星形成の研究をすることに決めて今に至ります。この選択は正しかったと思っていますが、もし数値相対論の分野に進んでいたらそれはそれで面白かったのではないかと思いますし、その時併願で受験した、当時東京大学で数値相対論を研究されていた柴田大教授と今回同時に天文学会で受賞できたのも何かの縁かと思っています。

さて、私の思い出話はこれくらいにして、星形成研究の意義と面白さについて私見を述べたいと思います。まず星は電磁波で観測可能な宇宙の最も基本的な構成要素であり、星形成過程は宇宙全体や銀河の進化から惑星形成まであらゆるスケールの現象に関わる、言わば宇宙物理学のインフラストラクチャとも言える分野です。この分野は非常に長い歴史があり大枠のシナリオはある程度理解されている一方、初期質量関数や星形成効率の

形成が困難であるといういわゆる Magnetic Braking Catastrophe, 日本語で言えば磁気制動問題の存在が指摘されました^{12), 13)}. これは同時に, 円盤分裂による連星形成が困難であることも意味します¹⁴⁾. 現実に多数の星周円盤や系外惑星が観測さ

れており, また多くの星が連星で形成されることが知られている¹⁵⁾ ため, これは深刻な問題であり近年の星形成分野における重要な課題でした.

もちろんこの問題はそれまでの理論に何かが不足していることを意味しますから, 現実的な物理過程を考慮したさまざまな解決策が提案されました. 例えば, 星形成中のガスは非常に高密度かつ低温のため電離度が低く, 非理想磁気流体効果が強く働きます. このうち, オーム散逸 (通常の電気抵抗) と両極性拡散 (荷電粒子と中性粒子の相互作用が弱くなりガスの運動と磁場が分離する現象) は磁場を高密度領域から抜き取ることで磁場による角運動量輸送を抑制し, 円盤形成を可能にします^{16), 17)} (図1). 非理想磁気流体効果は高密度領域でのみ強く働くため, 星形成過程の初期あるいは分子雲コア外側の大きなスケールでは磁場による角運動量輸送は依然として効率的に働きます. その結果形成される円盤は初期には小さくなりますが, その後周囲から大きな角運動量をもったガスが降着して成長すると考えられます. また, 非理想磁気流体効果の一種であるホール効果は磁場の向きに応じて円盤回転を促進することも抑制することもあり, 円盤のサイズが大きいものと小さいものに二極化するなどたいへん興味深い現象です¹⁸⁾⁻²⁰⁾ (これについては塚本さんの天文月報記事²¹⁾ に詳しく説明されています). そのほかにも磁場と角運動量の方向のずれ²²⁾ や乱流の効果^{23), 24)} 等により角運動量輸送を抑制できることが示されました. これらの効果は必ずしも排他的なものではなく, 実際の星形成環境では複合的に働くと考えられます. これらの研究により磁気制動問題は大筋で解決され, 少なくとも円盤形成が不可能という程深刻ではないと最近では考えられています.

