

jh250076

# 現実的な原始惑星系円盤のガス散逸シナリオ構築に向けた多角的アプローチ

高棹真介（武蔵野美術大学）

## 概要

原始惑星系円盤におけるガス散逸過程の理解は、惑星が形成される物理条件を明らかにするうえで不可欠である。一方で、ガス散逸を駆動する星の紫外線・X線（XEUV）は、円盤より4桁以上小さな空間スケールをもつ星大気から放射されるため、この著しいスケール差が散逸シナリオに大きな不確実性をもたらしている。そこで我々は、星 XEUV モデルの基盤となる星大気加熱モデル、星近傍のガス分布を左右する星へのガス降着モデル、さらに星からの放射を受けて散逸する円盤の計算モデルを統合するフレームワークの構築を進めてきた。本年度は、星の統合スペクトルを計算するコードを開発し、それをを用いた輻射流体計算を実行可能にした。加えて、磁気加熱を受ける星大気モデルの高度化や、輻射・熱化学反応計算を組み込んだ円盤の3次元磁気流体計算も実施し、円盤ガス散逸シナリオの構築に必要な階層連結モデルの基盤を整備した。

## 1 共同研究に関する情報

### 1.1 共同研究を実施した拠点名

- 東京大学 情報基盤センター
- 大阪大学 D3 センター

### 1.2 課題分野

- 大規模計算科学課題分野

### 1.3 参加研究者の役割分担

分担内容を大別すると、以下のようになる：

- 高棹真介：原始惑星系円盤・磁場加熱を受ける星大気に関するもの
- 庄田宗人：磁場加熱を受ける星大気に関するもの
- 仲谷峻平：原始惑星系円盤に関するもの

より詳細には、2024年度から引き継ぐサブ

課題（i～iii）と、2025年度に新たに取り組んだサブ課題（I～II）に3人で取り組む計画となっていた。

- (i) 磁場加熱を受ける星大気の磁気流体計算
- (ii) 星の輻射と熱化学反応計算を含めた3次元輻射磁気流体計算
- (iii) 現実的な内側境界条件を用いた円盤ガス散逸の2次元輻射流体計算
- (I) 降着流の加熱過程解明に向けた磁気流体モデルの構築
- (II) 3次元輻射磁気流体モデルの拡張

## 2 研究の目的と意義

中心星の成長過程と惑星形成過程を同時に理解するためには、原始惑星系円盤がどのように進化するかを明らかにする必要がある。しか

し、円盤を照らす光源である中心星や円盤内縁部は、円盤全体に比べて 4 桁以上小さな空間スケールに位置しており、それらが円盤とどのように結びついているのかは十分に解明されていない。このため、従来のあらゆるシミュレーションモデルでは、システムの内側境界条件に大きな不定性が残されてきた。特に重要なのは、中心星から放射される光の性質、すなわちスペクトルや、円盤外側へ実際に到達する放射量が十分に制約されていない点である。言い換えれば、これまでのモデルは、システム内側の境界条件に本質的な曖昧さを抱えていた。

この不定性の主要な要因の一つが、中心星から放射される紫外線・X 線 (XEUV) の影響である。原始惑星系円盤の温度は典型的に 100 K 程度であり、比較的低温の環境にある。そのため、XEUV のような高エネルギー光子が円盤に入射すると、円盤表層のガスは効率的に加熱され、膨張したのち円盤外へ流出する。この過程は「光蒸発」と呼ばれ、円盤ガスの散逸を支配する重要な機構の一つと考えられている。惑星形成の母体である原始惑星系円盤からガスが失われる過程を理解することは、惑星形成が可能な時間幅を制約することにも直結し、惑星形成論を完成させるうえで不可欠な課題である。

本研究では、星形成の知見に加え、太陽・恒星物理や降着円盤物理の成果を統合することで、上記の不定性を低減することを目指している。特に着目する円盤ガスの散逸過程は、1. 円盤ガスが中心星へ落下する過程、すなわち円盤ガス降着、2. 中心星からの XEUV 放射によって駆動される光蒸発、の二つである。ただし、星から放射された XEUV は、円盤に到達するまでの間に星周囲の物質によって吸収され、減光を受ける。したがって、XEUV 放射の発生機構や光蒸発過程そのもの、すなわち光が放射される場所と最終的に到達する場所を理解する

