

## 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4日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340041

研究課題名（和文）

バリオン宇宙の理論的探究と次世代 X 線衛星

研究課題名（英文）

Observational pursuit of the baryonic universe and the next-generation X-ray mission

研究代表者

須藤 靖 (SUTO YASUSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90183053

研究成果の概要（和文）：

宇宙論的数値シミュレーションを用いて、宇宙のダークバリオンの有力な候補である WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium) の検出可能性を詳細に議論した。我々の解析結果は、日米蘭の宇宙ミッション ORIGIN の提案に重要な役割を果たしたが、残念ながら採択にはいたらなかった。しかし、これは JAXA の次期小型衛星ミッション公募プログラムに、DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) 衛星計画として再提案される予定である。

これに加えて、銀河団ガスの詳細なモデル化を行い、従来無視されていた銀河団ガス密度と温度の非一様性に関する統計モデルを構築し、それを実際の観測データによって検証した。さらにこのモデルが銀河団を用いたハッブル定数の測定に与える系統誤差を指摘した。最後に、広く用いられている静水圧平衡の仮定の正当性を数値シミュレーションデータを用いて検証し、その仮定の下で得られる質量が真の質量に比べて約 2 割程度のずれを示す事を見いだした。

研究成果の概要（英文）：

We have critically addressed the detectability of WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium), which is supposed to be the most plausible candidate for cosmic dark baryon. Our various analysis played an important role in the Japan-US-Holland joint proposal of a space mission ORIGIN, which unfortunately was not accepted. We plan, however, to submit the proposal DIOS for an up-coming Japanese small space mission program.

We also constructed a detailed model for the intracluster gas. In particular, we were successful in modeling the inhomogeneity of gas density and temperature of galaxy clusters statistically. Then we pointed out a systematic error in the estimate of the Hubble constant using clusters. Finally we also considered the validity of hydrostatic equilibrium, which has been conventionally assumed in analyzing the X-ray data of galaxy clusters. Our results based on a set of simulated clusters indicates that the assumption leads to approximately 20 percent discrepancy from the true mass of clusters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：宇宙論、X線天文学、ダークバリオン、流体シミュレーション、ハッブル定数

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代における宇宙論パラメータの決定においては、銀河団観測を通じてX線データは中心的役割を果たした。特にダークマターの存在量と密度ゆらぎの振幅に関する制限はこの銀河団統計によってもたらされたものである(Kitayama & Suto 1997, ApJ 490, 557)。その後、超新星と宇宙マイクロ波背景放射というより精密な宇宙論的データと組み合わせられることで、ダークマターとダークエネルギーの存在はほぼ確立したと見てよい。一方、宇宙のブライツサイドの主演であるはずのバリオンの大半もまた実は直接観測されていないことは、皮肉にもあまり認識されていない。銀河のなかの星、およびX線を放射する銀河団高温ガスがそれぞれ全バリオンの1割ずつを占めるものの、少なくとも半分以上のバリオンは直接観測されていない。つまり、宇宙のバリオンのほとんどは“ダークバリオン”なのである。

理論的にはダークバリオンの大半は10万度から1千万度の温度をもつ Warm/Hot Intergalactic Medium (WHIM) であろうと予想されている。この温度範囲のWHIMの場合、熱制動放射によるX線強度は弱く、直接検出はほとんど不可能である。例外として、背景にあるQSOのX線連続放射がWHIMを通過する際にOVI, OVIIの吸収線をつくることで検出しようという試みがなされて、数例検出が報告されている。本申請では、赤方偏移が $0 < z < 0.3$ に分布するWHIMからのOVII (561eV, 568eV, 574eV)ならびにOVIII (653eV)の輝線を観測することで宇宙のダークバリオンの空間分布をマッピングし、それから宇宙のバリオン進化史を推定する理論的枠組みの構築を目指す。

この目的のためわが国では軟X線精密分光観測ミッションDIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)という小型衛星計画が検討されてきた。平成16年度から19年度にわたり採択されている科学研究費補助金基盤研究B「軟X線領域での酸素輝線を用いた宇宙のダークバリオン探査」(研究代表者：須藤靖)はまさにその理論的な検討を目的としたものである。2007年にはヨーロッパ宇宙機構の2015-2025年の大規模ミッションの計画を選ぶ"Cosmic Vision"の公募に対して、日本が考案した4回反射望遠鏡を用いた広視野高エネルギー分解能のX線サーベイによる輝線マッピングと、GRBを光源とした宇宙論的距離での吸収線観測を組み合わせ

た日蘭伊共同ダークバリオン探査衛星"EDGE"提案した(den Herder et al. 2007)。残念ながら結果は不採択に終わったもののダークバリオン探査専用衛星の実現を目指す国際的な動きは引き続き活発である。

