

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19340046
 研究課題名 (和文) 宇宙初代天体と宇宙再電離源の観測的研究
 研究課題名 (英文) An Observational Study on First Galaxies and the Cosmic Reionization
 研究代表者
 谷口 義明 (TANIGUCHI YOSHIAKI)
 愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授
 研究者番号：40192637

研究成果の概要 (和文)：

文部科学省国立天文台の「すばる望遠鏡」(アメリカ合衆国ハワイ州ハワイ島マウナケア山頂に設置されている口径8.2mの光学・赤外線望遠鏡)が世界に誇る広視野赤外線カメラ(MOIRCS)を用い、いくつかの天域に対し深宇宙探査を行った。合わせて、ヨーロッパ南天天文台およびハッブル宇宙望遠鏡のデータを用いて高赤方偏移銀河の探査を継続中である。赤方偏移8の銀河では重元素量の少ない、第1世代星の生成が起こっていることを発見した。

研究成果の概要 (英文)：

Using the multi-object infrared camera and spectrograph (MOIRCS) on the 8.2 m Subaru Telescope atop of Mt. Mauna Kea in Hawaii, USA (operated by the National Astronomical Observatory of Japan), we have made infrared deep imaging surveys for a few sky areas. We have been also making similar infrared surveys using the VISTA telescope of European Southern Observatory and the Hubble Space Telescope. Through these observations, we have found that low-metallicity star formation occurred in very high redshift galaxies.

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,500,000	1,950,000	8,450,000
2008 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：銀河形成・銀河活動中心核・初代天体・宇宙再電離源

1. 研究開始当初の背景

現在、我々人類が手にしている宇宙論(ビッグバン宇宙論)によれば、宇宙は約140億年前に始まったと考えられている。原初物質(水素、ヘリウム、及び微量の軽元素)は熱

いプラズマ状態から、宇宙膨張と共に冷えて赤方偏移 (z) 1000 の頃にプラズマは再結合した。そして、その時のわずかな密度揺らぎから現在観測されるような多様な銀河宇宙が形成されるに至ったのである。我々がこの宇宙の歴史を観測するとき、観測可能な最も遠方の (最も古い時代の) 情報は 2.7 K の宇宙マイクロ波背景放射 (CMBR) であり、 $z \approx 1000$ に相当する時期 (宇宙誕生後約 40 万年) の情報になる。このように宇宙開闢後間もない頃の情報が得られているにも拘らず、銀河やクェーサーなどの構造が見え始めるのは $z \approx 6-7$ である。この未だかつて全く観測されていない $z \approx 1000$ から $z \approx 6$ の期間に何が起こったかを見極めることが、人類が 21 世紀に挑戦しなければならない、まさに天文学のフロンティアであると認識されている。特に、再結合以来、続いていた宇宙の暗黒時代がどの種の天体によってブレークされたか調べることは非常に重要な研究課題である。

もうひとつの重要課題は宇宙再電離問題である。 $z \approx 1000$ で宇宙が中性化したことは、CMBR の観測から明らかであるが、高赤方偏移クェーサーのスペクトルをみると宇宙がどこかで再び電離したことがわかる。その証拠は高赤方偏移クェーサーのライマン α より短波長側の連続光における吸収の度合いを調べることで得られる (ガンピーターソン・テスト)。「宇宙はいったい何時、何によって再電離されたのか？」この問題は宇宙の暗黒時代を破った宇宙初代の天体の解明と共に、観測的宇宙論にとって極めて重要な問題であり、今世紀に解明されるべき基本問題の一つであることは疑いない。

宇宙再電離源の候補天体としては銀河 (即ち大質量星) とクェーサーなどの活動銀河核の 2 種類がある。しかし、クェーサーは $z \approx 2$ に個数密度のピークがあり、 $z > 2$ の高赤方偏移宇宙における密度が低いため、最近では銀河起源の考え方が主流になってきている。どの時期にできた銀河が主たる宇宙再電離源なのかを探求するため、ここ 2、3 年の研究動向は可視光帯最後のフロンティアである $z \approx 6-7$ の銀河の探査が主流になってきている。実際、我々のグループもすばる・ディープ・フィールドチームとの共同研究でまさにこの赤方偏移帯の観測的研究を行っており、実際に $z > 6$ の銀河を多数発見してきている。

最近、 $z > 6$ のクェーサーの発見が続き、それらの紫外スペクトルの様子から、 $z \approx 6$ で既に宇宙再電離のトレーリング・エッジが見えてきている可能性が議論され始めた。つ

まり、宇宙再電離は $z \approx 6$ の頃に起こったというのである。 $z = 6.3$ で発見されたガンマ線バーストの可視光スペクトル観測も、この赤方偏移での宇宙の電離は、かなり進行していることを示唆している。一方、すばる・ディープ・フィールドで発見された $z = 6.6$ と $z = 5.7$ のライマン α 輝線銀河の光度関数を調べると、 $z = 6.6$ の方で、明るいライマン α 輝線銀河の個数密度が減少していることが示唆されている。このことは、 $z > 6$ で宇宙再電離は進んでいるものの、電離源が果たして銀河なのかどうか、疑問を投げかける要因になっている。

このように、宇宙再電離に関する問題も、急速に観測データが集まりつつある。電離源がプランク型スペクトラムをもつ大質量星 (いわゆる Population III 天体) なのか、パワー型スペクトラムをもつブラックホール天体なのかによって、電離の非一様性の度合いも変わってくるだろう。また、宇宙再電離がどのように進行してきたのか、非一様性の程度はどうだったのか、という重要な問題については、まったくといって情報がない。すなわち、 $z > 7$ の天体の詳細な観測例がないため、解決にはまだ時間を要する状況が続いている。

ここで我々が認識すべきことは、口径 8m 級による可視光帯でのサーベイは既にやれる限界に達しており、大きな新展開はもはや期待できない状況になってきていることである。可視光帯を超え、近赤外線帯でのディープサーベイに突入すべき時代がやってきたのである。

その燭光は、既にハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールド (UDF) の観測で見え始めてきている。UDF では可視光帯のみならず、NICMOS 及び WFC3 カメラによる近赤外線の撮像も行った。そのため、Y ドロップアウトや J ドロップアウトなどの探査が可能になり、ようやく $z > 8-10$ の確からしい銀河候補が発見されるようになった。

また、近傍銀河団による重力レンズ効果で明るくなっている $z > 8$ の天体のサーベイが近赤外線域で行われ、数個の $z = 9-10$ のライマン α 輝線銀河がスペクトル的に同定され始めた (Caltech の Richard Ellis 氏の研究グループ)。ちなみに可視光帯でスペクトル的に同定された遠方銀河はすばるディープ・フィールドで発見された $z = 6.96$ である。このような状況に鑑み、本計画では可視光帯ではプローブできない $z > 8$ の高赤方偏移宇宙にある銀河やクェーサーの近赤外線探査を行う。また、銀河間ガスの電離の様子を直

接ライマン α 輝線をプローブとして観測することも目標の一つとして設定した。

2. 研究の目的

前項に記したように、研究の目的は [1] 高赤方偏移宇宙における銀河形成過程と、その初期進化の研究、および [2] 宇宙再電離源の研究である。

3. 研究の方法

[1] 文部科学省国立天文台の「すばる望遠鏡」(アメリカ合衆国ハワイ州ハワイ島マウナケア山頂に設置されている口径 8.2mの光学・赤外線望遠鏡)が世界に誇る広視野赤外線カメラ(MOIRCS)を用いた深宇宙探査。

[2] ヨーロッパ南天天文台の赤外線サーベイ専用望遠鏡 VISTA による、深宇宙探査。

[3] ハッブル宇宙望遠鏡のハッブル・ウルトラ・ディープ・フィールドの公開データを用いた深宇宙探査。

本計画の研究手法のメインは [1] であるが、より効率的に研究を進めるために [2] と [3] の計画も実行した。

4. 研究成果

本計画では、文部科学省国立天文台の「すばる望遠鏡」(アメリカ合衆国ハワイ州ハワイ島マウナケア山頂に設置されている口径 8.2mの光学・赤外線望遠鏡)が世界に誇る広視野赤外線カメラ(MOIRCS)を使用した。MOIRCSは口径8m級の望遠鏡に搭載される赤外線カメラとしては世界最大の広視野(4分×7分)を誇り、国際的に大きな注目を集めている装置である。

我々は1.1ミクロンから2.3ミクロンまでの近赤外線域における狭帯域干渉フィルターを既に製作した。これらのフィルターをMOIRCSに装着し、いくつかの天域に対し、ディープ・サーベイを行ってきつつある。

研究を展開する。ターゲットにする赤方偏移は水素ガスのライマン α 線に対して、 $z = 9$ から18となる。近赤外線域においては標準的なJHKバンドの広帯域フィルターを用いたサーベイは存在するが、本計画にあるような狭帯域フィルターによるサーベイはない。この理由は、まさに口径8m級の望遠鏡に広視野赤外線カメラが存在しなかったことによる。MOIRCSはまさに理想的な観測装置であるといえる。

現在まで、論文として研究成果をとりまとめたのは電波銀河4C23.56をターゲットにした観測である。この研究では狭帯域フィルターNB2296(通称COフィルター)を用いた：中心波長2.296ミクロン、半値幅230Å。赤方偏移 $z = 18$ のライマン α 輝線銀河の検出には至らなかったが、電波銀河4C23.56の周辺に赤方偏移 $z = 2.5$ のH α 輝線銀河がクラスタリングしていることを発見した。この赤方偏移でのover-density regionの発見は非常に価値のあるものである。

また、赤方偏移 $z = 8$ の銀河がハッブル宇宙望遠鏡のウルトラ・ディープ・フィールドで検出された。そこで、これらの天体の検出がリアルであるかどうか独自の検証を行った。その結果、8個の赤方偏移 $z = 8$ の銀河を確定することができた。これらの結果に基づき、 $z = 8$ の銀河の星生成の性質を明らかにし、また宇宙再電離を担う電離光子が銀河によるものであることを証明した。

さらに、ヨーロッパ南天天文台のVISTA望遠鏡(広視野近赤外線専用望遠鏡：南米チリ共和国に設置)を用いた広域近赤外線サーベイであるULTRA-VISTAプロジェクトを2009年より開始した。ULTRA-VISTAで観測する天域はCOSMOS天域(赤経=10時、赤緯=0度)のうち、以下に示すような1度×1.5度=1.5平方度の領域である。濃い斜線部で示した天域がUltra Deep Survey Fieldであり、それ以外の天域は浅く掃く天域である。比較のため、右側にはハッブル宇宙望遠鏡で行われた他のサーベイの天域の広さを示してある。使用するフィルターは広帯域フィルターがY、J、H、及びKsの4枚で、狭帯域フィルターがNB1185の1枚である。広帯域フィルターのデータはドロップアウトテクニックを用いて赤方偏移6.3から10の銀河探査に用いられ、一方NB1185は赤方偏移8.8のライマン α 輝線銀河の検出に用いられる。観測時間及び限界等級(5σ : AB等級)は以下のように設定されている。Y: 320時間、Y(lim)=26.7、J: 320時間、J(lim)=26.6、H: 320時間、Y(lim)=26.1、Ks: 320時間、Ks(lim)=25.6、及びNB1185: 180時間、NB(lim)=24.1。また、このほかに、COSMOS天域1.5平方度を浅く掃くために広帯域フィルター1枚当たり、約50時間の観測を行っている。

また、将来計画になるが、観測戦略上、今まで誰も検出に挑戦して来なかった高赤方偏移宇宙の電離された銀河間ガス雲の検出に挑める点をあげておきたい。最近の宇宙再電離の数値計算によると、銀河間ガスの放射

するライマン α 輝線の表面輝度は $0.01\mu\text{Jy arcsec}^{-2}$ のオーダーである。このような電離源が空間的に 100arcsec^{-2} 程度に広がって分布しているとすると $\text{SN}=10$ として 100 時間の積分で検出できる。これは我々の想定している観測で、十分検出可能な範囲にある。もし検出できれば、そのインパクトはあまりにも大きい。仮に検出できなくとも、多数のライマン α 輝線天体の検出につながることは間違いなく、宇宙再電離源の起源の解明に大きなインパクトを与える。また、宇宙の暗黒時代が如何に終わったかを調べるので、地上の光学望遠鏡による最初の系統的研究として、今後も継続して研究を進めていきたい。

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 90 件)

1. Tanaka I., Taniguchi, Y., Ichikawa, T., et al. 2010, ApJ, Submitted “Discovery of an Excess of $\text{H}\alpha$ Emitters around $4C+23.56$ ”, 査読あり
2. McCracken, H. J., Taniguchi, Y., et al. 2010, ApJ, 708, 202 “The COSMOS WIRcam Near Infrared Imaging Survey I. BzK selected Passive and Star-Forming Galaxies”, 査読あり
3. Matsuda, Y., Taniguchi, Y., et al. 2009, MNRAS, 400, 66 “Ly α Blobs like Company; the Discovery of a Candidate of 100 kpc Ly α Blob Near TO a Radio Galaxy with a Giant Ly α Halo B3 J2330+3927 at $z=3.1$ ”, 査読あり
4. Taniguchi, Y., Murayama, T., et al. 2009, ApJ, 701, 915 “Hubble Space Telescope/Advanced Camera for Surveys Morphology of Ly α Emitters at Redshift 5.7 in the COSMOS Field”, 査読あり

[学会発表] (計 31 件：国際研究会 9 件を含む)

1. 塩谷康広、谷口義明、他、日本天文学会 2010 年春季年会「最果ての銀河は本当に最果ての銀河か」2010 年 3 月 25 日
2. 済川健太郎、谷口義明、他、日本天文学

会 2009 年秋季年会「GOODS-S 天域における赤方偏移 2.9 から 4.3 のライマン α ブロッブの探査と性質」2009 年 9 月 15 日

3. 斎藤智樹、谷口義明、他、日本天文学会 2008 年秋季年会「広視野・多波長データから探る赤方偏移 3 のライマン α ブロッブ」2008 年 9 月 12 日

[図書] (計 4 件)

1. 塩谷泰広、谷口義明、プレアデス出版「銀河進化論」2009、409 ページ
2. 谷口義明、NTT 出版、「モンスター銀河狩り」2009、213 ページ
3. 谷口義明、岡村定矩、祖父江義明 (共編)、日本評論社、シリーズ現代の天文学 第 4 巻「銀河 I」2007、331 ページ
4. 谷口義明、ソフトバンク クリエイティブ、サイエンスアイ新書「暗黒宇宙で銀河が生まれる」2007、179 ページ

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

(1) 記者会見 (2 件)

1. 「すばる望遠鏡、銀河合体の謎を解く」2009 年 6 月、アメリカ天文学会
2. 「125 億光年彼方の生まれたての小さな銀河—すばるで見つけ、ハッブルで極める」2008 年 3 月、日本天文学会 2008 年春季年会

(2) 公開講演会 (15 件)

1. サイエンスカフェ ガリレオ・ガリレイ「暗黒宇宙の謎」、名古屋市、2010 年 2 月
2. 愛媛銀行・ひめ銀会「暗黒宇宙の謎」、松山市、2009 年 11 月
3. やまぐち総合教育支援センター「素粒子論的宇宙論」、山口市、2009 年 11 月

4. 松山市生涯教育センター「宇宙の行方」, 松山市, 2009年10月
5. 日本生産管理学会第30回全国大会「宇宙の誕生」, 愛媛大学, 松山市, 2009年9月
6. 愛媛県生涯学習センター「宇宙の行方」, 松山市, 2009年8月
7. 平成20年度愛媛県高等学校研究大会理科部会「暗黒宇宙の謎に挑む」, 松山北高等学校, 松山市, 2008年12月
8. 平成20年度都道府県指定都市教育センター所長協議会「暗黒に操られる宇宙」, にぎたつ会館, 松山市, 2008年10月
9. 愛媛県生涯学習センター「暗黒の宇宙に挑む」, 松山市, 2008年9月
10. 機器分析技術研究会『暗黒の宇宙に挑む』, 松山市, 2008年9月
11. 工学院大学朝日カレッジ「暗黒宇宙の謎」2008年9月
12. 大洲ロータリークラブ「暗黒宇宙の謎」, 大洲市, 2008年5月
13. 済美高等学校「暗黒宇宙の謎に挑む」, 松山市, 2008年2月
14. 岡山天文博物館第5回宇宙☆自然講座「暗黒宇宙の謎」, 浅口市, 2008年2月
15. 市民講座物理を楽しむ「暗黒宇宙の謎」, 愛媛大学, 松山市, 2007年11月

(3)テレビ出演 (1件)

放送大学「進化する宇宙」2005年～2008年
さらに4年間延長

6. 研究組織

(1)研究代表者

谷口 義明 (TANIGUCHI YOSHIAKI)
愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授
研究者番号: 40192637

(2)研究分担者

該当無し

(3)連携研究者

市川 隆 (TAKASHI ICHIKAWA)
東北大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 80212992