だけでは不十分であり、その間に存在する星周構造の解明も必要である。そのためには、円盤からガスを受け取り成長する中心星を 3 次元シミュレーションによってモデル化し、星周囲のガス分布を明らかにすることが求められる。以上を踏まえ、本研究チームでは、各研究者がそれぞれの階層に対応するモデル構築を進めるとともに、それらを相互に接続する階層連結モデルの構築に取り組んできた。今年度は、これまでの成果を統合して階層連結モデルの土台を作り上げることを目指した。

### 3 当拠点公募型研究として実施した意義

本研究が取り組む課題は、太陽・恒星物理、星・惑星形成、さらに星大気の物理的性質に深く関係している。加えて、天体形成過程に広く現れる降着円盤の物理も重要な要素となる。そのため、この問題を解決するには、宇宙物理学の多様な分野にまたがる知見を統合することが不可欠である。したがって、宇宙物理学の中でも異なる専門的背景を持つ研究者が連携し、共通の課題に取り組む研究環境が重要となる。

本研究では、目的達成に向けて 3 つの小課題を設定し、それぞれの成果を統合する方針で研究を進めてきた。そのうち 2 つの小課題では、磁場とプラズマが複雑に相互作用する多次元流体現象を扱う。これらの現象を記述する基礎方程式は、流体力学方程式と Maxwell 方程式を結合した磁気流体方程式を基盤としており、高度な数値シミュレーションが必要となる。また、残る 1 つの小課題では、多次元輻射輸送方程式、流体方程式、非平衡熱化学反応方程式を同時に、かつ高精度で解くことが求められる。

以上の理由から、JHPCN システムが提供する共同利用環境は、複数の共同研究者が共通の研究目標に向けて連携しながら研究を推進する

うえで不可欠であった。

## 4 前年度までに得られた研究成果の概要

### (1) 磁場加熱を受ける星大気モデル

#### 一次元磁気流体モデルを用いた前主系列星コロナ放射モデルの構築

主系列太陽型星のコロナからの高エネルギー電磁波 (XUV 放射) を再現可能な一次元磁気流体 (MHD) モデルを前主系列星へ拡張し、観測との比較により妥当性を検証した。一次元モデルは磁場に沿った流体運動としてプラズマの力学・エネルギー輸送を記述することで、計算コストを抑えつつ本質的な物理過程を扱える点に特徴がある。一方で、急峻な温度勾配を持つ遷移層は数値的に解像が困難であり、放射量の過小評価を招く。本研究では、遷移層を物理的整合性を保ったまま数値的に拡張する手法 (LTRAC 法) を実装し、この問題を解消した。その結果、準静的コロナからの輝線放射量を観測と整合的に再現することに成功し、前主系列星の放射スペクトル構築に向けた計算基盤を確立した。

### 三次元磁気流体コロナ加熱モデルの基盤開発

一次元モデルは平均的 (時間・空間的に平滑化された) コロナ構造の再現には有効である一方、突発的・局所的な加熱現象を十分に扱えず、高エネルギー X 線放射の過小評価につながる可能性が示唆された。この課題に対処するため、本研究では三次元磁気流体 (MHD) モデルと一次元モデルの直接比較に向けた基盤整備を行った。三次元 MHD 計算では、本来ゼロであるべき磁場の発散 ( $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ) が数値誤差により破れる問題があり、その制御手法の選択が計算の安定性と物理妥当性に大きく影響する。我々が当初採用した簡便な手法 (いわゆる

9-wave 法) は実装が容易である一方で、非物理的なエントロピー変化を引き起こし、加熱過程の評価に深刻な影響を与えることが判明した。そこで本研究では、9-wave 法に対してエントロピー保存性を改善する補正を導入し、非物理的な振る舞いを抑制できることを確認した。その結果、コロナ加熱が安定に再現されることを示し、三次元 MHD 計算へ展開するための計算基盤を構築した。

### (2) 原始惑星系円盤のモデル

入れ子格子に対応した公開磁気流体計算コード Athena++ (Stone et al. 2020) に、仲谷が開発した化学反応計算コードを組み込む作業を進めた。これにより、熱化学反応を考慮した磁気流体計算を実施するための基盤整備を行い、テスト計算の開始と計算性能の最適化に取り組んだ。また、中心星から動径方向に伝播する放射を扱うため、星からの輻射輸送計算も導入した。一方で、星近傍では磁気エネルギー密度がガスの内部エネルギーを大きく上回る領域が生じやすく、その結果として数値的不安定性が発達することが分かった。このような強磁場領域に対して、物理的妥当性を保ちながら安定に計算を進めるための処方箋をどのように与えるかは、引き続き解決すべき課題として残った。

