

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：6 2 6 1 6

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：2 1 2 4 4 0 2 1

研究課題名（和文） 輻射輸送シミュレーションが解き明かす ALMA 時代の天文学

研究課題名（英文） Astronomy in ALMA-Era Driven by Radiation Transfer Simulation

研究代表者

富阪 幸治 (TOMISAKA KOHJI)

国立天文台・理論研究部・教授

研究者番号：70183879

研究成果の概要（和文）：シミュレーションを天体物理研究のより強力な武器とするため、様々な天体に対する観測的可視化（シミュレーションにより得られた物理状況が天文観測手段の電磁波ではどう観測されるべきかを正確にシミュレーションすること）をおこなった。ダスト熱輻射の偏波観測予測を（あ）星無しコア、原始星コア、分子アウトフローに対して行い、偏光パターンから（初期）磁場配位を推定する方法を得た。（い）非局所熱平衡輻射輸送計算により原始星形成初期天体に特有の観測的特徴を得た。

研究成果の概要（英文）：Observational visualization is a method to obtain expected observational features for the outcome from (magneto)hydrodynamical simulations. This enables us to compare directly simulation results and observations. Polarization of the thermal emissions from interstellar dusts is calculated for pre- and protostellar cores and molecular outflows. We are now able to estimate the 3-dimensional magnetic field configuration from the 2-dimensional polarization pattern. Using the non-local thermal equilibrium (NonLTE) radiation transfer calculation, we have found observational features characteristic to the early phase of protostar formation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2012年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
年度			
総計	29,600,000	8,880,000	38,480,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：理論天文学、計算物理学、観測的可視化、シミュレーション、輻射輸送、星間化学、星形成

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、チリ・アタカマにおいて建設

が進められ、2010年度部分運用が開始予定のミリ波・サブミリ波干渉計 ALMA から世界的な科学的成果を引き出すため、観測天文学

と連携しつつ、輻射輸送と化学進化を取り入れた新たなシミュレーション研究を構築することが求められていた。

2. 研究の目的

シミュレーションによって得られた物理状況を現用の観測手段の電磁波によって観測した時、スペクトル、強度分布等がどのように観測されるかを、正確にシミュレーションする観測的可視化を、(1) 電波赤外領域の分子線に対して、非局所熱平衡 (nonLTE) の輻射輸送計算を用いた観測予測、(2) 星間塵起源であるミリ波領域の熱輻射が持つ偏波の観測予測、2つを中心として展開し、ALMA による広範な観測結果を(磁気)流体シミュレーションによる結果と直接比較する事を可能にし、観測結果の詳細な物理的理解を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 入れ子状格子 (nested-grid) を用いた 3 次元自己重力輻射磁気流体力学シミュレーションコードを開発し、星形成過程の等温星間雲段階から原始星形成初期に当たる第 1 および第 2 コアに至る進化を明らかにする。

(2) (1)の結果を観測的可視化すべく、入れ子状格子に対応したモンテカルロ法を用いた非局所熱平衡 (nonLTE) の輻射輸送計算コードを開発し、星形成過程において原始星形成初期の第 1 コア領域の観測的特徴を明らかにする。

(3) (1)で得たガスの収縮する流れの中で多数の流体素片の軌道を追い分子進化モデルを計算することにより、分子種ごとの空間分布進化を計算する。

(4) 入れ子状格子を用いた 3 次元自己重力磁気流体力学シミュレーションコードにより、磁気星間雲の進化を調べ、初期に磁場と回転の方向がそろっていない場合の(原始星形成以前の)星なし期から(原始星形成以降の)原始星期までの進化を観測的可視化の立場から系統的に調べる。

4. 研究成果

(1) 星形成過程の等温星間雲段階から原始星形成初期に当たる第 1 および第 2 コアに至る進化について計算し次の結果を得た。①熱的進化が 1 次元球対称計算の結果と良く一致すること。②磁場と回転の効果より、第 1 コア周囲と第 2 コア周囲から、それぞれ低速と高速の 2 種のアウトフローを生じること。③様々な環境下で生じる最初期の原始星状天体である第 1 コアを調べたところ、低質量コアの環境から生じるものは Exposed Long-lifetime First core (ELF) と呼ぶべき、約 1 万年の寿命を持ち特に低光度であるという特別の観測的特徴を持つことが明らかと

なった。

(2) 非局所熱平衡 (nonLTE) の輻射輸送計算により、(1)の結果が、CS (一硫化炭素) 回転遷移による電波領域の分子輝線でのように観測されるかを検討した。①原始星形成初期の第 1 コア領域の観測的特徴が、回転しながら落下していること。②比較的光学的に厚い遷移の場合、輝線が青色非対称(輝線のスペクトルが青色>赤色となる)の落下の特徴を示すこと。③積分強度分布が回転でガスが観測者に近づく半面で明るく、遠ざかる部分で暗くなるという非対称性を持つことを明らかにした。

(3) (1)の結果を元に分子進化モデルを計算したところ、①第 1 コアでは、温度が 500K 以下の領域では、星間塵表面に吸着された分子の昇華温度の違いによりその組成が決まること。②500K 以上でホルムアルデヒドの解離から炭素鎖分子、一酸化炭素等の形成が始まること、③メタノール、ギ酸メチルなどの有機分子も形成されること、などがあきらかとなった。

(4) 初期に磁場と回転の方向がそろっていない場合について星形成過程を調べた。①観測される星間塵起源の熱輻射が持つ(2次元の)偏波パターンと物理的な3次元の磁場分布の関係を明らかにした。②初期に磁場と回転の方向がそろっていない場合には、特徴的な S 字型の偏波パターンが原始星初期に現れることを見いだした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 65 件)

- ①Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Protostellar Collapse: Protostellar Core Formation, 2013, Jan., *Astrophysical Journal*, 763, 6 (29pp), K. Tomida, K. Tomisaka, T. Matsumoto, Y. Hori, S. Okuzumi, M. N. Machida, and K. Saigo (doi:10.1088/0004-637X/763/1/6) 査読有
- ②Exploring Magnetic Field Structure in Star-Forming Cores with Polarization of Thermal Dust Emission, 2012, Nov., *Astrophysical Journal* 761, 40 (21pp), A. Kataoka, M. N. Machida, and K. Tomisaka (doi:10.1088/0004-637X/761/1/40) 査読有
- ③Chemistry in the First Hydrostatic Core Stage by Adapting Three-Dimensional Radiation Hydrodynamic Simulations, 2012, Oct., *Astrophysical Journal*, 758, 86(20pp), K. Furuya, Y. Aikawa, K.

Tomida, T. Matsumoto, K. Saigo, K. Tomisaka, F. Hersant, and V. Wakelam (doi:10.1088/0004-637X/758/2/86) 査読有

- ④ Observational Identification of First Cores: Non-LTE Radiative Transfer Simulation, 2011, Oct., Publ. Astron. Soc. Japan 63, 1151-1164, by K. Tomisaka, and K. Tomida (<http://pasj.asj.or.jp/>) 査読有
- ⑤ Spectrum Energy Distribution and Submillimeter Image of a Rotating First Core, 2011, Feb., Astrophysical Journal 728, 78(10pp), by K. Saigo, and K. Tomisaka (doi:10.1088/0004-637X/728/2/78) 査読有
- ⑥ Origin of Molecular Outflow Determined from Thermal Dust Polarization, 2011, Feb., Publ. Astron. Soc. Japan 63, 147-158, by K. Tomisaka (Erratum, 2011, June PASJ 63, 715-715) 査読有 (<http://pasj.asj.or.jp/>)
- ⑦ Exposed Long-lifetime First-core; A New Model of the First Core Based on Radiation Hydrodynamics, 2010, Dec., Astrophysical Journal Letters 725, L239-L244, K. Tomida, M. N. Machida, K. Saigo, K. Tomisaka, and T. Matsumoto (doi:10.1088/2041-8205/725/2/L239) (Erratum 2011, May, ApJL 732, L18(1pp)) 査読有
- ⑧ Radiation Magnetohydrodynamics Simulation of Proto-Stellar Collapse: Two-Component Molecular Outflow, 2010, May, Astrophysical Journal 714, L58-L63, K. Tomida, K. Tomisaka, T. Matsumoto, K. Ohsuga, M. N. Machida, and K. Saigo (doi:10.1088/2041-8205/714/1/L58) 査読有
- ⑨ Emission from a Young Protostellar Object I. Signatures of Young Embedded Outflows 2009, Sept., Astrophysical Journal 703, 1141-1158, by M. Yamada, M. N. Machida, S.-i. Inutsuka, and K. Tomisaka (doi:10.1088/0004-637X/703/1/1141) 査読有

[学会発表] (計 49 件)

- ① K. Omukai, 「Star formation in low-metallicity gas: thermal and chemical processes」, in The low-metallicity ISM: Chemistry, Turbulence and Magnetic Fields, 2012 年 10 月 08 日～2012 年 10 月 12 日, Goettingen U., Germany
- ② K. Tomisaka, 「Expected Observations of

the Star Formation Process: from Molecular Cloud Core to First Hydrostatic Core」, in EPoS 2012 The Early Phase of Star Formation - Assembling Pieces of the Missing Paradigm, 2012 年 07 月 01 日～2012 年 07 月 06 日 Max-Planck-Society Conference Center Ringberg Castle, Tegernsee, Germany

- ③ 相川祐理, 「Chemistry in Protoplanetary Disks」, 第 8 回太陽系外惑星大研究会, 2012 年 04 月 18 日～2012 年 04 月 20 日, 熱海ニューフジヤホテル(静岡県)
- ④ 町田正博, 「磁気星間雲中での星周円盤の形成」, 日本天文学会, 2012 年 3 月 21 日, 龍谷大学
- ⑤ 和田桂一, 「Star Formation around AGNs and feedback」, in Star Formation in Galaxies, 2011 年 6 月 19 日, リングバーク, ドイツ
- ⑥ 富阪幸治, 「ダスト熱輻射の偏波から探る双極分子流の磁場構造」, 日本天文学会秋期年会, 2011 年 9 月 19 日～9 月 22 日, 鹿児島大学
- ⑦ 富阪幸治, 「第 1 コアの観測的識別」, 日本天文学会秋期年会, 2011 年 9 月 19 日～9 月 22 日, 鹿児島大学
- ⑧ 町田正博, 「星周円盤とガス惑星形成における重元素量の影響」, 日本天文学会, 2011 年 9 月 19 日～9 月 22 日, 鹿児島大学
- ⑨ Aikawa, Y., 「Hydrodynamical-Chemical Models from Prestellar Cores to Protostellar Cores」, in IAU symposium 280: The Molecular Universe, 2011 年 5 月 30 日～6 月 3 日, Toledo, Spain

[図書] (計 2 件)

- ① 天文学辞典、岡村定矩, 家正則, 犬塚修一郎, 小山勝二, 千葉柁司, 富阪幸治 (編者)、日本評論社 (全 539 頁), 2012 年
- ② 現代の天文学 第 11 巻 (星間化学の節を担当 p.212-232), 相川祐理, 日本評論社 (全 342 頁), 2009 年

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富阪 幸治 (TOMISAKA KOHJI)
国立天文台・理論研究部・教授
研究者番号: 70183879

(2) 研究分担者

町田 正博 (MACHIDA MASAHIRO N.)
九州大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10402786
和田 桂一 (WADA KEIICHI)
鹿児島大学・理工学研究科・教授
研究者番号：30261358
相川 祐理 (AIKAWA YURI)
神戸大学・理学研究科・准教授
研究者番号：40324909
大向 一行 (OMUKAI KAZUYUKI)
京都大学・理学研究科・准教授
研究者番号：70390622

(3) 連携研究者
該当なし