一方、銀河団統計に関しては、銀河団ガスの複雑な物理の理解が限界となって、超新星、重力レンズ、バリオン振動という最近提案された方法論に比べると、宇宙論パラメータに対して与える制限が弱いものと考えられている。我々は最近銀河団ガスの温度構造とゆらぎに対する新しい解析モデルとして対数正規分布モデルを構築し、銀河団統計の系統誤差を補正する可能性を提案した(Kawahara et al. 2007, 2008)。X線および電波のスニャーエフ・ゼルドビッチ効果を用いた銀河団サーベイが現在数多く進行しつつある現状を考慮すると、それらと組み合わせることで銀河団統計がより精密な宇宙論パラメータ決定法となる可能性が現実的なものとなりつつある。

## 2. 研究の目的

ダークマターとダークエネルギーが宇宙の95パーセント以上を占める主要構成要素であるにせよ、宇宙の観測はバリオンを通して行われることには変わりはない。現在知られている宇宙のバリオンの大半は高温ガスとして存在するため、X線観測が主役となる。特に、X線観測に基づく銀河団統計は、歴史的には宇宙論パラメータの推定において先駆的な役割を果たした。また、近年話題となっているダークバリオンは10万度から1千万度の温度をもつ Warm/Hot Intergalactic Medium (WHIM) ではないかと予想されており、その観測的同一性と空間分布のマッピングは、宇宙の熱史及び銀河系内での重元素分布と循環機構の理解を飛躍的に向上させる。本申請は、この宇宙のバリオン進化の理論的究明を目的とし、特にi) 銀河団ガスのより現実的なモデル構築を通じて、超新星、重力レンズ、バリオン振動というより最近の方法論に比肩する、独立かつ精密な宇宙論パラメータ決定法を構築する、ii) WHIMの酸素輝線および吸収線の観測を通じて、(現時点でのダーク)バリオンを直接検出する新しい窓を開拓する、を2つの主要なテーマとする。

## 3. 研究の方法

宇宙論的数値シミュレーションを用いて、WHIMの検出可能性を定量的に論ずるとともに、銀河団の性質を詳細に再検討し、等温

球対称静水圧平衡を仮定した従来の近似モデルをより精密化する。

#### 4. 研究成果

(1) WHIM 検出の妨げになる様々なノイズ (銀河による前景放射、光子数が少ないことによる誤検出、酸素以外の輝線の混入) から WHIM 由来の信号を取り出すことができるのかどうかを、宇宙流体シミュレーションを用いることで検証した。また、これまで吸収線による WHIM 観測はマイクロカロリメータ程度のエネルギー分解能を仮定していたが、次世代衛星に搭載予定のさらにエネルギー分解能の良い回折格子による観測によって、速度分散等の WHIM 内部の物理量を測定すること、または制限をつけられることを示した。これらの結果は、WHIM 観測を目的とした次世代 X 線衛星の最適な設計に示唆を与えることができるものである。

(2) 我々が理論的に提唱してきた銀河団ガスの温度構造と揺らぎに対する解析モデルである対数正規分布について、光子数の比較的少ないデータに対して、ポアソンノイズの影響を考慮することのできる方法を開発した。これにより複数の銀河団で対数正規モデルの検証とモデルパラメータを求めるための解析が可能になった。その結果、複数の銀河団で、対数正規分布モデルが現実にもよい近似として実現していることを発見した。これは対数正規モデルの普遍性を示しているという点で重要な結果である。

(3) 銀河団ガスの温度構造と揺らぎの対数正規分布がどのような影響を与えるかを考察した。具体的にはチャンドラ衛星による 30 個程度の銀河団データを再解析し、それによって得られるハッブル定数を推定した。チャンドラ衛星に対しては、キャリブレーションデータのモデルが数度修正され、これが標準解析ツールとしてホームページで公開されている。我々はこのキャリブレーションモデルの違いが、ハッブル定数に 2 割程度の違いを生むことを発見した。銀河団を用いた精密宇宙論の展開においては、このような基礎データが大きな系統誤差をうむことを具体的に示したことになる。

(4) 銀河団ガスの静水圧平衡という標準的な仮定の正当性を数値シミュレーションを用いて検証した。この解析のために、基礎方程式である流体のオイラー方程式に立ち返り、各項を個別に評価する方法論を確立した。その方法に基づいてシミュレーション銀河

団を解析した結果、過去の研究で主張されてきた銀河団全体の回転や乱流といった効果ではなく、重力的な加速度項の存在により、静水圧平衡の仮定から導かれる質量と真の質量は 2 割程度ずれることを見いだした。

#### 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 8 件:すべて査読あり)

1) Daichi Suto, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto, and Renyue Cen, “Validity of Hydrostatic Equilibrium in Galaxy Clusters from Cosmological Hydrodynamical Simulations” *The Astrophysical Journal* 767(2013)79

2) Der Herder et al. “ORIGIN: Metal Creation and Evolution from the Cosmic Dawn” *Experimental Astronomy* 34(2011)519--549

3) Yasushi Suto “Unknowns and unknown unknowns: from dark sky to dark matter and dark energy”, *SPIE* 7733(2010) 773302--773302-11

4) T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, S. Sasaki, H. Kawahara, K. Mitsuda, N. Yamasaki, Y. Takei, M. Ishida, Y. Tawara, I. Sakurai, A. Furuzawa, Y. Suto, K. Yoshikawa, N. Kawai, R. Fujimoto, T.G. Tsuru, K. Matsushita, and T. Kitayama, “DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects”, *SPIE* 7732(2010) 77321S--77321S-9;

5) Erik Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Naomi Ota, Shin Sasaki, and Yasushi Suto, “Impact of Chandra calibration uncertainties on galaxy cluster temperatures: application to the Hubble constant”, *The Astrophysical Journal* 721(2010)653--669

6) N. Ota, K. Murase, T. Kitayama, E. Komatsu, M. Hattori, H. Matsuo, T. Oshima, Y. Suto, and K. Yoshikawa, “Suzaku broad-band spectroscopy of RX J1347.5-1145: constraints on the extremely hot gas and non-thermal

emission”, *Astronomy & Astrophysics* 491(2008)363--377

7) Hajime Kawahara, Erik Reese, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto “Extracting Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity from X-ray Surface Brightness: A Statistical Approach and Application to Abell 3667” *The Astrophysical Journal* 2008(687)936--950

8) Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, and Yasushi Suto “Systematic Errors in the Hubble Constant Measurement from the Sunyaev-Zel’dovich effect”, *The Astrophysical Journal* 674(2008)11-21

[学会発表] (計 6 件)

1) 河原創、北山哲、佐々木伸、須藤靖: SZ 効果から導かれるハッブル定数の系統誤差の発見:Chandra の再解析、日本天文学会 2010 年 3 月 24 日 広島大学 春季年会

2) Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto: Revisiting the Hubble Constant Measurement from the Sunyaev-Zel’dovich Effect, Princeton University-DENET joint Workshop on Science Opportunities with Wide-Field Imaging and Spectroscopy of the Distant Universe (2009 Nov.19; Princeton University, USA)

3) Yasushi Suto: Inhomogeneities in galaxy clusters, Kavli Institute at Peking University conference on Large-scale structure and galaxy formation with LAMOST (2009 April 16; Peking University, China)

4) Erik Reese, Hajime Kawahara, Tetsu Kitayama, Shin Sasaki, Yasushi Suto: A Statistical Approach to Galaxy Cluster Gas Inhomogeneity: Chandra Observations of Nearby Galaxy Clusters, American Astronomical Society Meeting (2009 Jan.12; Long Beach, USA)

5) 河原創、北山哲、佐々木伸、須藤靖: X 線輝度分布を用いた銀河団ガス内不均一性の探索、日本天文学会 2008 年 9 月 12 日 岡山理科大学 秋季年会

6) Yasushi Suto: Log-normal fluctuations in the intracluster medium and their impact on X-ray and SZ cluster observations, The 3rd KIAS workshop on

Cosmology and structure formation (2008 Oct.27; Korea Institute of Advanced Study, Korea)

[図書] (計 6 件)

1) 須藤 靖 『主役はダーク』 (毎日新聞社、2013 年、296 ページ)

2) 須藤靖、田中深一郎、荒深遊、杉村美佳、東悠平 訳 『宇宙生物学入門 惑星・生命・文明の起源』 (丸善出版、2012 年、343 ページ)、Peter Ulmschneider 著、*Intelligent Life in the Universe* (Springer 2006, 2nd edition)

3) 須藤 靖 『三日月とクロワッサン』 (毎日新聞社、2012 年、224 ページ)

4) 須藤靖 『もうひとつの一般相対論』 (日本評論社、2010 年、185 ページ)

5) 須藤 靖 『人生一般二相対論』 (東京大学出版会、2010 年、206 ページ)

6) 須藤 靖 『解析力学・量子論』 (東京大学出版会、2008 年、274 ページ)

[その他]

ホームページ等

<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mytalks.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

須藤 靖 (SUTO YASUSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：90183053

### (2) 研究分担者

佐々木 伸 (SASAKI SHIN)

首都大学東京・理工学研究科・助教

研究者番号：80262260

(H20→H21: 連携研究者)

北山 哲 (KITAYAMA TETSU)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：00339201

(H20→H21: 連携研究者)

吉川耕司 (YOSHIKAWA KOHJI)

筑波大学・数理工学系研究科・講師

研究者番号：70451672

(H20→H21: 連携研究者)

山崎典子 (YAMASAKI NORIKO)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授  
研究者番号：20254146  
(H20→H21：連携研究者)