階層連結モデルを構築するためには、可視光・赤外線領域だけでなく、円盤ガスの加熱や電離に直接関わる XEUV 領域までを含む、信頼性の高い星の統合スペクトルが必要である。そこで本研究では、星における複数の放射成分、すなわち降着に伴う放射、磁気加熱を受けた星大気からの放射、さらにフレアに由来する放射を個別に計算し、それらを統合するための計算コードの開発に取り組んだ。本年度までに、各放射過程を組み合わせて星の統合スペクトルを構成するための基本的な枠組みを整備す

ることができた。

当初の研究計画には明示的には含まれていなかったが、近年、星近傍を高解像度で分解する星形成シミュレーション研究が国際的に急速な注目を集めるようになった。この分野を先導してきた我々としては、重要な計算を世界に先駆けて実施し、明確な成果として発表することが重要であると判断した。従来の星・円盤相互作用モデルでは、星表面は計算領域の内側境界として扱われるか、あるいは人為的に物理量を固定したガス球として表現されることが多かった。すなわち、本来の原始星が持つ対流的性質は十分に考慮されていなかった。そこで我々は、「対流的な原始星が、乱流的な円盤から質量・角運動量・磁場をどのように受け取るのか」という基本的かつ重要な問題に取り組んだ。その結果、対流する原始星と乱流円盤を同時に扱う世界初の成果を得ることができ、査読論文として発表した (Takasao et al. 2025b, ApJ)。この成果についてはプレスリリースも行い、複数の新聞社によって広く報道された。

## 5 今年度の研究成果の詳細

### (1) 磁場加熱を受ける星大気のマグネティック流体計算 一次元磁気流体モデル

昨年度までに構築した一次元 MHD モデルは、主としてコロナループ（恒星表面の正負極を結ぶアーチ状磁場構造）を対象としていた。本年度はこれを拡張し、片側のみが恒星表面に接続し外部空間へと開いた磁力線領域に適用することで、恒星風（恒星から流出するプラズマ流）の駆動過程の再現を試みた。このような開いた磁場構造は、恒星風の流出領域として機能し、XUV 放射と同様に周囲の円盤や惑星環境へ影響を与える重要な要素である。

その結果、従来のコロナループモデルをそのまま適用した場合、観測から示唆される値に比

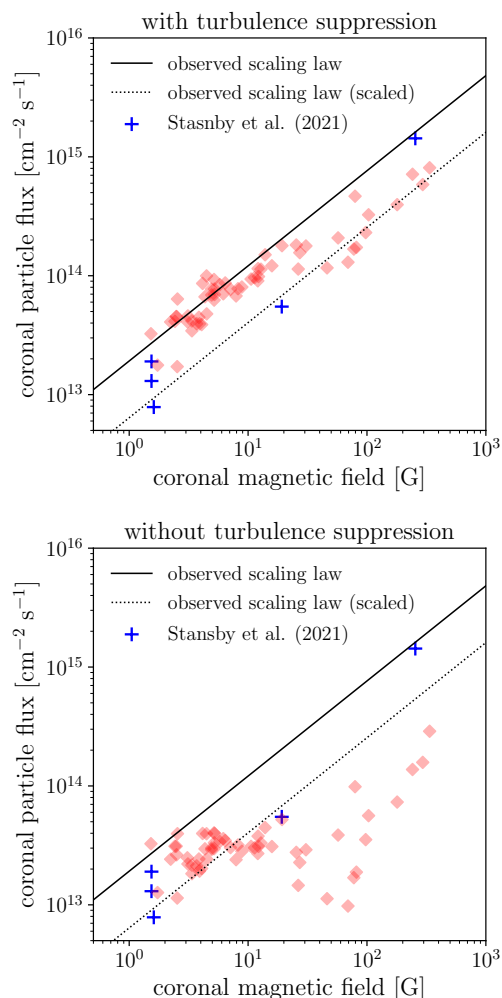


図1 彩層乱流を人為的に抑制した場合（上）および抑制しない場合（下）における、コロナ磁場強度（横軸）と太陽風質量流束（縦軸）の関係。黒実線は観測データに対する冪乗フィット、破線はその1/2にスケールした関係を示す。青色のプラス記号はフィット導出に用いたものとは独立な観測データ、赤色のダイヤモンドは本研究のシミュレーション結果を表す。

