

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340046

研究課題名(和文) 宇宙暗黒時代から現在に至る統一的銀河スペクトル進化モデルの構築

研究課題名(英文) A unified synthetic spectral evolution model of galaxies from the Dark Ages to the present-day Universe

研究代表者

竹内 努 (Takeuchi, Tsutomu)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90436072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円

研究成果の概要(和文)：惑星や生命の原材料である重元素は、ビッグバンではなく星で作られる。よって、宇宙の重元素合成史を解明するには、星の誕生と死が織りなす銀河の形成および進化を理解することが不可欠である。本研究では、星形成史・重元素合成史を星・ダスト生成および星間物質の多相を統合的に扱うことでこの問題に挑んだ。まず星形成・重元素合成史に統合的で、かつ星間物質の様々な相でのダスト粒子の成長・破壊を考慮することで、銀河年齢100億年以上にわたって統合的にダスト粒子の進化を追う理論の構築に成功した。さらに星間物質の複雑な構造を取り入れた、銀河の電波から紫外線までの輻射モデルを完成させた。

研究成果の概要(英文)：Heavy elements, the origin of planets and life, have not produced by the Big Bang, but synthesized in stars. Hence, to unveil the cosmic production history of heavy elements, we must understand the formation and evolution of galaxies, i.e., vast number of repetitions of birth and death of stars. In this study, we tackled this problem by treating the formation of stars and dust as well as the complicated processes of dust grains in the interstellar medium in a self-consistent manner. First we succeeded in constructing a theoretical framework that enables us to treat the evolution dust grains for the whole lifetime of galaxies (10 billion years or more) by taking into account the formation, growth, and destruction of dust grains. Further, we constructed a radiation transfer model of galaxy spectrum from radio to ultraviolet wavelengths, which can handle the complicated structure of the interstellar medium.

研究分野：銀河物理学 観測的宇宙論 応用統計学

キーワード：理論天文学 光赤外線天文学 銀河形成進化 星形成 輻射

1. 研究開始当初の背景

「我々はどこから来たのか」という人類普遍の疑問に対する天体物理学からの解答は、宇宙の重元素合成の解明によって与えられるであろう。惑星や生命の原材料である重元素はビッグバンでは合成されず、星の中心部における核融合反応、及び星の終末での爆発現象で作られる。つまり宇宙の重元素合成史を解明するには、初代星形成含む銀河形成および進化を統一的に理解することが不可欠である。銀河進化の研究では、宇宙の星形成史を求めることが観測的にも理論的にも中心的な課題であり続けている(e.g., Hopkins & Beacom 2006; Bouwens et al. 2009)。にもかかわらず、これまでは観測波長によって異なった星形成史が提示され、議論は全く収束していなかった。銀河の星形成率は寿命の短い($\sim 10^6$ 年)大質量星からの紫外線光子を観測し、単位時間に形成される星の数に換算して得られる。しかし、星によって合成された重元素は星間空間に供給され、その質量の半分以上が直径 $1\mu\text{m}$ 以下の固体微粒子(ダスト)として存在するため、星からの紫外線はダストに散乱・吸収(合わせて減光とよぶ)されて最終的に波長 $\lambda \sim 10 - 1000 \mu\text{m}$ の赤外線で再放射される。つまり、紫外線のみ情報では正しい星形成率は得られない。この本質的な複雑さが長年にわたる議論の混乱の原因であった。

私はこの問題に紫外線から赤外線にわたる銀河の多波長観測データとそのモデル化を通じて取り組んできた。その結果、宇宙年齢が現在の半分の頃(70億年前)はダストで隠された星形成が全体の90%を占め、これらはほとんど紫外線を放出しない大光度赤外銀河が担っていることを発見した。研究開始当時は Herschel (口径 3.5 m の宇宙赤外線天文台)のデータが公開され始めた頃、より遠方の宇宙でも結果が得られると期待されていた(注: その後確かに私の結果が正しいことが確認され、さらに $z \sim 3$ の遠方宇宙までダストで隠れた時代が続くことが示された)。