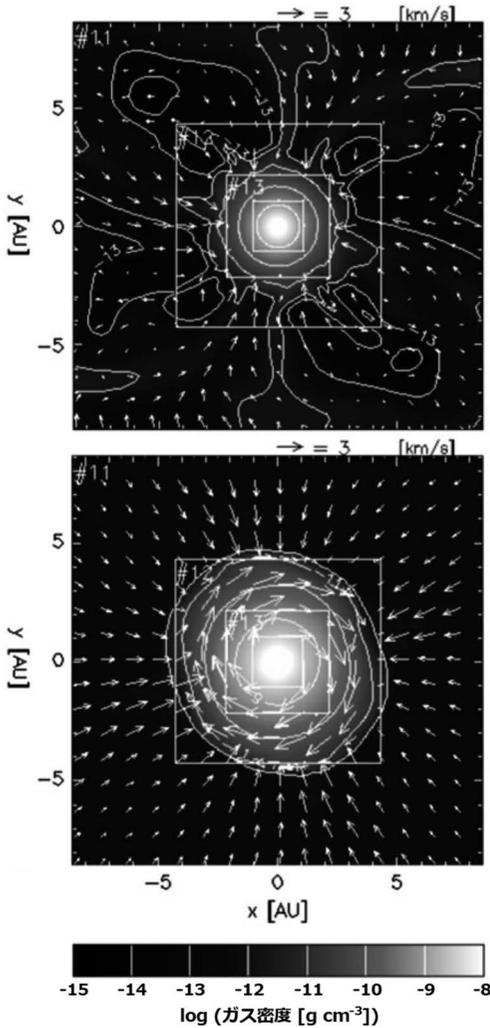


図1 理想磁気流体計算 (上) では磁場による角運動量輸送が強力に働いて星周円盤が形成されませんが, オーム散逸と両極性拡散を取り入れた非理想磁気流体計算 (下) では星形成過程の初期から回転する円盤が形成されます. 上図で周囲のガスが乱れているのは, 強い磁束が磁気浮力で浮上する磁気交換型不安定性と呼ばれる現象です.

が行われるようになりつつあります。

一方、後者の問題は理論屋としてはより深刻な問題です。原始星の近傍では重力ポテンシャルが深いため必然的にガスは高速で運動し、動的な時間スケールは短くなります。そのためシミュレーションの時間刻みが短くなってしまい、長時間高分解能のシミュレーションは非常に高コストになります。具体的に言えば、原始星半径まで分解したシミュレーションでは時間刻みは数分以下になり、残念ながら星形成過程が完了するまで計算を行うには現在のスーパーコンピュータでも数十万年かかる見積もりになります。これは計算機技術が少々進歩しても解決できない、本質的な困難です。この問題に対して、現状多くのグループで行われているのは、原始星近傍の高コストな領域を sink particle などと呼ばれるサブグリッドモデルで置き換えてしまう方法です。これにより原始星近傍の構造の情報は失われますが代わりに時間刻みを長く取ることができるようになり、また解像度も低く抑えることができるようになるため、計算コストを大幅に削減し長時間計算が可能になります。原始惑星系円盤の場合現在電波や赤外線で観測されるのは 10 AU 以上のスケールの領域ですから、例えば原始星から 1 AU 以内の小スケールの現象については妥協して全体の構造の進化を長時間計算するわけです。これは一見もっともらしく聞こえるかもしれませんが、危険な手法であるということをここであえて強調しておきたいと思えます。というのは、星・円盤形成過程のような重力に支配された現象では、中心近傍が最も大きなエネルギーをもっています。そのためこの領域の計算が正確でなければ全体に大きな影響を及ぼす可能性があります。これは数値シミュレーションの原理原則から言えばあまり健全ではなく、計算結果が物理的に妥当であることを常に確認しながら研究に用いなければなりません。数値シミュレーションはどんな問題でも計算機に放り込めば答えを教えてくれる銀の弾丸ではなく、む

しろ物理と計算手法の双方の理解を要する非常に繊細な技術なのです。

ともあれ、多少の不安要素はありますが、これらの技法を駆使することで数値シミュレーションと実際の観測を比較することができるようになります。特に ALMA によって数々の華々しい成果が上げられている今、このような研究の需要が高まっており国際的に活発な研究が進められています。

5. Elias 2-27 の星周円盤と大局的渦状腕の形成機構

ALMA により若い原始星周囲の星周円盤の多様性が次々に明らかにされていることは先に述べました。その中でも、2016年9月に Science 誌で Pérezらによって発表された Elias 2-27 周囲の原始惑星系円盤²⁹⁾ は非常に対称性の良い一対の大局的な渦状腕をもつたいへん興味深いものでした。Elias 2-27 は中心星質量が約 0.4 太陽質量と比較的低質量で、Class-II に分類されているやや進化の進んだ天体です。弱いながらも降着が続いていることや周囲に多量のガスが残留していること、HR 図上での進化トラックの比較から Class-II の中では最も若いものの一つであると考えられます（個人的な見解としては Class-I の後期に分類すべきと考えています。より過激なことを言えば、詳細は割愛しますが、星の進化とスペクトルによる Class 分類は必ずしも対応が良くないため Class による分類は年齢の目安程度に考えるべきです）。若い原始星の年齢の見積もりには不定性が極めて大きいので注意が必要ですが、ある原始星進化モデルによればその年齢は形成後 10 万年程度と見積もられています³⁰⁾。

渦状腕の起源を説明する理論モデルとしては重力不安定性³¹⁾ によるものや惑星または伴星による摂動などが考えられ、Pérezらの論文でも議論されています。Elias 2-27 周囲にはこれまでのところ渦状腕を説明する伴星または惑星は検出されておらず、また伴星や惑星による摂動では 2 本

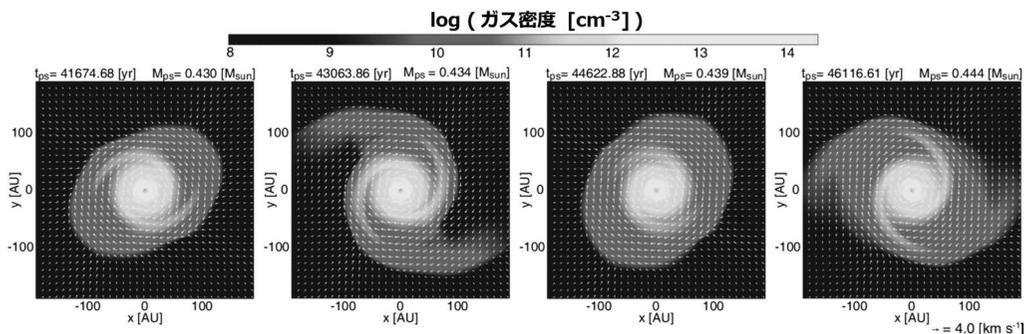


図2 磁気流体シミュレーションによる星周円盤の長時間進化. 重力不安定によって形成される渦状腕が顕著な状態と、角運動量輸送の結果安定化し渦状腕が見えにくくなる状態の間を繰り返し遷移します. 各パネル間の遷移の時間スケールはおよそ1,500年で、ちょうど渦状腕が立っている領域の軌道周期と同程度になっています.

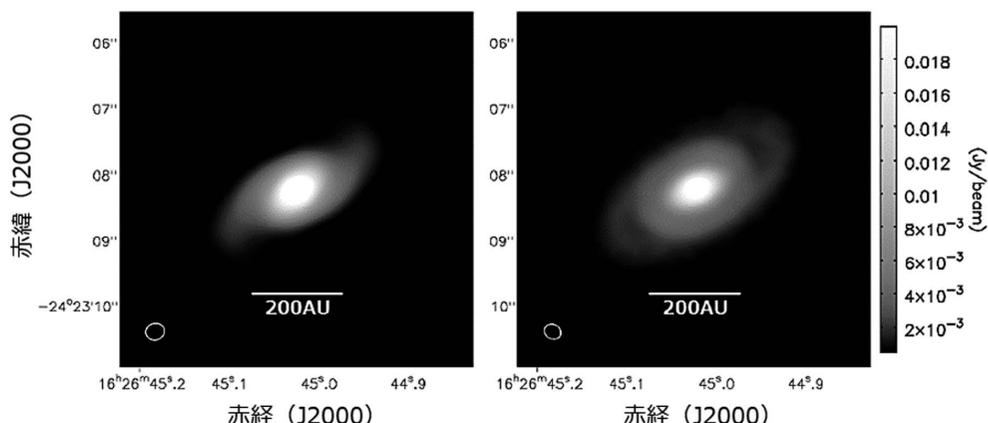


図3 磁気流体シミュレーションを疑似観測した結果(左)とALMAによる実際のElias 2-27の観測(右, <https://safe.nrao.edu/evla/disks/elias2-27/>)²⁹⁾. 星周円盤のサイズや明るさ、渦状腕が定性的にはよく再現されています.

トであるCASA³⁴⁾に含まれている観測シミュレータを用い、実際の観測と同等の分解能や観測時間、距離や見込み角を設定して「観測」することで観測と直接比較可能な「イメージ」を得ることができるのです。Pérezらの観測に合わせ波長1.3 mmのダスト連続波で約0.3秒角の分解能で「観測」した結果を図3に示します。観測に合わせて調整をしたわけではないのですが、円盤の輝度や2本の渦状腕の構造をおおよそ(天文学的には「良く」)再現することができました。これらの結果からわれわれはElias 2-27の渦状腕は重力不安定で形成された「実体」と整合的であると結論づけました³⁵⁾。

理論的な立場からは星形成過程の初期には大きな角運動量を持ったガスが大量に降着するため、少なくとも進化の初期に重い円盤が形成されることは自然な帰結です。また観測されている高い連星率を説明するのに、星形成の初期に連星系を形成し得る重力不安定な円盤が存在することは好都合です。ALMAの観測により前述のL1448 IRS3Bのように分裂しつつある円盤も観測されており、今後も同様の若い円盤の観測例は増えることが期待されます。その結果若い原始星天体の周囲に重い円盤が多数観測されれば、円盤が進化の初期に重い段階を経過するという理論的描像を支持する証拠になります。現に、若いClass-0天体のほう

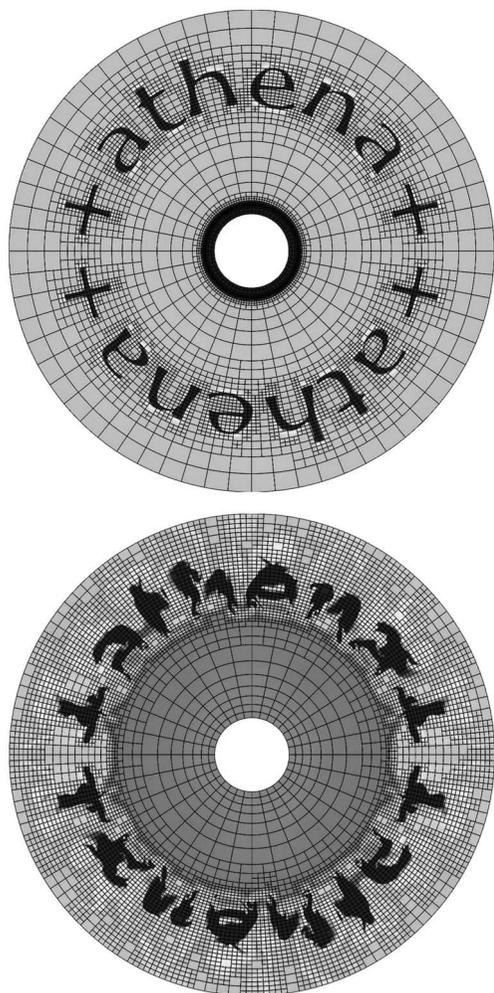


図4 Athena++のデモ計算。極座標の空間に冷たいガスで描かれた“athena++”の文字に中心から衝撃波をぶつける計算です。これ自体はお遊びですが、任意の座標系でのAMRに対応していること、ユーザーにより幅広い問題に対応できることを示すデモンストレーションになっています。

系をサポートすることを目指しており、現在公開しているバージョンでは磁気流体力学に加えて任意の座標系におけるAdaptive Mesh Refinement (AMR)、一般および特殊相対性理論、粘性や熱伝導、非理想磁気流体効果などをサポートしており、将来的には自己重力や輻射輸送も実装・公開される予定です。ユーザーが自身の計算を行いや

すいよう各種のインターフェイスが提供されており、初期条件や境界条件だけでなく加熱冷却項などのソース項を比較的容易に追加することが可能です（図4）。またMPI (Message Passing Interface) とOpenMP (Open Multi-Processing) を併用して高度に並列化されており、数十万プロセス以上の大規模並列計算にも問題なく対応できます。コードはすでにWebサイト（英語：<http://princetonuniversity.github.io/athena/>）日本語：<http://astro-osaka.jp/tomida/athena/>）で公開しており、ユーザーが自学できるようにドキュメントとチュートリアルも整備されています。国立天文台天文シミュレーションプロジェクトの協力を得て講習会も開催していますので、自身で流体シミュレーションをやってみたいという方や学生にやらせてみたいという方は是非お試しください。すでに国内外でこのコードを用いた論文が複数発表されており、われわれ自身でもこれを用いて原始惑星系円盤や分子雲形成など幅広い問題に取り組んでいます^{42)–44)}。今後もこのコードの開発と公開、サポートを通じてコミュニティに貢献していきたいと考えています。

謝辞

このたびは2017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光栄に思います。共同研究者の皆様や支えてくださった方々に深く感謝申し上げます。指導教員の富阪幸治教授、研究員時代の受入教員であったJames Stone教授、共同研究者の松本倫明教授、町田正博准教授、細川隆史准教授、奥住聡准教授をはじめとして、お名前を挙げるとここには書ききれないほどの非常に多くの方々にお世話になりました。また現在の筆者の研究を支えてくださっている大阪大学の長峯健太郎教授・岩崎一成博士と宇宙進化グループの皆さん、そしてAthena++コードの共同開発者の皆さんにも感謝します。本研究の数値シミュレーションには国立天文台・大阪大学・東北大