べて恒星風流束を大幅に過小評価することが明らかとなった。一方で、遷移層より下層に位置する彩層における乱流強度を人為的に抑制すると、観測と整合的な流束が得られることを見出した（図1）。これは、低層大気における乱流状

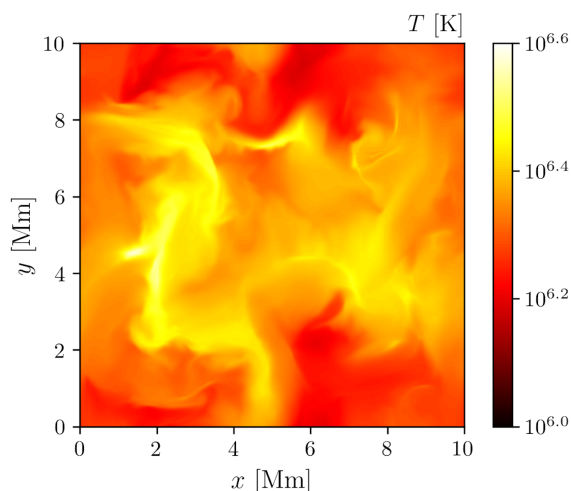


図2 三次元磁気流体モデルによるコロナ加熱計算の結果。ある時刻におけるループ軸に垂直な断面内の温度分布を示す。同一断面内でもプラズマ温度は大きな空間変動を示し、高温領域はフィラメント状の局在構造として形成されることが確認された。

態が、上層コロナを経て最終的な流出量を決定するという、従来必ずしも明確ではなかった階層間結合の重要性を示唆する結果である。

この仮説を検証するため、観測制約が豊富な太陽風を対象として、彩層乱流を抑制した場合としない場合のモデルと観測の整合性を比較した。その結果、乱流を抑制した場合にのみ、磁場強度と太陽風流束の間に成立する冪乗則が再現されることを確認した。特に強磁場領域では、乱流の扱いにより流束が一桁程度変化することが示された。前主系列星では磁場強度が太陽より2-3桁大きいことを踏まえると、本結果は同星の恒星風モデルにおいて彩層乱流の効果を適切に制御する必要性を強く示唆する。本成果は王立天文学会月報 (MNRAS) に受理され、2026年4月に出版された。

### 3 次元磁気流体モデル

昨年度までに、3次元MHD計算における磁

場の発散 ( $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ) の数値的破れに起因する不安定性の問題を解消した。本年度はその基盤の上で高解像度計算を実施し、コロナ加熱の空間構造を詳細に調べた。その結果、解像度の向上に伴い熱伝導項の数値的不安定性が顕在化し、計算が破綻しやすくなることが明らかとなった。これは、熱伝導が磁力線に平行方向に強く制限されるという強い非等方性に起因するものであり、高解像度化によりこの性質がより顕著に現れるためである。

この問題に対し、本研究では本来無視される磁力線垂直方向にも微小な熱伝導を付加することで数値安定性を改善する手法を導入した。具体的には、磁力線平行方向の約0.01%に相当する熱伝導を垂直方向に与えることで、物理的妥当性を大きく損なうことなく安定した時間発展計算が可能となることを確認した。この改良により、従来は困難であった高解像度三次元計算を実現し、コロナ内部の温度構造を精度よく評価できる基盤を整備した。

得られた結果から、同一コロナループ内でも位置により温度が最大一桁程度異なる強い空間不均一性が存在することが明らかとなった (図2)。これは多次元効果により高温プラズマが局所的に生成される可能性を示しており、高エネルギー X線放射の増強や、加熱の空間的局在 (乱流的には間欠性の増大) と整合的である。一方で、このような局在構造を十分に解像するためには当初想定を大きく上回る計算資源が必要であることも判明し、本年度は長時間発展を含む詳細な科学解析には至らず、今後の課題として残された。

#### (2) 原始惑星系円盤のモデル

熱化学反応計算を組み込んだ3次元MHD計算を実施し、中心星からの放射が周囲のガスをどのように電離し、円盤環境に影響を与えるのかを調査した。図3に、その計算結果の一

例を示す。計算では、磁気回転不安定性によって円盤が乱流化し、一部の円盤ガスが円盤上空へと持ち上げられ、円盤風として流出する様子が確認された。この円盤風は中心星からの放射を吸収・遮蔽するため、円盤表面には時間的に変動する非定常な影が形成されることが分かった。星からの光によって駆動される光蒸発を考える上で、このような影の効果は円盤ガスの加熱率や散逸率を左右する重要な要素である。そのため、当初はパラメータ調査を通じて影の効果を系統的に調べることを計画していた。しかし、前述した数値不安定性の影響により、複数モデルの計算を安定に進めることが難しく、十分なパラメータサーベイを実施するには至らなかった。