このような複雑な銀河の進化を引き起こした物理過程を理解するため、私は銀河の化学進化と整合的なダスト進化モデルを開発し、銀河のスペクトルエネルギー分布(SED)および減光のモデル化に応用してきた。銀河のダストの供給源は超新星、中小質量星の末期(漸近巨星分枝星: 以下 AGB)、星間ガス中での成長と、銀河の年齢とともに変化する(e.g., Zhukovska et al. 2008; Asano et al. 2013a)。それぞれの過程で形成されるダストの種類は異なるため、銀河のダスト放射スペクトル(SED)および減光の波長依存性(減光曲線と呼ばれる)も銀河の年齢とともに進化する。よって原始銀河の赤外 SED は進化の進んだ(銀河系のような)近傍銀河とはまったく異なる。私は化学進化と整合的なダスト進化を取り入れた原始銀河のダスト SED モデル

を世界に先駆けて発表した(Takeuchi et al. 2003)。その後超新星によるダスト供給、衝撃波による破壊、星間乱流による破碎(シャッタリング)によるサイズ分布の変化、及び AGB からのダスト供給まで取り入れており、他の追従を許していない(Takeuchi et al. 2005, 2010b, c)。現在は、全てのダスト供給源の進化を整合的に理論化し、 $z \sim 6$ のクエーサーから近傍巨大銀河、矮小銀河に至るまで、あらゆる年齢の銀河で観測されたダスト量を説明することに成功している(Asano et al. 2013a)。

これらの研究の期間中、日本の赤外線衛星 AKARI や Herschel のデータが公開された。大型サブミリ波干渉計 ALMA は 2011 年初頭から運用が開始され、可視・近赤では James Webb Space Telescope (JWST: 近・中間赤外をカバーする口径 6.5 m の宇宙望遠鏡、2018 年以降打ち上げ予定)計画が進行中である。電波では Square Kilometre Array (SKA: 30 GHz-600 MHz で集光面積 1 km^2 の大型干渉計計画)についての議論が活発になり、私も銀河進化 WG の代表者を務めている。SKA は宇宙暗黒時代の物質分布を観測するユニークな手段であり、また遠方まで銀河の中性ガスやその運動を捉えることができる。私のこれまでの成果によって星形成の検証法が確立した今、次世代の超深探査を念頭に置き、ガスの多相進化や銀河の力学を取り入れ、輝線スペクトルまで含めた銀河の多波長スペクトル進化モデルの開発は急務であった。

2. 研究の目的

本研究では、扱う波長を電波領域まで拡げ、また原子分子輝線も導入することで、宇宙暗黒時代から現在までの銀河のスペクトル進化を紫外線から電波まで整合的に扱えるモデルに拡張する。各ステップで、その時点で得られる最新の観測データを利用し、徹底的にモデルを検証し、改良する。以下のような戦略で研究を進める:

- (1) 銀河の中でダストが成長する場である冷たいガスや分子雲を統一的に扱うため、星間物質の多相(高温ガス、低温中性ガス、分子ガス)の物理を理論に取り入れる。
- (2) 先行研究では経験的に与えられている電離輝線・分子輝線や中性水素超微細構造線の強度が、星間物質の多相モデルで決まるガスの物理状態から第一原理的に求められるようにモデルを拡張する。また超新星残骸からのシンクロトロン放射も導入する。
- (3) 銀河の密度構造および回転等の内部運動を導入し、銀河の力学が輻射に与える影響を検証できるようにする。
- (4) 銀河の星間物質の多相非一様性とその星間物質中でのダスト粒子の進化を整合的に解き、それを輻射輸送計算と組み合わせることで化学進化・星間物質の非一様性とも無撞着なスペクトルエネルギー進化モデルを完

成する。

3. 研究の方法

これまで星、ダスト放射のみを扱っていた銀河のスペクトル進化モデルを、星間ガスの多相モデル及び力学を導入することで、全体がガスの状態の原始銀河から大半が星に転化した現在の銀河まで、あらゆる銀河年齢に対応するモデルに拡張する。次のステップは宇宙論的初期条件から出発し、電波輝線放射から星形成を経て星とダスト放射が卓越する過程を全て統合的に扱うことである。輻射輸送は並列計算によって高速化を行う。これにより、宇宙暗黒時代から現在までの統合的スペクトル進化モデルを構築する。

