

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740105

研究課題名(和文) 化学進化を統合的に取り入れた銀河のSEDモデル構築

研究課題名(英文) Construction of a galaxy SED model consistent with chemical evolution

研究代表者：

竹内 努 (TAKEUCHI TSUTOMU)

名古屋大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90436072

研究成果の概要(和文)：宇宙の星形成史および重元素合成史を明らかにするため、銀河の重元素量の進化、いわゆる銀河の化学進化を統合的に取り入れ、ダスト(星間塵)の質量及び組成の進化を含めた輻射モデルを構築した。また計算結果を紫外線から赤外線にわたる多波長観測データと比較することでモデルを検証し、全銀河年齢にわたって適用可能な銀河のダスト進化理論の構築に成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to reveal the history of star formation and heavy element production in the Universe, we have constructed a radiation model of galaxies consistent with the chemical evolution, i.e., the evolution of the amount of heavy elements. We then compared the model with multiwavelength observational datasets from ultraviolet to infrared wavelengths to examine the validity of the model, and succeeded in establishing the galaxy evolution model with dust production which can be applied to observational data at any age of galaxies.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学

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, 輻射輸送, ダスト形成, 化学進化

1. 研究開始当初の背景

「我々はどこから来たのか？」これに対する宇宙物理学からの答えは、我々の体を形作る**重元素**の源を明らかにすることであろう。重元素はビッグバン元素合成では形成されず、星の核反応で合成され、星の死にともなって星間空間に放出される。星間空間の重元素は次の世代の星や惑星に取り込まれ、やがて生

命の源となるのである。すなわち、宇宙の歴史のなかで星とガスの大集団である銀河がいに形成・進化してきたか、つまり**宇宙の星形成史**を正確に把握することは、重元素進化を理解するうえで極めて根本的な問題である。しかし現状では観測波長ごとに矛盾した描像が提唱され、宇宙の星形成史の真の姿は未だに明らかになっていなかった。銀河の星形成率は、原理的には大質量星から

の紫外線によって測定する。ところが重元素は星間空間では**固体微粒子(ダスト)**となって紫外線を吸収し、赤外線で再放射する。つまり、紫外・赤外線輻射は星形成の光と影であり、一方のみでは正確な星形成史を求めることはできない。この本質的複雑さが混乱の原因である。本研究は、紫外線・赤外線を中心とし、可視光、近赤外線から電波に至る多波長観測を出発点としてどのような銀河がどの程度宇宙の星形成・重元素合成に寄与してきたかを定量化し、これを再現する整合的な物理的モデルを構築することが目標である。

2. 研究の目的

私はこれまでのさまざまな波長にわたる銀河の光度関数の研究から、本来星形成と密接に結びついている2つの波長、**紫外線と赤外線**で光度関数進化が極めて異なっていることを見出した。その結果、**赤外線での銀河の星形成密度は紫外線よりはるかに激しく進化している(図1)**。

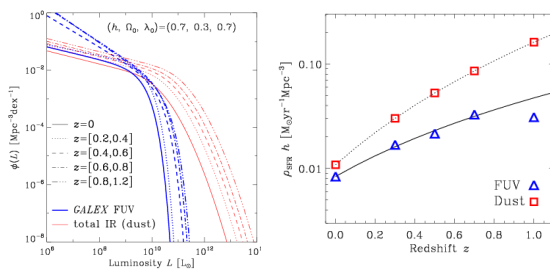


図1：紫外線・赤外線での銀河の光度関数進化(左図)およびこれから求めた星形成密度の進化(右図)(論文9より)。

このように、赤外線も紫外線も同じ星形成というメカニズムが起源であるにもかかわらず、その関係は極めて複雑であることが分かる。私のこれまでの観測的な観点からの研究により(上記論文)、赤外線と紫外線での銀河の光度関数進化の違いは、比較的近傍($z < 0.6$)では個々の銀河のダスト減光量が時代とともに変化してきたことが原因で、それ以上($0.6 < z < 1.2$)になるとほぼ全てのエネルギーを赤外線のみで放射する大光度赤外銀河という種族の銀河が出現し、消滅していったことが赤外線の卓越につながっていることが明らかになってきた。また、銀河のダスト減光は $z = 0.7$ 程度までは近傍銀河と同じ星形成率-減光量関係に従っており、単純に銀河進化による星形成率の現在へ向けての減衰が紫外-赤外光度比を支配していること、そしてそれ以上の赤方偏移では近傍の同じ星形成率の銀河に比べダスト減光が非常に小さい銀河の種族、逆に非常に大きい銀河の種族