3次元磁気流体計算と並行して、星の統合スペクトルを計算するコードの開発も進めた。さらに、この統合スペクトルを光蒸発計算における輻射輸送計算へ入力できるよう、両コードのインターフェイス整備を行った。その結果得られた計算例を図4に示す。これは、星の統合スペクトルを用いた2次元輻射流体計算の結果である。従来の円盤光蒸発モデルでは、中心星の放射スペクトルとして近傍の若い星に似た経験的スペクトルを仮定する 경우가多く、スペクトル形状の物理的起源は十分にモデル化されていなかった。しかし実際には、降着率や磁場強度、星大気の加熱状態に応じてXEUV放射の強度やスペクトル形状は大きく変化する。そのため、特定の観測天体のスペクトルを代表値として用いる従来型のアプローチでは、多様な若い星や円盤に対する観測結果との比較に限界がある。我々が構築してきた枠組みでは、星の物理状態から予測される統合スペクトルを円盤光蒸発計算へ直接接続できるため、理論モデルと観測量をより一貫した形で比較することが可能となる。本研究を通じて、このような階層連

結型フレームワークの基盤を構築することができた。

## 6 進捗状況の自己評価と今後の展望

### (1) 磁場加熱を受ける星大気モデル

一次元MHDに基づく恒星大気磁気加熱モデル計算については、これまでの三年間で査読付き欧文論文3報の出版を達成しており、高い研究生産性を維持できたと評価している。科学的にも、当初の目標であった前主系列星のXUV放射スペクトルモデルの構築とそのバリデーションを達成しただけでなく、彩層乱流と恒星風流束の関係という予期しなかった重要な知見を得ることができた。また、LTRAC法の実装に加え、将来的なコード公開を見据えた並列化効率や汎用性の改善など、計算基盤の整備という観点でも着実な進展があった。

三次元MHD計算については、数値計算法の基盤に関する重要な課題を段階的に特定し、それぞれに対する実装上の解決策を提示できた点を評価している。具体的には、低解像度計算では磁気発散の取り扱い、高解像度計算では非等方熱伝導が主要な不安定化要因であることを明らかにし、いずれに対しても有効な対処法を確立した。一方で、必要解像度の見積もりが不十分であったため、十分な解像度と計算時間を両立した大規模計算には至らなかった点は課題として残った。ただし、これらの経験を通じて三次元計算に必要な数値的要件と計算資源の見通しが明確になり、今後の大規模計算に向けた開発基盤を確立できたことは大きな成果である。

### (2) 原始惑星系円盤モデル

本研究は、信頼性の高い星の統合スペクトルを構築し、それをを用いた輻射流体モデルおよび磁気流体モデルへと接続することで、円盤ガス散逸を多階層的に理解することを目標として進

めてきた。これまでの3年間で、熱化学反応計算を組み込んだ3次元磁気流体モデルの構築、星の統合スペクトル計算コードの開発、さらに統合スペクトルモデルを取り入れた円盤光蒸発モデルの構築を進め、階層連結フレームワークの主要部分はおおむね達成できたと考えている。また、円盤計算に関する査読論文は過去3年間で3報出版されており、方法論の整備だけでなく、科学的成果の創出という点でも一定の成果を上げることができた。

一方で、円盤ガス散逸に関する階層連結モデルの土台はおおむね整備できたものの、いくつかの重要な課題も残されている。第一に、星近傍の強磁場領域で数値不安定性が発達したため、3次元磁気流体モデルについて十分なパラメータ調査を実施できなかった点が挙げられる。熱化学反応計算を組み込んだMHD計算では、ガスの内部エネルギーを常に正值に保ちつつ、磁気エネルギーが卓越する領域でも安定に時間発展させるための数値的手法を検討する必要がある。この問題が克服されれば、星からの放射が大局円盤に届くまでにどれほど吸収減光を受けるのかが定量的に評価できるようになる。第二に、熱化学反応計算において反復解法が収束しない場合があり、陰解法による計算の初期値をより適切に与える手法の開発が必要であると考えている。今後は、事前に広いパラメータ空間で機械学習モデルを訓練し、それを反復計算の初期推定値として用いる方法などを試みることで、計算の安定性と効率を改善していきたい。