学・海洋研究開発機構などの共同利用計算機を利用しており、潤沢な計算機資源があったからこそ実現できたものです。この場を借りて心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Larson, R. B., 1969, MNRAS, 145, 271
- 2) 富田賢吾, 2013, 天文月報, 106, 442
- 3) Bate, M. R., 1998, ApJ, 508, L95
- 4) Toomre, A., 1964, ApJ, 139, 1217
- 5) Maury, A., et al., 2010, A&A, 512, A40
- 6) Segura-Cox, D., et al., 2016, ApJ, 817, L14
- 7) Tomisaka, K., 1998, ApJ, 502, L163
- 8) Tomisaka, K., 2002, ApJ, 575, 306
- 9) 富阪幸治, 2008, 天文月報, 101, 2
- 10) 町田正博, 2012, 天文月報, 105, 4
- 11) Blandford, R. D., & Payne, D. G., 1982, MNRAS, 199, 883
- 12) Allen, A., et al., 2003, ApJ, 599, 363
- 13) Mellon, R. R., & Li, Z.-Y., 2008, ApJ, 681, 1356
- 14) Hennebelle, P., & Fromang, S., 2008, A&A, 477, 9
- 15) Duchêne, G., & Kraus, A., 2013, ARA&A, 51, 269
- 16) Tomida, K., et al., 2013, ApJ, 763, 6
- 17) Tomida, K., et al., 2015, ApJ, 801, 117
- 18) Li, Z.-Y., et al., 2011, ApJ, 738, 180
- 19) Tsukamoto, Y., et al., 2015, ApJ, 810, L26
- 20) Wurster, J., et al., 2016, MNRAS, 457, 1037
- 21) 塚本裕介, 2017, 天文月報, 110, 3
- 22) Joos, M., et al., 2012, A&A, 543, A128
- 23) Santos-Lima, R., et al., 2012, ApJ, 747, 21
- 24) Seifried, D., et al., 2012, MNRAS, 423, 40
- 25) 徳田一起, 大西利和, 2015, 天文月報, 108, 11
- 26) Tokuda, K., et al., 2017, ApJ, 849, 101
- 27) Aso, Y., et al., 2017, ApJ, 849, 56
- 28) Tobin, J. J., 2016, Nature, 538, 483
- 29) Pérez, L. M., et al., 2016, Science, 353, 1519
- 30) Isella, A., et al., 2009, ApJ, 701, 260
- 31) Toomre, A., 1964, ApJ, 139, 1217
- 32) Lin, C. C., & Shu, F. H., 1964, ApJ, 140, 646
- 33) Dullemond, C. P., 2012, Astrophysics Source Code Library, ascl:1202.015
- 34) McMullin, J. P., et al., 2009, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 376, Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, eds. Shaw, R. A., et al., 127
- 35) Tomida, K., et al., 2017, ApJ, 835, L11
- 36) Jørgensen, J., et al., 2009, A&A, 507, 861
- 37) Hayashi, C., 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement, 70, 35
- 38) Meru, F., et al., 2017, ApJ, 839, L24
- 39) Evans, M. G., et al., 2017, MNRAS, 470, 1828
- 40) Forgan, D. H., et al., 2018, ApJ, 860, L5
- 41) Stone, J. M., et al., 2008, ApJS, 178, 137
- 42) Takasao, S., et al., 2018, ApJ, 857, 4
- 43) Iwasaki, K., et al., 2018, ApJ, submitted (arXiv: 1806.03824)
- 44) Ono, T., et al., 2018, ApJ, 864, 70

Simulations of Star and Disk Formation—Toward the Stellar System Formation Theory

Kengo TOMIDA

*Department of Earth and Space Science,
Graduate School of Science, Osaka University,
1-1 Machikaneyama, Toyonaka,
Osaka 560-0043, Japan*

Abstract: In theoretical studies of star and disk formation, the magnetic braking catastrophe was considered as a serious problem and solutions to it have been actively sought. Thanks to realistic numerical simulations including various physical processes, many solutions have been proposed and the catastrophe is resolved at least qualitatively. In observation, on the other hand, ALMA has been revealing the diversity and evolution of protoplanetary disks, especially disks around very young protostars. Now, in order to understand the formation of protostars and circumstellar disks, it is important to compare theoretical models and observations directly, and synthetic observations using radiation transfer calculations are playing an important role in the field. In this article I review recent progress in the star and disk formation both theoretically and observationally, and present our effort and contribution to the field.