が出現し、分散が大きくなることも分かった。このように、現象論的に「何が起きているのか」は私の研究によって徐々に明らかになりつつあるものの、この現象が「どのように起きているのか」、つまりこのような急激な進化を引き起こした物理過程が何なのかについては未解決のままである。そこで、このダスト減光を担う銀河の種族の急激な進化が何に起因するのかをより物理的に調べ、私は銀河の**化学進化**を整合的に取り入れた**多波長銀河進化モデル**を構築することを目指す。私はこれまでの研究で、星間物質の素過程が比較的単純な宇宙初期での銀河のダスト輻射モデルを構築し、進化の進んでいない銀河の赤外線輻射を再現することに成功している(図2)。若い銀河では時間スケールが短いためダスト供給源はII型超新星に限られ、銀河のダスト組成や減光曲線は近傍銀河と全く異なる。**ダスト組成も減光曲線も銀河進化に伴って進化するのである**。これが先行研究で見落とされていた重要な特徴であった。

このモデルを元に、I型超新星やWolf-Rayet, 赤色巨星(RGB), 漸近分枝星(AGB)などすべてのダスト供給源を考慮し、またダスト分布の幾何学的効果も取り入れた輻射モデルに拡張する。幾何学的効果はメガグレイン近似(Városi & Dwek 1999, ApJ, 523, 265)を発展させて用いることで系統的に行い、銀河の統計量と関連づける。これと、私のこれまでのデータ解析による研究を組み合わせることで、銀河進化の物理に迫れる。

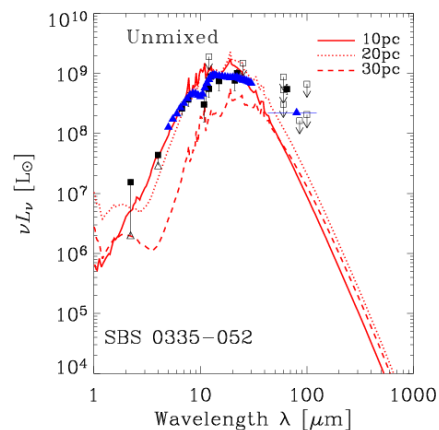


図2：近傍の超低金属量銀河のダスト輻射と私のモデル(論文10)。

3. 研究の方法

銀河からの紫外線放射を正確に扱うためには、ダスト粒子による吸収のみならず**散乱**も注意深く扱わねばならない。これは、吸収のみ考えていると散乱によって銀河の外

まで到達することができる紫外線光子の量を正しく評価できないため、ダスト輻射光度、温度など重要な物理量を過大評価してしまうためである。また逆に銀河から離脱できる紫外線の光度は過小評価となるため、銀河による宇宙再電離や星形成率の観測の解釈がこれにもなって過小評価されてしまう。

散乱は、ダストを含むガス雲を巨大な一つの出すと粒子として扱う**メガグレイン**近似と呼ばれる手法を実装することによって銀河モデルに取り入れる。ここで問題になるのは、メガグレイン近似はそのままでは輻射場と平衡状態にならない熱容量の小さいダストからの輻射(stochastic heating と呼ばれる)と相性が悪いことである。この問題は、半経験的定式化によって解決できる見通しが立ったので、この実装を行う。

超新星爆発によるダストの形成はまた、ダスト粒子の衝撃波破壊も伴う。これによって、いったん形成されたダスト粒子は小さいもの、脆いものから順に破壊されていく。小さいダストは中間赤外線での銀河のスペクトルエネルギー分布を計算するとき最も大きな寄与をするため、この過程を正しく扱うことは極めて重要である。新しいダスト形成・破壊計算を用いた原始銀河モデルの改訂を行い、現時点で可能な限りモデルを改良した。

さらに、銀河の減光曲線、化学進化を詳細に検討し、銀河形成期及び宇宙年齢後半の紫外線・赤外線光度比の理解に向けて理論の拡張を試みた。

現在は Spitzer 宇宙望遠鏡や AKARI 衛星(赤外線)、GALEX 衛星(紫外線)による観測データが出始めているフェーズであるが、初期データ特有のキャリブレーションの不安定さなどが影響しており、まだ理論的考察に耐えうるクオリティに達していなかったが、平成 21 年の終りに AKARI の全天探査データがついに公開になり、統計的な観測データとの詳細な比較がcaのうになった。これにより、モデルの妥当性を徹底的に吟味し、改良を重ねた。

銀河の SED モデルのフレームワークを完成し、ルーチン化する作業も重要である。宇宙論的計算は一回行うだけでも相当な時間を要するのが現状であり、SED 計算の部分が律速段階にならないような工夫が必要であるが、世界の研究を見回してもこの部分はまだクリアできていない。様々な初期質量、星形成史に対応できるように幅広い条件で計算を行い、データテーブル化して準解析的モデルや数値シミュレーションに使えるように改良を重ねている。

4. 研究成果

(1)観測サイドからの検証

GALEX 衛星(紫外線観測)、Spitzer 宇宙望遠鏡、および AKARI 衛星(赤外線観測)の観測データを用い、銀河における星の紫外線の吸収と赤外線再放射を精密に測定し、それが銀河のどのような性質と結びついているかを徹底検証した。その結果、赤外線は低温のダスト(遠赤外線を放射)だけではなく、**高温のダスト(中間赤外線を放射)からの寄与も大きく、特に芳香族巨大分子からなる微小ダスト(PAH と呼ばれる)の放射が重要であることを確認した。**これはモデル化に極めて重要である。さらに AKARI Deep Field South (ADF-S)のデータを用い、これまで**ダストがほとんどないとされていた S0 銀河の大部分がダストによる遠赤外線放射をしていることを発見した。**そして AKARI 衛星の全天探査で検出された銀河に可視光銀河探査 SDSS、紫外線衛星 GALEX の観測を組み合わせ、星形成、ダスト減光の性質を検証した。特に**赤外線+紫外線によって正確な星形成率が得られるので、これにより星形成率が 20 太陽質量/年を超える銀河ではその 90%がダストに隠され、紫外線では評価できないことを明らかにした。**同じく全天探査データによって、遠赤外線探査フラックスのみから銀河を選出する方法を開発した。また中間赤外線深探査 North Ecliptic Pole (NEP)のデータを用い、進化の進んだ星と新しく生まれる星の質量費(特性星形成率: SSFR)や光度関数の検証をおこなった。さらにサブミリ波宇宙望遠鏡 Herschel の観測が開始されたことを受け、隠れた星形成の研究をサブミリ波でも行えるよう拡張した。そして、わが国とヨーロッパ宇宙機構 ESA の共同で開発中の次世代赤外線望遠鏡 SPICA の観測計画構築の議論をリードし、有意義な計画となるよう定量的な議論を開始した。

(2)理論モデルの構築

また現象の現状で不定性の多い、超新星爆発に起因する衝撃波によるダストの破壊を世界で初めて取り入れたダスト減光曲線モデルを構築した。これらの結果はすでに一部論文として出版した。また、宇宙論的な構造形成と結びつけた統計的理論モデルを構築するための研究会を行った。そして、**特に超新星の衝撃波によるダスト粒子の破壊、星間物質中での破砕によるサイズ進化を取り入れた若い銀河のダスト輻射モデルを新たに完成した。**また、ダスト粒子の AGB 星による生成過程、星間分子雲による成長過程まで取り入れることで、**銀河年齢全体に適用できるダスト進化理論を構築することに成功した。**これらの成果は AKARI 等による観測的知見と合わせ、準解析的銀河モデルである Mitaka Model に実装した。