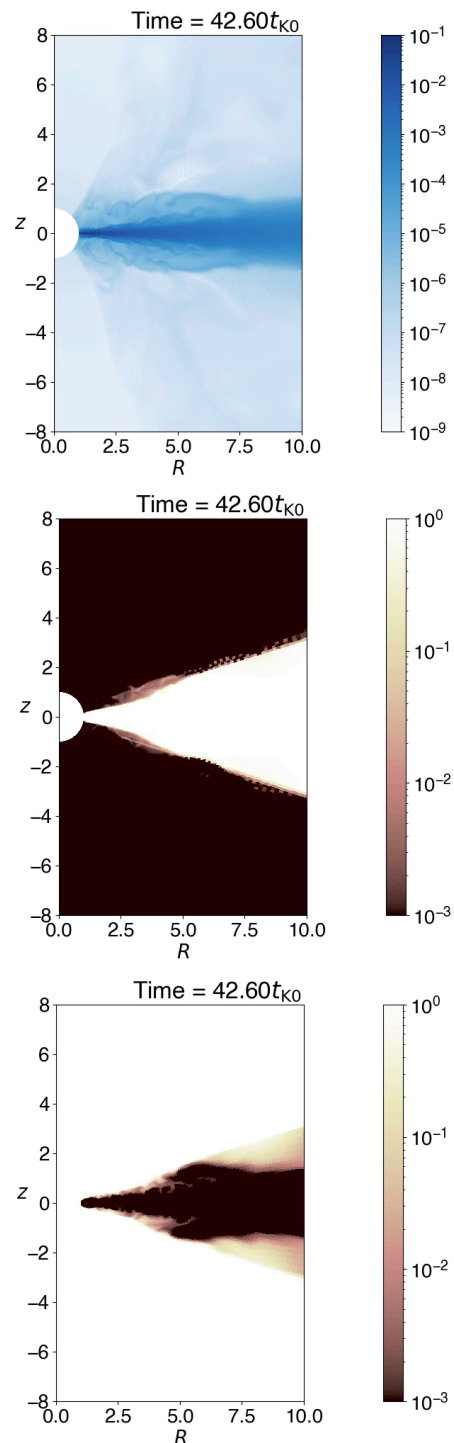


図3 熱化学反応計算入りの、3次元磁気流体計算の結果。上から密度、中性水素の密度、電離水素の密度の、円盤の断面図になっている。密度分布の中で、星の領域は白くくり抜かれた領域として見える。

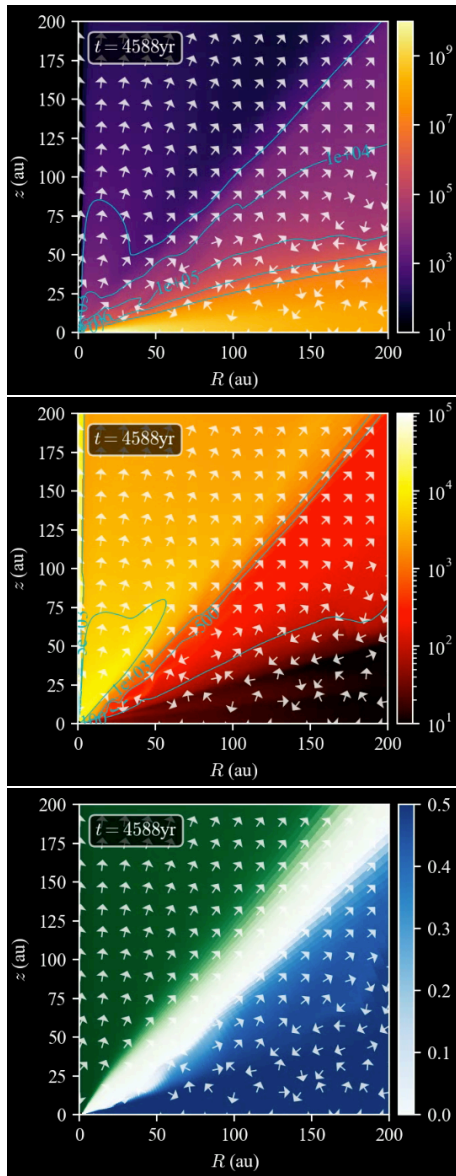


図4 熱化学反応計算入りの、2次元流体計算の結果。上から密度、温度、水素アブダンスの、円盤の断面図になっている。水素アブダンスの図では、緑は電離水素、白は水素原子、青は水素分子に対応している。