

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 6日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011～2012

課題番号：23840007

研究課題名（和文） 新しいサブミリ波分光方式に基づく高赤方偏移銀河の研究

研究課題名（英文） Study on High-Redshift Galaxies Based on a New Method for Submillimeter Spectroscopy

研究代表者

田村 陽一（TAMURA YOICHI）

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：10608764

研究成果の概要（和文）：

周波数標準信号を変調し高頻度で分光データを取得する電波天文学用受信システムを開発し、アステ望遠鏡（南米チリ）に実装した。この結果、従来の分光方式と比較して5倍高い観測効率を達成し、高赤方偏移銀河の星間物質の検出に有効なことを立証した。また、銀河中の星間物質を調査するのに最適なサブミリ波を用いた重点的な観測にもとづき、高赤方偏移の爆発的星形成銀河の赤方偏移推定法の提案と赤方偏移推定、大規模構造との空間相関、ライマン α 輝線銀河の隠された星形成活動の欠如などを示すことに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We develop a new method for (sub)millimeter spectroscopy with a frequency-modulating local oscillator and implemented it on the ASTE submillimeter telescope in Chile. This improves observing efficiencies ($\times 5$) of single-dish spectroscopic observations, compared to conventional methods. Furthermore, we propose a new method for estimating redshifts of dust-enshrouded star-forming galaxies and reveal star-formation activities in high redshift starburst galaxies on the basis of submillimeter observations, spatial correlation with cosmic large-scale structures, and a lack in obscured star-formation in Lyman-alpha emitting galaxies, and so on.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

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：電波天文学・ミリ波サブミリ波・銀河形成論・信号解析

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙物理学の中心課題である暗黒物質は、高赤方偏移 ($z \approx 1-10$) の時代において、星・銀河・宇宙大規模構造（銀河の大集団）という宇宙の基本構造の形成に重力的

に関与したと考えられる。したがって、この時代のバリオン系（銀河）の空間分布は、暗黒物質の影響を反映しているはずだ。しかし、もっとも感度の高い可視光望遠鏡をもってしても、この時代に存在する形成期の銀河の

すべてを観測することは難しい。それもそのはず、形成期の銀河に多数存在するはずの誕生直後の大質量星は、巨大分子雲とよばれる分子ガスと塵の"繭"に包まれているからだ。

サブミリ波は、この銀河の繭の検出にすぐれている。大質量星が放射する紫外線・可視光により暖められた大量の恒星材料（塵・ガス）が、今度は遠赤外線で大規模なエネルギーを放出する。爆発的な星形成とともに誕生する銀河の遠赤外線光度は、ときに天の川銀河の1000倍以上に及ぶ。これが宇宙膨張にともなうドップラー効果で波長が伸び（赤方偏移）、サブミリ波で明るく輝くのだ。

研究代表者のグループは、2007-08年に我が国で初となる、世界でも抜きん出た大規模なサブミリ波深宇宙撮像探査を行い、1000個をこえる高赤方偏移の「サブミリ波銀河」のオリジナルサンプルを構築した (Kohno & Tamura et al. 2008; Scott et al. 2010; Hatsukade et al. 2011)。研究代表者の予備的研究により、これらの約90%が高赤方偏移 ($z > 1$) に存在することがわかっている。特筆すべきは、天球面上におけるこれらの銀河の分布が、高赤方偏移 ($z = 3$) に位置する既知の大規模構造と強い空間相関を示すことである (Tamura et al., Nature, 2009)。サブミリ波銀河が高赤方偏移で発見されやすいこと、暗黒物質が大規模構造を重力的に支配していることを考えると、サブミリ波銀河を目印にして高赤方偏移宇宙に広がる暗黒物質の分布を知ることができる可能性が高い。実際に、サブミリ波銀河が大質量の暗黒物質系をトレースする観測的証拠が多く報告されている。

この可能性を検証するためには、(1) サブミリ波銀河が放射する輝線の分光観測により赤方偏移（奥行き）を測定することで銀河の3次元分布をとらえ、他の方法ですでに同定されている大規模構造の空間分布と相関しているかを調べる必要がある。一般に銀河の赤方偏移は可視光分光観測で得られるが、銀河の繭たるサブミリ波銀河の多く（約50%）は可視光できわめて暗い (Tamura et al. 2010)。その一方で、サブミリ波銀河には多くの分子ガスが存在することがわかっている (Iono & Tamura et al. 2006)。したがって、(サブ)ミリ波における一酸化炭素分子 (CO) や炭素原子 (C, C+) の分光検出が強力になる。

2. 研究の目的

上記背景をもとに、本研究は、高赤方偏移のサブミリ波銀河が既知の大規模構造をトレースするのかわ、オリジナルの銀河サンプルと独自の赤方偏移測定法を用いて検証することを目的とした。そのために、低コストかつ感度の大幅な感度向上が期待される新

しいサブミリ波分光方式の基礎的な開発を行う。研究期間内に以下を明らかにすることを目標とした。

(1) 周波数変調局部発振器を用いた新しいサブミリ波分光方式の開発

(2) 多波長データを利用したオリジナル銀河サンプルの赤方偏移推定と銀河諸性質の理解

(3) サブミリ波銀河と大規模構造の空間相関の調査

3. 研究の方法

(1) 周波数変調局部発振器を用いた新しいサブミリ波分光方式の開発：

電波受信システムの周波数標準（局部発振器）を周波数変調しながら高周波で分光データをサンプルする受信システムを構築する。サブミリ波連続波撮像観測方式で成功している解析アルゴリズムを応用し、この受信システムにより得られるデータ処理ソフトウェアの開発を行う。これらの手法をASTEサブミリ波望遠鏡（チリ）に実装し、実用レベルに到達させる。

(2) 多波長データを利用したオリジナル銀河サンプルの赤方偏移推定と銀河諸性質の理解：

すでに構築済みの銀河サンプルのうち、既知の大規模構造の存在が確認されている天域に対して、多波長データのスペクトル解析と独自の赤方偏移推定法から赤方偏移を推定する。多波長データにもとづく銀河自体の性質（質量、星形成活動、銀河中心活動の度合い）の理解を進める。

(3) サブミリ波銀河と大規模構造の空間相関の調査：

これらの銀河の赤方偏移をもとに、サブミリ波銀河の3次元地図を描く。これが既知の大規模構造と空間相関しているかを検証する。

4. 研究成果

(1) 周波数変調局部発振器を用いた新しいサブミリ波分光方式の開発：

2011年度に局部発振器の周波数変調制御を行うシステムの設計と構築、2012年度にASTE望遠鏡への実装、および345 GHzサブミリ波帯における試験観測を行った結果、本提案手法の技術実証に成功した。また、本分光方式専用のデータ処理アルゴリズムの開発も同時に推進し、この評価試験をもとに、専用データ処理ソフトウェアを開発した。2011年度には、本観測法に基づけば、既存の分光法と比較して2.1倍の感度向上（4.4倍の観測効率向上）が可能であることをシミュ

レーションで示したが、2012年度のASTE望遠鏡を用いた実証試験で2.4倍の感度向上(5.5倍の観測効率向上)が可能なことを示した(Tamura et al., 2013, ASPC, in press)。さらに、2012年度末には当初の目標をさらに超えるかたちで、国立天文台野辺山45mミリ波望遠鏡への本手法の応用に着手しており、実用化を行っている。

(2) 多波長データを利用したオリジナル銀河サンプルの赤方偏移推定と銀河諸性質の理解:

サブミリ波銀河は、強い星間減光のため可視光できわめて暗く、主に可視光や近赤外線分光観測にもとづく赤方偏移測定ができない難点がある。本研究で提案した推定法は、観測により得られた複数の赤外線銀河のSED、遠赤外線光度関数と進化から、モンテカルロ法によってミリ波サブミリ波銀河のSEDとして尤度の高いものを事前に選別し、各SEDテンプレートに対して確率的な重み付けを行う。そのうえで、これらのテンプレートを用いて測光データへの当てはめを行うことで、赤方偏移推定の系統誤差を抑制することが特長である。ミリ波サブミリ波、センチ波、中間赤外線測光データへの当てはめの場合、 $\Delta z / (1+z) \sim 0.1$ 程度の精度が得られることがわかった。さらに、大気透過率モデルおよびサイト調査結果をもちいたモンテカルロ実験では、1.1, 0.85, 0.45 mmの3バンドのみの観測で、比較的高い赤方偏移推定精度が得られることがわかった。この結果は、東京大学、国立天文台他が開発しているASTEサブミリ波望遠鏡用サブミリ波カメラの概念設計へ応用されている。