銀河のデータからの観測的知見、特に赤外線衛星 AKARI からの最新の成果をモデル化し、輻射の理論モデルに反映する作業は極めて

順調に進んでいる。加えて Herschel によるさらに遠方の銀河の観測データが大量に得られたこと、銀河の化学進化の理論化が計画以上に精密化できたことで、理論モデルの改良が予想外に大きく進展したといえる。最終年度(2011 年度)はメガグレインモデルを実装した紫外線散乱の部分を完成させる予定であったが、科学研究費補助金最終年度応募によって次の研究課題(基盤研究(B): 課題番号 23340046)へと拡張した形で受け継ぐことができたので、以降 5 年間の研究計画に取り入れている。

上記のように、本研究課題はより発展した形で基盤研究(B)へとつなぐことができた。次の研究計画では、これまで扱ってきた星形成と輻射に関する理論モデルを全バリオン(星とガス)とダークマターの力学まで整合的に扱い、宇宙暗黒時代から現在までの銀河形成進化を統一的にモデル化することを目指す。このため、新たに Planck および Square Kilometer Array といった次世代観測装置プロジェクトにも参入し、活発な議論を進めている。

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 34 件)

※主要なもののみ記載

1. Constructing a bivariate distribution function with given marginals and correlation: application to the galaxy luminosity function, Takeuchi, T. T. 2010, MNRAS, 406, 1830-1840
2. Star formation and dust extinction properties of local galaxies from AKARI-GALEX all-sky surveys: First results from most secure multiband sample from the far-ultraviolet to far-infrared, Takeuchi, T. T., Buat, V., Heinis, S., Giovannoli, E., Yuan, F., Iglesias-Páramo, J., Murata, K. L., Burgarella, D., 2010, A&A, 514, A4 (13pages)
3. Star forming galaxies in the AKARI Deep Field South: identifications and SEDs, Malek, K., Pollo, A., Takeuchi, T. T., Bienias, P., Shirahata, M., Matsuura, S., Kawada, M., Astronomy & Astrophysics (以下 A&A), 514, A11 (21pages)
4. The infrared emission of ultraviolet-selected galaxies from $z = 0$ to $z = 1$ Buat, V., Takeuchi, T. T., Burgarella, D., Giovannoli, E., Murata, K. L. 2009, A&A, 507, 693
5. Star formation history of galaxies from $z = 0$ to $z = 0.7$: backward approach to the evolution of star-forming galaxies *Buat, V.,

Boissier, S., Burgarella, D., Takeuchi, T. T., Le Floc'h, E., Marcillac, D., Huang, J., Nagashima, M., & Enoki, M. 2008, A&A, 483, 107-119

[学会発表] (計 30 件)

※主要なもののみ記載

1. First Results on the Star Formation and Extinction in Local Galaxies from AKARI All-Sky Surveys, 竹内 努, 赤外線から切り込む銀河形成理論の新展開 ~ あかりからALMAへ, 招待講演, 2011年3月24日 (伊王島: 長崎)
2. First Results on the Star Formation and Extinction in Local Galaxies from AKARI All-Sky Surveys, Takeuchi, T. T., Cosmic Microwave Background Radiation and Its Foreground, Interstellar Components, 招待講演, 2011年2月17日 (西葛西: 東京)
3. Physics of the Formation and Evolution of Galaxies, Takeuchi, T. T., Japan SKA Workshop 2010, 招待講演, 2010年11月4日 (三鷹: 東京)
4. The Star Formation Rate functions at $z = 0-1$: the latter half of the history of visible and hidden star formation in the Universe, Takeuchi, T. T., et al., Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation, 2009年10月20日 (Malta: Malta)
5. Prospect from SPICA: Theoretical point of view, Takeuchi, T. T., 第22回理論懇シンポジウム「2010年代の理論天文学」, 招待基調講演, 2009年12月21日 (名古屋: 愛知)

[その他]

ホームページ(公開データ発信等に使用)

<http://garm.iar.nagoya-u.ac.jp/~takeuchi>

プレスリリース

名古屋大学高等研究院からのリンク

<http://www.iar.nagoya-u.ac.jp/SRPR/takeuchiNews.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 努 (TAKEUCHI TSUTOMU)

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: