

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25287050

研究課題名（和文）広域銀河サーベイ観測と数値宇宙論の融合による宇宙進化の解明

研究課題名（英文）Deciphering the evolution of the Universe with wide-field survey and numerical cosmology

研究代表者

吉田 直紀（YOSHIDA, Naoki）

東京大学・理学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：90377961

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,700,000円

研究成果の概要（和文）：すばる望遠鏡を用いた広域銀河サーベイFMOSおよびHSCのデータを活用し、宇宙の大規模構造形成やダークマターの働きなどに関して多くの研究を行なった。研究期間前半には理論的研究をすすめ、重力レンズ現象の観測によりダークマターの素粒子的性質に制限を与える方法や、電波望遠鏡により遠方銀河の探索を行う方法などを提案した。研究期間中盤には大規模シミュレーションを数多く行い、模擬観測カタログを作成した。研究期間後半には、これらの手法を実際の観測データに適用し、ダークマター対消滅断面積に新たな制限をあたえ、修正重力理論モデルに制限を与えた。さらに、酸素輝線を発する最遠方の銀河を発見した。

研究成果の概要（英文）：We utilized data from Subaru FMOS and HSC surveys to study the structure formation in the Universe, and the nature of dark matter. In the beginning, we explored novel methods to probe the particle nature of dark matter and to detect distant galaxies. We then performed a number of cosmological simulations to generate mock galaxy catalogues. Toward the end of this research project, we analysed data from Subaru, combined with data from Fermi gamma-ray observatory and ALMA radio telescope, to place constraints on the annihilation cross-section of dark matter, to place constraints on the growth rate of large-scale structure, and to detect the most distant oxygen line emitter.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙物理学 星形成 銀河形成 ダークマター ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

すばる望遠鏡を用いる大規模銀河サーベイ FMOS が進行しており、また同じく HSC サーベイが計画され、これらの観測データを活用し、宇宙の構造形成の歴史やダークマターの性質について明らかにすることが重要課題であった。また光赤外望遠鏡や電波望遠鏡を用いて赤方偏移 4 を超える遠方銀河や遠方超新星を数多く探索できる可能性が指摘され、早期宇宙で誕生した天体の明るさや空間分布を理論的に明らかにする必要があった。

一方で、大規模数値シミュレーションを用いた理論的研究では、現実的な宇宙論的設定に基づいた天体形成のシミュレーションが可能となり、また多数の重力 N 体シミュレーションを用いて宇宙の大規模構造の統計解析に必要な統計量を正確に求めることが可能となっていた。

2. 研究の目的

すばる FMOS および HSC サーベイの観測データを用い、大規模数値シミュレーションの結果と組み合わせ解析し、主に以下の 3 つの研究をすすめる：

- (1) 重力レンズ観測を用いたダークマターとダークエネルギーの性質の研究
- (2) 遠方超新星探索による初期宇宙での星形成の研究
- (3) 可視光・近赤外を用いた広域銀河サーベイによる重力理論の検証。

3. 研究の方法

はじめに、ダークマターモデルや修正重力理論などを理論的に検討し、観測データ解析によりどのような事をどれほどの精度で測定あるいは制限できるかを検討する。次に、宇宙の構造形成の大規模シミュレーションを多数行い、銀河分布や重力レンズ観測の統計解析に必要な統計量（例えば共分散行列など）を正確にもとめる。この際には、摂動論やハローモデルに基づいた解析的手法も開拓し、シミュレーション結果と比較した上で、モデルを改善する。銀河分布、重力レンズいずれについても現実のサーベイ観測を想定した現実的な模擬観測カタログを作成し、解析の統計精度を高める。

次に、初期宇宙での星、銀河、ブラックホールの形成シミュレーションを行い、初代星の典型的質量や、早期銀河の特徴などを理論的に求める。遠方超新星探索、銀河考古学など複数のアプローチを検討し、遠方宇宙での天体形成について間接・直接に探索できる事柄を発見していく。

最後に、すばる望遠鏡や ALMA 電波望遠鏡の実データを解析し、ダークマターやダークエネルギーの性質に関して制限を加える。

4. 研究成果

研究当初に掲げた 3 つの目標について、それぞれ重要な成果を報告する。

(1) 重力レンズ観測を用いたダークマターの研究

宇宙のダークマター候補として、弱い相互作用をする微視的な粒子 WIMP が現在有力であると考えられている。WIMP がダークマターの主成分となるには、その対消滅断面積がある一定の値になると予想されているため、様々な WIMP について対消滅断面積に制限を与えれば、モデル選定につながる。我々は、WIMP 対消滅のシグナルとしてガンマ線に着目し、ダークマター密度の高い領域からのガンマ線放射検出可能性を検討した。特に、重力レンズ現象の観測から得られる物質分布と、宇宙背景ガンマ線との空間相互相関関数を測定することで、図 1 に示す結果を得た。

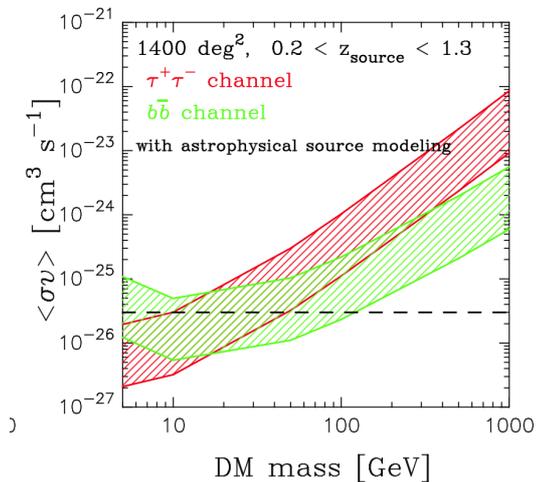


図 1 重力レンズによるダークマター分布マップと Fermi 衛星による背景ガンマ線放射マップとの相互相関解析により得られた、ダークマター粒子対消滅断面積に対する制限。ハッチ領域より上の領域はモデルとして排除されている。ハッチ領域はダークハローの内部構造などに起因する結果の不定性をあらず（論文 3 の成果）。

この解析には、CFHT 銀河サーベイのデータと Fermi 衛星による背景ガンマ線観測データを用いた。統計解析のため、N 体シミュレーションの結果を用いて模擬重力レンズマップを作成した。最終的に得られた対消滅断面積に対する制限は、近傍衛星銀河の解析から得られた制限よりも弱い。今後すばる HSC により、1000 平方度以上のより広い領域の観測データを用いることで、高い統計精度の制限を得ることができる。

(2) 遠方超新星探索による初期宇宙での星形成の研究

多数の宇宙論的流体シミュレーションを行い、初代星および低金属量星の形成過程と質量分布を理論的に求めた（論文 6,7）。初代星に関しては、その質量分布が太陽の 10 倍から 1000 倍にもわたる広がりをもつもので

あり(図 2)、その進化の最終段階には様々な超新星を引きおこす可能性がある」と結論した。

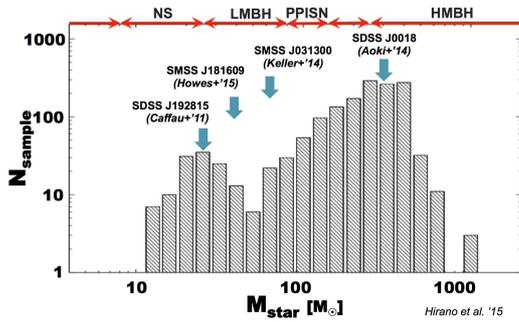


図 2 宇宙論的数値シミュレーションにより得られた、初代星質量分布。1540 例のヒストグラムとともに、最近の低金属量星の観測から推定された初代星の質量を矢印で表す(論文 7 の成果)。

また、宇宙論的銀河形成シミュレーションを遂行して、銀河の星質量関数が観測データを再現するようあらたな理論モデルを提案した(論文 4)。これらの結果や、観測的に推定された星形成率に整合する解析モデルを構築し、遠方宇宙での超新星爆発発生率を求め、将来のサーベイ観測で探索する方法を具体的に提案した(論文 9)。特に、近赤外線帯でのサーベイ観測を行うことで、赤方偏移 6 以上の超新星を数多く検出できることを示した。

(3) 可視光・近赤外を用いた広域銀河サーベイによる重力理論の検証

すばる FMOS 近赤外分光サーベイにより得られた 2783 個の星形成銀河に対し、赤方偏移空間での 2 点相関関数を測定し、2 次元(視線方向およびそれに垂直な方向)で多重極展開することにより赤方偏移歪みの効果を測定した。この効果の大きさにより、平均赤方偏移 1.4 での宇宙の構造形成成長率(f_{σ})を導くことができる。結果として $f_{\sigma} = 0.482 \pm 0.116$ を得た。

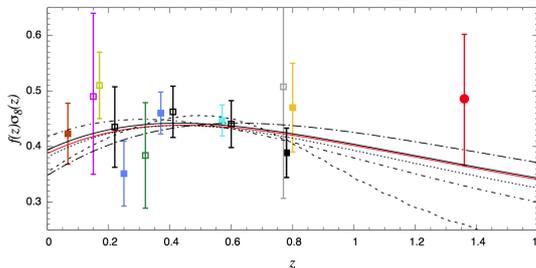


図 3 すばる FMOS サーベイにより得られた、赤方偏移 1.4 での構造成長率(赤丸点)。他の誤差棒付きデータ点は、これまでの観測により得られた低赤方偏移での測定。実線や破線は、標準的な CDM を含む、各種重力理論の理論予言(論文 2 の成果)。

これにより、一部のガリレオンモデルなど、修正重力理論の多くに強い制限を与えることができた(図 3)。統計解析の共分散行列計算のために、本研究では 10 億個の粒子を用いた宇宙論的構造形成シミュレーションを 40 個遂行した。また銀河分布モデル HOD を適用し、現実的な模擬観測カタログを作成した。

この研究のために開発した手法は、2019 年度以降に計画している、すばる PFS サーベイのデータ解析に有用である。また、その準備ともなる理論研究として、輝線銀河(星形成銀河)の空間分布を詳細に調べるため、大規模な宇宙論的銀河シミュレーションを遂行し、各種輝線強度を計算した(論文 4,5,10)。

以上のように、当初の目的に掲げたテーマから得られた成果以外にも、遠方銀河探索により大きな成果が得られた。再電離期の銀河は金属量が少なく、星形成が活発で、電離酸素による輝線が強く出ると理論的に予想された(論文 10)。この予想をもとに、2015 年には ALMA 望遠鏡で赤方偏移 7.2 の銀河を当該バンドで観測し、実際に酸素輝線を 5.3 シグマで検出した。これは観測された中でもっとも遠い酸素輝線銀河である(論文 1)。

今後もこのように、理論計算やシミュレーション結果を実際の観測による発見に結びつけるよう、遠方天体の性質を定量的に明らかにしていく。特に宇宙望遠鏡 JWST の観測をみすえた理論研究は大きく展開する(論文 10)。

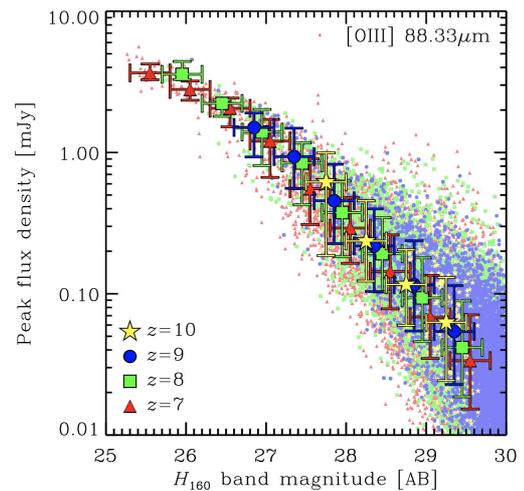


図 4 宇宙論的流体シミュレーションから得られた、遠方銀河の酸素輝線フラックス。1mJy 以上のものは、ALMA 望遠鏡を用いた 1 時間ほどの観測で検出できると予想された(論文 10 の成果)。

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 21 件)

井上昭雄, 他 6 名, 吉田直紀, 他 9 名,
“Detection of an oxygen emission line
from a high redshift galaxy in the
reionization epoch”, *Science*, 査読有,
352 巻, 2016 年, 6293,
DOI: 10.1126/science.aaf0714

奥村哲平, 他 23 名, 吉田直紀,
“The Subaru FMOS galaxy redshift
survey (FastSound). IV. New constraint
on gravity theory from redshift space
distortions at $z \sim 1.4$ ”, *Publications of
the Astronomical Society of Japan*, 査
読有, 68 巻, 2016 年, 24-38, DOI:
10.1093/pasj/psw029

Masato Shirasaki, Shunsaku Horiuchi,
Naoki Yoshida, “Cross-Correlation of
the Extragalactic Gamma-ray
Background with Luminous Red
Galaxies”, *Physical Review D*, 査読有,
92 巻, 2015 年, 123540,

岡本崇, 清水一紘, 吉田直紀,
“Reproducing cosmic evolution of
galaxy population from $z=4$ to 0”,
*Publications of the Astronomical
Society of Japan*, 査読有, 66 巻, 2014 年,
id7015,
DOI: 10.1093/pasj/psu046

清水一紘, 井上昭雄, 岡本崇, 吉田直紀,
“Physical Properties of UDF12
Galaxies in Cosmological simulations”,
*Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society*, 査読有, 440 巻,
2014 年, 731-745,
DOI: 10.1093/mnras/stu265

千秋元, 他 6 名, 吉田直紀,
“Dust grain growth and the formation
of the extremely primitive star SDSS
J102915+172927”, *Monthly Notices of
the Royal Astronomical Society*, 査読有,
439 巻, 2014 年, 3121-3127,
DOI: 10.1093/mnras/stu178

平野信吾, 細川隆史, 吉田直紀, 他 4 名,
“One Hundred First Stars :
Protostellar Evolution and the Final
Masses”, *The Astrophysical Journal*,
査読有, 781 巻, 2014 年, id60,
DOI: 10.1088/0004-637X/781/2/60

正木彰伍, Yen-Ting Lin, 吉田直紀,
“Modeling color-dependent galaxy
clustering in cosmological simulations”,
*Monthly Notices of the Royal
Astronomical Society*, 査読有, 436 巻,
2013 年, 2286-2300,
DOI: 10.1093/mnras/stt1729

田中雅臣, 守屋堯, 吉田直紀,
“Detectability of High-Redshift
Superluminous Supernovae with
Upcoming Optical and Near-Infrared
Surveys - II. Beyond $z=6$ ”, *Monthly
Notices of the Royal Astronomical
Society*, 査読有, 435 巻, 2013 年,
2483-2493,
DOI: 10.1093/mnras/stt1469

井上昭雄, 他 4 名, 吉田直紀,
“ALMA will determine the
spectroscopic redshift $z > 8$ with FIR [O
III] emission lines”, *Astrophysical
Journal Letters*, 査読有, 780 巻, 2013
年, id18,
DOI: 10.1088/2041-8205/780/2/L18

[学会発表](計 17 件)

Naoki Yoshida, “Formation of
primordial stars”, *Metals and dust as
fuels of star formation*, 2016 年 6 月 28
日, UCSB(米国 サンタバーバラ)

Naoki Yoshida, “Simulations of the
formation of large-scale structure”,
Dark Side of the Universe 2015, 2015
年 12 月 15 日, 京都大学(京都府京都市)

Naoki Yoshida, “Formation of the First
Stars in the Universe”, *Quarks to
Universe in Computational Science
(QUCS 2015)*, 2015 年 11 月 8 日, 奈良県
新公会堂(奈良県奈良市)

Naoki Yoshida, “From first stars to
massive Blackholes”, *First stars,
galaxies, and black holes: Now and
Then*, 2015 年 6 月 18 日, SRON(オランダ
フロニンゲン)

Naoki Yoshida, “Formation of Early
Stars and Blackholes”, *Olympian
Symposium*, 2015 年 5 月 20 日, パラリア
ギリシャ

Naoki Yoshida, “Formation of Primordial Stars”, South by High-Redshift Conference, 2015 年 4 月 1 日, UT Austin (米国 オースティン)

Naoki Yoshida, “Structure Formation in the Early Universe”, Unsolved Problems in Astrophysics, 2014 年 7 月 3 日, エトベシュ大学 (ハンガリー ブダペスト)

Naoki Yoshida, “Formation of Primordial Stars”, Physics of first star and galaxy formation, 2014 年 6 月 10 日, エジンバラ大学 英国 エジンバラ

Naoki Yoshida, “Low-mass stars, massive blackholes, and luminous supernovae in the early univers”, Cambridge IoA Conference "Mind the Gap", 2013 年 7 月 8 日-12 日, ケンブリッジ大学 (英国 ケンブリッジ)

Naoki Yoshida, “Low-mass stars, massive blackholes, and luminous supernovae in the early univers”, Cosmic Dawn at Ringberg, 2013 年 6 月 16 日-21 日, リングベルグ (ドイツ リングベルグ)

〔図書〕(計 3 件)

内田樹 他 (吉田直紀), 左右社, 『高校生と考える日本の問題点 (桐光学園大学訪問授業)』, 2015 年, 336 頁 (321-334)

吉田直紀, 学研教育出版, 『ムラムラする宇宙』, 2014 年, 219 頁

日本評論社編集部編 (吉田直紀), 日本評論社, 『物理学ガイダンス』, 2014 年, 304 頁 (61-74)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://member.ipmu.jp/naoki.yoshida/cosmo.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 直紀 (YOSHIDA, Naoki)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 90377961

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

田中 雅臣 (TANAKA, Masaomi)
国立天文台・理論研究部・助教
研究者番号: 70586429

細川 隆史 (HOSOKAWA, Takashi)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 30413967

(4) 研究協力者