また、1.1ミリ波撮像データや多波長データをもとにし、ライマン α 輝線銀河やサブミリ波銀河などの様々な高赤方偏移銀河の研究も推進した。可視光挟帯域撮像で発見される巨大ライマン α 輝線銀河は大規模構造中でとくに発達する原始銀河の重要な一形態と目されるが、天の川銀河の数十倍の大きさにおよぶ電離ガス雲がなぜ、どのように生成されるかが不明であり、銀河形成論の重要な課題のひとつとなっている。その生成機構として爆発的星形成活動が周囲のガスを電離させる説が有力視されているが、高感度のデータがないため依然決着していない。我々はサブミリ波銀河探査で構築した1.1ミリ波画像をもとに、巨大ライマン α 輝線銀河の星間物質に隠された星形成活動を調査した。この結果、従来唱えられていた爆発的星形成活動は存在せず、活動銀河核による輻射や銀河間ガスの降着流等、他の要因によって電離ガス雲が生成される可能性を示した。(Tamura et al. 2013, MNRAS, 430, 2768)

そのほかにも、一酸化炭素分子輝線分光観

測にもとづく星形成銀河の赤方偏移決定と分子ガス質量推定 (Iono et al. 2012)、ミリ波・近赤外線分光撮像に基づく星形成銀河の理解 (Kaneko et al. 2013, Alaghband-Zadeh et al. 2012, Ueda et al. 2012)、1.1ミリ波連続波カメラによる遠方サブミリ波銀河の理解 (Johnson et al. 2013, Scott et al. 2012, Yun et al. 2012, Aretxaga et al. 2011, Ikarashi et al. 2011)などの科学的成果の進展があった。

(3) サブミリ波銀河と大規模構造の空間相関の調査:

さきに構築した赤方偏移3.1に位置する原始銀河団方向のサブミリ波銀河に対して、多波長対応天体の同定、および測光的赤方偏移の推定を行った結果、これらのうち少なくとも10個が原始銀河団メンバーと同定された。さらに原始銀河団を構成するライマン α 輝線銀河とサブミリ波銀河の2点角度相関関数は両者の強い空間相関を示し、またサブミリ波銀河の体積密度が一般領域に比して数桁高いことがわかった。さらに、最近のすばる望遠鏡の観測から発見されたライマン連続光銀河が原始銀河団の周囲に分布し、サブミリ波銀河の分布と空間的な反相関を持つことも新たにわかった。

サブミリ波銀河とライマン連続光銀河は、それぞれ、塵を大量に持った極めて強い星形成を行う大質量銀河と低い金属量をもつ極めて若い小質量銀河であり、銀河種族の対局をなす。したがって、本研究で示された結果は、原始銀河団のなかでも特に高密度の環境で選択的に大質量銀河が形成・進化するという、銀河進化の環境依存性を強く示唆する(Umehata & Tamura et al., 準備中)。

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13件)

1. Tamura, Y., Matsuda, Y., Ikarashi, S., Scott, K. S., Hatsukade, B., Umehata, H., Saito, T., Nakanishi, K., Yun, M. S., Ezawa, H., Hughes, D. H., Iono, D., Kawabe, R., Kohno, K., Wilson, G. W., "Obscured star formation in Ly-alpha blobs at $z = 3.1$ ", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 430, pp. 2768-2773, 2013, 査読有り
2. Johnson, S. P., Wilson, G. W., Wang, Q. D., Williams, C. C., Scott, K. S., Yun, M. S., Pope, A., Lowenthal, J., Aretxaga, I., Hughes, D., Kim, M. J., Kim, S., Tamura, Y., Kohno, K., Ezawa, H., Kawabe, R.,

- Oshima, T., "X-ray detections of submillimetre galaxies: active galactic nuclei versus starburst contribution", *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*, vol. 431, pp. 662-682, 2013, 査読有り
3. Kaneko, H., Kuno, N., Iono, D., Tamura, Y., Tosaki, T., Nakanishi, K., Sawada, T., "Properties of molecular gas in galaxies in early and mid stages of the interaction. I. Distribution of molecular gas", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 65, pp. 20-35, 2013, 査読有り
4. Iono, D., Hatsukade, B., Kohno, K., Kawabe, R., Ikarashi, S., Ichikawa, K., Kodama, T., Motohara, K., Nakajima, T., Nakanishi, K., Ohta, K., Ota, K., Saito, T., Suzuki, K., Tadaki, K., Tamura, Y., Ueda, J., Umehata, H., Yabe, K., Yoshida, T., Yuma, S., Kuno, N., Takano, S., Iwashita, H., Handa, K., Miyazawa, C., Miyazawa, K., Muraoka, K., Ogawa, H., Onodera, S., Saito, Y., Sakai, T., Takahashi, S., Yun, M. S., "Initial results from Nobeyama molecular gas observations of distant bright galaxies", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 64, pp. L2-L5, 2012, 査読有り
5. Alaghband-Zadeh, S., Chapman, S. C., Swinbank, A. M., Smail, I., Harrison, C. M., Alexander, D. M., Casey, C. M., Dave, R., Narayanan, D., Tamura, Y., Umehata, H., "Integral field spectroscopy of $2.0 < z < 2.7$ submillimetre galaxies: gas morphologies and kinematics", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 424, pp. 2232-2248, 2012, 査読有り
6. Scott, K. S., Wilson, G. W., Aretxaga, I., Austermann, J. E., Chapin, E. L., Dunlop, J. S., Ezawa, H., Halpern, M., Hatsukade, B., Huges, D. H., Kawabe, R., Kim, S., Kohno, K., Lowenthal, J. D., Montana, A., Nakanishi, K., Oshima, T., Sanders, D., Scott, D., Scoville, N., Tamura, Y., Welch, D., Yun, M. S., Zeballos, M., "The source counts of submillimetre galaxies detected at $\lambda = 1.1$ mm", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 423, pp. 575-589, 2012, 査読有り
7. Hatsukade, B., Hashimoto, T., Ohta, K., Nakanishi, K., Tamura, Y., Kohno, K., "Constraints on obscured star formation in host galaxies of gamma-ray bursts" *The Astrophysical Journal*, vol. 748, pp. 108-111, 2012, 査読有り
8. Yun, M. S., Scott, K. S., Guo, Y., Aretxaga, I., Giavalisco, M., Austermann, J. E., Capak, P., Chen, Y., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Johnson, S., Kawabe, R., Kohno, K., Lowenthal, J., Miller, N., Morrison, G., Oshima, T., Perera, T. A., Salvato, M., Silverman, J., Tamura, Y., Williams, C. C., Wilson, G. W., "Deep 1.1 mm-wavelengths imaging of the GOODS-South field by AzTEC/ASTE: II. Redshift distribution and nature of the submillimetre galaxy population", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 420, pp. 957-958, 2012, 査読有り
9. Ueda, J., Iono, D., Petitpas, G., Yun, M. S., Ho, P. T. P., Kawabe, R., Mao, R.-Q., Martin, S., Matsushita, S., Peck, A. B., Tamura, Y., Wang, J., Wang, Z., Wilson, C. D., Zhang, Q., "Unveiling the physical properties and kinematics of molecular gas in the Antennae galaxies (NGC 4038/39) through high-resolution CO ($J = 3-2$) observations", *The Astrophysical Journal*, vol. 745, pp. 65-78, 2012, 査読有り
10. Komugi, S., Tosaki, T., Kohno, K., Tsukagoshi, T., Nakanishi, K., Sawada, T., Kawabe, R., Ezawa, H., Kuno, N., Onodera, S., Tamura, Y., Wilson, G. W., Yun, M. S., Scott, K. S., Perera, T. A., Austermann, J. E., Hughes, D. H., Aretxaga, I., Tanaka, K., Muraoka, K., Miura, R., Egusa, F., "Temperature variations of the cold dust in the Triangulum Galaxy M 33", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, vol. 63, pp. 1139-1150, 2011, 査読有り
11. Aretxaga, I., Wilson, G. W., Aguilar, E., Alberts, S., Scott, K. S., Scoville, N., Yun, M. S., Austermann, J., Downes, T. P., Ezawa, H., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Kawabe, R., Kohno, K., Oshima, T., Perera, T. A., Tamura, Y., Zeballos, M., "AzTEC millimetre survey of the COSMOS field: III. Source catalogue over 0.72 deg² and plausible boosting by large-scale structure", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 415, pp. 3831-3850, 2011, 査読有り
12. Ikarashi, S., Kohno, K., Aguirre, J. E., Aretxaga, I., Arumugam, V., Austermann, J. E., Bock, J. J., Bradford, C. M., Cirasuolo, M., Earle, L., Ezawa, H., Furusawa, H., Furusawa, J., Glenn, J., Hatsukade, B., Hughes, D. H., Iono, D., Ivison, R. J., Johnson, S., Kamenetzky, J., Kawabe, R., Lupu, R., Maloney, P., Matsuhara, H., Mauskopf, P. D., Motohara, K., Murphy, E. J., Nakajima, K., Nakanishi, K., Naylor, B.

J., Nguyen, H. T., Perera, T. A., Scott, K. S., Shimasaku, K., Takagi, T., Takata, T., Tamura, Y., Tanaka, K., Tsukagoshi, T., Wilner, D. J., Wilson, G. W., Yun, M. S., Zmuidzinas, J., "Detection of an ultrabright submillimetre galaxy in the Subaru/XMM-Newton Deep Field using AzTEC/ASTE", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 415, pp. 3081-3096, 2011, 査読有り

13. Tamura, Y., Kawabe, R., Kohno, K., Fukuhara, M., Momose, M., Ezawa, H., Kuboi, A., Sekiguchi, T., Kamazaki, T., Vila-Vilaro, B., Nakagawa, Y., Okada, N., "The Millimeter Sky Transparency Imager (MiSTI)", Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 63, pp. 347-356, 2011, 査読有り

13. Tamura, Y., Tatamitani, Y., Takahashi, S., Horigome, O., Maekawa, J., Kohno, K., Sakai, T., Taniguchi, A., "A New Off-point-less Method for Mm/submm Spectroscopy with a Frequency-modulating Local Oscillator", Astronomical Society of the Pacific Conference Series, eds. Kawabe, R. & Yamamoto, S., 2013, in press., 査読無し

[学会発表] (計5件)

1. Tamura, Y., "A New Off-point-less Method for Milimeter/Submillimeter Spectroscopy with a Frequency-Modulating Local Oscillator", New Trends in Radio Astronomy in the ALMA Era, 2012/12/03-2012/12/08, The Prince Hakone (神奈川)

2. 田村陽一, 「周波数変調局部発振器による新しいミリ波サブミリ波分光法: I. 受信システムの開発」, 日本天文学会 2012 年秋季年会, 2012/9/19-2012/9/21, 大分大学 (大分)

3. 田村陽一, "The AzTEC/ASTE 1.1-mm Survey of Ly-alpha Blobs at $z = 3.1$ ", 日本天文学会 2012 年春季年会, 2012/3/21, 龍谷大学 (京都)

4. 田村陽一, "ベイズ統計・モンテカルロ法にもとづくサブミリ波銀河の赤方偏移推定法", 日本天文学会 2011 年秋季年会, 2011/9/20, 鹿児島大学 (鹿児島)

5. 田村陽一, "ミリ波サブミリ波カメラによる広視野イメージング", 日本可視化情報学会 第 39 回可視化情報シンポジウム, 2011/7/18, 工学院大学 (東京)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~ytamura/Wiki/?FML0>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 陽一 (TAMURA YOICHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号: 10608764