現在、銀河の輻射モデルやダスト減光、銀河ガスの多相モデル、ダスト進化などの研究はそれぞれの専門家が情報交換もあまりないまま進めている。しかし、本研究により、星形成やダスト形成のみならず多相星間物質やその運動状態、そして銀河の力学までを統合的枠組みに乗せることができる。また、宇宙論的構造形成分野では銀河の形成過程が極度に簡略化された形(例えば、ガス密度が閾値を超えたら星形成とみなす、など)でしか取り入れられていないが、本研究で銀河形成以降の物理が全て統合的に扱えるようになれば、シミュレーションへの方法論の指針を与えることができ、銀河研究と宇宙論的シミュレーションの間の橋渡しになる。そして、これらのモデルの予言と来るべき超深探査時代のデータを手にした暁には、天体形成と進化の全ピースが一つの画に収まるはずである。

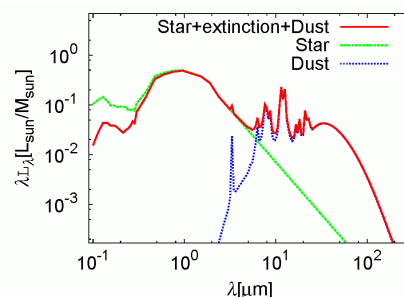
本研究の波及効果は天体・構造形成分野だけではない。宇宙マイクロ波背景放射(CMB)による宇宙論的解析(Sunyaev-Zel'dovich 効果、インフレーション研究に重要なCMBのB-mode偏光、初期ゆらぎの非ガウス性の検証等)の際には銀河・銀河系からの輻射、特にCO輝線等は強烈なノイズとなってしまう。これを取り除き、微弱な信号から純粋な宇宙論的情報を抽出するためには非常に信頼できるSEDモデルが必要である。このように、本研究は精密宇宙論への寄与も期待できる。

4. 研究成果

ダスト進化へのガスの多相モデルの導入については、星間物質の多相(高温ガス、低温中性ガス、分子ガス)の物理を理論に取り入れ、それぞれの中で異なったダスト成長と破壊過程が進むことを正しく考慮した理論モデルの構築に成功した。さらに、銀河中の重元素の進化は化学進化によって記述されるが、重元素の固体微粒子であるダストの進化に応用するには、様々な星間物理を考慮する必要がある。我々は星間物質の多相(高温ガス、低温中性ガス、分子ガス)の物理を取り入れ、それぞれの中で異なったダスト成長と破壊過程が進むことを正しく考慮したうえで、全銀河年齢 100 億年にわたって適用

できる自己整合的な理論の構築に世界で初めて成功した。この新理論はダスト進化を越え、新しい応用的側面が発展している。現在ALMA望遠鏡などによる超遠方銀河のガス量を観測的に求めるために、ダスト量とガス量の経験的相関によって換算する方法が用いられている。しかし、我々の理論はこの関係が遠方銀河のような化学進化の進んでいない系では破綻することを示している。我々はこれを統合的に求め、まず観測データの揃っている中間赤方偏移の銀河の星間物理の観測に応用する計画を立て、これを推進している。これはALMAとSKAをつなぐ研究として期待できる。本研究で完成した銀河のダスト進化理論は、発表から1年半ですでに世界標準の理論としての地位を確立し、30回以上引用され、発表誌Earth, Planets & Spaceの論文賞も受賞した。観測的応用も世界の研究者から続々とされており、新しい共同研究のオファーも殺到している。ALMA, SKAへの応用という目標にも到達しており、予想以上の成果となった。

この理論を銀河のSEDモデルに適用するのが次の目標である。これについてはまず、紫外線から可視光線でのダスト粒子による輻射の減光曲線の理論を構築した。この結果を我々の銀河系や近傍銀河、キューサーのダスト減光曲線の最新の観測に応用し、これを再現することに成功した。そして上記の減光曲線の進化モデルを検証するため、高赤方偏移銀河の減光曲線を求める観測的研究を開始した。輻射モデルにおける懸案であった銀河内のダスト分布の非一様性を取り入れ、かつダスト粒子による光子の吸収・散乱、熱的再放射を取り扱う方法論も、最終年度について成功した。このような試みは先行研究ではケーススタディとして行われているものの、1回の計算に非常に時間かかり、宇宙論的数値計算に適用できるような形式にはなっていない。本課題ではこの問題を、メガグレインモデル(ダストを含むガス雲を一つの巨大な粒子として扱う輻射輸送のための近似法)を拡張することで解決した。これまで実現困難であった理由は、そのような巨大な粒子は大きな熱容量を持ち、実際には微細な粒子であるダストの確率的加熱現象を扱うことができないことであった。我々はこれを解決する処方確立し、メガグレインモデルによる吸収散乱+熱的再放射を同時に扱うモデルを構築した(下図)。



その他の成果として、長波長の究極の電波観測装置計画である SKA への応用のため、銀河の星形成率、全バリオン質量、全質量の間に成り立つ新しい経験則を発見し、SKA 関連の研究会にて報告した。さらに、分子輝線およびダスト放射の知見を応用し、宇宙マイクロ波背景放射分離法についても大きな成果が得られた。

これらを鑑みて、本課題において掲げた目標は十分達成したといえる。

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 44 件)

すべて査読有、主要なもののみ掲載

1. Takeuchi, T. T., et al., Formation, Evolution, and Revolution of Galaxies by SKA: Activities of SKA-Japan Galaxy Evolution Sub-SWG, SKA-JP Science Book, 1, 2016, 1-26
2. Nozawa, T., Asano, R. S., Hirashita, H., Takeuchi, T. T., Evolution of grain size distribution in high-redshift dusty quasars: integrating large amounts of dust and unusual extinction curves, 2015, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS), 447, pp. L16-L20
3. Koopmans, L., ... Takeuchi, T.(37th), et al. (43 authors), Cosmic Dawn and Epoch of Reionisation with SKA, Proceedings of Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14), 2015, pp. 9-13
4. Solarz, A., Pollo, A., Takeuchi, T. T., et al., Clustering of the AKARI NEP deep field 24 μm selected galaxies, 2015, Astronomy & Astrophysics (A&A), 582, id.A58(12 pp)
5. Ichiki, K., Kaji, R., Yamamoto, H., Takeuchi, T. T., Fukui, Y., CO Component Estimation Based on the Independent Component Analysis, 2014, ApJ, 780, id.13(7 pp)
6. Malek, K., Pollo, A., Takeuchi, T. T., Buat, V., Burgarella, D., Malkan, M., Giovannoli, E., Kurek, A., Matsuura, S. Properties of star forming galaxies in AKARI Deep Field-South, 2014, A&A, 562, id.A15(15 pp)
7. Rémy-Ruyer, A., Madden, S. C., Galliano, F., Galametz, M., Takeuchi, T. T., et al., Gas-to-dust mass ratios in local galaxies over a 2 dex metallicity range, 2014, A&A, 563, id.A31(22 pp)
8. Fiorenza, S. L., Takeuchi, T. T., Malek, K. E., Liu, C. T., Evolutionary Paths along the BPT Diagram for Luminous and Ultraluminous Infrared Galaxies, 2014, ApJ, 784, id.140(13pp)
9. Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., Nozawa, T., Evolution of extinction curves in galaxies, 2014, MNRAS, 440, p.134-142
10. Makiya, R., Totani, T., Kobayashi, M. A. R., Nagashima, M., Takeuchi, T. T., Galaxy luminosity function and its cosmological evolution: testing a new feedback model depending on galaxy-scale dust opacity, 2014, MNRAS, 441, pp.63-72
11. Casey, C. M., Scoville, N. Z., Sanders, D. B., Lee, N., Cooray, A., Finkelstein, S. L., Capak, P., Conley, A., De Zotti, G., Farrah, D., Fu, H., Le Floch, E., Ilbert, O., Ivison, R. J., Takeuchi, T. T., Are Dusty Galaxies Blue? Insights on UV Attenuation from Dust-selected Galaxies, 2014, ApJ, 796, id.95(15 pp)
12. Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., Nozawa, T., What determines the grain size distribution in galaxies? MNRAS, 432, 2013b, 637-652
13. Asano, R. S., Takeuchi, T. T., Hirashita, H., Inoue, A. K., Dust formation history of galaxies: A critical role of metallicity for the dust mass growth by accreting materials in the interstellar medium, 2013a, EPS, 65, pp.213-222
14. Takeuchi, T. T., Sakurai, A., Yuan, F.-T., Buat, V., Burgarella, D., Far-ultraviolet and far-infrared bivariate luminosity function of galaxies: Complex relation between stellar and dust emission, 2013, EPS, 65, pp. 281-290.
15. Takeuchi, T. T., Yuan, F.-T., Ikeyama, A., Murata, K. L., Inoue, A. K., Reexamination of the Infrared Excess-Ultraviolet Slope Relation of Local Galaxies, ApJ, 2011, 755, id. 144, 16 pp.
16. Kashino, D., Ichiki, K., Takeuchi, T. T., Test for anisotropy in the mean of the CMB temperature fluctuation in spherical harmonic space, Physical Review D, 85, 2012, 063001

[学会発表](計 79 件)

招待講演ないし国際会議のみ記載(招待講演は計 11 回)。

1. Tsutomu T. TAKEUCHI, VIPERS: Introduction for ALPACA Project, ALPACA Meeting (招待講演, 国際学会) 2015 年 12 月 01 日 ~ 2015 年 12 月 02 日 三鷹
2. Tsutomu T. TAKEUCHI, Atomic Gas, Molecular Gas, and Dust in Galaxy Evolution, 南極望遠鏡で切り開くテラヘルツ天文学 (招待講演), 2015 年 11 月 08 日 ~ 2015 年 11 月 19 日, 三鷹
3. Tsutomu T. TAKEUCHI, Structure and Evolution of Galaxies, Introduction to Cosmology (招待講演, 国際学会) 2015 年 07 月 15 日 ~ 2015 年 07 月 25 日,

- Kielce, Poland
4. Tsutomu T. TAKEUCHI, SKA による銀河サイエンス, 銀河・銀河間物質に関する観測・理論合同ミニワークショップ(招待講演) 2015年06月10日~2015年06月11日 筑波
 5. 竹内 努, 小山祐世, 松田一 光天連 SPICA タスクフォース報告系外銀河サイエンス, 第2回銀河進化研究会(招待講演), 名古屋, 2015年06月03日~2015年06月05日
 6. Tsutomu T. TAKEUCHI, Ryosuke S. ASANO, Hiroyuki HIRASHITA, & Takaya NOZAWA, The Formation and Evolution of Cosmic Dust,
 7. Gas, Dust, and Star-Formation in Galaxies from the Local to Far Universe (国際学会), 2015年05月25日~2015年05月29日, Chania, Greece
 8. T. T. Takeuchi, et al., Star formation and extinction properties of local galaxies seen by AKARI and GALEX all sky surveys, A Panchromatic View of Galaxy Evolution (国際学会), 2013年06月10日~2013年06月13日, Paphos, Cyprus
 9. Takeuchi, T. T., Star Formation and Extinction in Galaxies through Far-Ultraviolet and Far-Infrared, Galaxy Formation Theory in the Epoch of ALMA, (招待講演), 2012年3月6日, Hakone (Japan)
 10. Takeuchi, T. T., Formation and evolution of galaxies, Workshop on East-Asian Collaboration for SKA, (招待講演, 国際学会), 2011年12月1日, Daejeon (Korea)
 11. Takeuchi, T. T., Application of the Self-Organizing State Space Model to the CMB Foreground Subtraction, The CMB Foreground and the Cosmology of the Early Universe (招待講演, 国際学会), 2011年10月24日, Nagoya (Japan)
 12. Takeuchi, T. T., Far-Ultraviolet and Far-Infrared Bivariate Luminosity Function of Galaxies: Complex Relation between Stellar and Dust Emission, Asia Oceania Geosciences Society, 2011年8月11日, Taipei (Taiwan)
 13. Takeuchi, T. T., Construction and Exploration of the Far-Ultraviolet and Far-Infrared Bivariate Luminosity Function of Galaxies, From Dust to Galaxies 2011年6月30日, Paris (France)

〔図書〕(計 3 件)

1. 著者名: 竹内 努
出版社: 日本評論社
書名: 銀河 - その構造と進化 -
出版年: 2013
総ページ数: 397

2. 著者名: 竹内 努, 市来浄與, 松原隆彦
出版社: 共立出版
書名: 人はどのように宇宙を考えてきたか: 神話から加速膨張宇宙にいたる宇宙論の物語
出版年: 2015
総ページ数: 411

3. 著者名: Tsutomu T. Takeuchi (分担執筆)
出版社: Polskie Towarzystwo Astronomiczne
書名: Introduction to Cosmology
出版年: 2016
総ページ数: 100

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹内 努 (Tsutomu TAKEUCHI)
名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 90436072

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号: