

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 4 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(S)

研究期間：2008～2012

課題番号：20674003

研究課題名（和文） 大規模数値計算による初期宇宙構造の形成、進化、および大域的分布の理論的研究

研究課題名（英文） Simulations of the Formation, Evolution, and Clustering of Early Cosmic Structure

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

研究成果の概要（和文）：大規模コンピュータシミュレーションを用いて、宇宙最初の天体形成を理論的に明らかにした。初代星が太陽の数十倍以上に成長し、その後ブラックホールを生成する過程の詳細を計算した。さらに早期宇宙で星からの光により銀河間ガスが暖められる様子や、重金属やダストを含む原始銀河がどのように分布しているかを計算し、将来の電波および赤外線観測に対して理論予測を与えた。

研究成果の概要（英文）： We have performed large-scale computer simulations of the formation of the first stars in the universe. Our simulations provide a complete picture of how a star is formed out of tiny density fluctuations left over from the Big Bang. The characteristic mass of the first stars is determined, through large-scale simulations on a first principle basis, to be several tens times that of the sun. We provide detailed forecast for observations of the signature of the first stars in radio to infrared wavelengths.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	22,100,000	6,630,000	28,730,000
2009年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2010年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2011年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2012年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
総計	49,300,000	14,790,000	64,090,000

研究分野：星形成 大規模数値シミュレーション

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：

1. 研究開始当初の背景

最近の大型望遠鏡による深宇宙の観測によって、宇宙創成 6 億年の頃の天体が発見されています。現代天文学のフロンティアはこれよりも遠くの宇宙、つまりビッグバンから数億年という「暗黒の時代」に広がりつつあります。宇宙早期に形成される天体は、その後の宇宙の進化に大きく影響を及ぼすため、その形成過程や、そもそもどのような天体が形成されるのかについては大きな謎が残っていました。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2000 年以降に確立された「標準宇宙モデル」と呼ばれる理論に基づいた現実的設定の大規模数値シミュレーションを行い、宇宙早期の進化と、「暗黒の時代」に生まれる天体の形成過程や諸性質を明らかにすることです。大規模数値シミュレーションの結果から、2010-2020 年に稼働する次世代の宇宙望遠鏡や大型地上望遠鏡、さらには電波望遠鏡群を用いる具体的な観測提案を行うことを最終目標としました。

3. 研究の方法

宇宙早期に薄く広がるガスから星が誕生するまでの過程に関わる物理学として、重力、流体力学、化学反応、輻射輸送を取り入れ、ガスの進化を第一原理的に追う手法を採用します。最近の宇宙観測で定まった標準宇宙モデルを設定し、初期密度ゆらぎを正確に再現します。膨張する初期宇宙の中で物質分布が進化する過程を計算するため、重力N体計算を遂行します。研究経費で24ノードのPCクラスターを構築し、専用計算機として初期条件生成からシミュレーション遂行、結果の可視化と解析まで行います。

1辺10万光年程度の大領域を設定した宇宙論的シミュレーションの結果を直接用いて原始星進化の計算に入力として与え、個々の天体(星)の典型的質量を求めます。次に、輻射輸送と化学反応を組み合わせた流体シミュレーションを行い、それらの天体が輻射加熱や重元素汚染によって周辺の銀河間ガスにおよぼす影響を明らかにします。最後に、数値計算結果を用いて電波や赤外線での詳細な模擬観測マップを作り、直接比較できる観測量を提示します。特に、銀河間物質の再電離の早期段階に個々の電離領域残骸が発する中性水素21cm、重元素とダストを含む原始銀河が発するサブミリ波、初期宇宙での高エネルギーの超新星爆発が発する紫外線を有力な観測対象と考え、詳細な計算を行います。

4. 研究成果

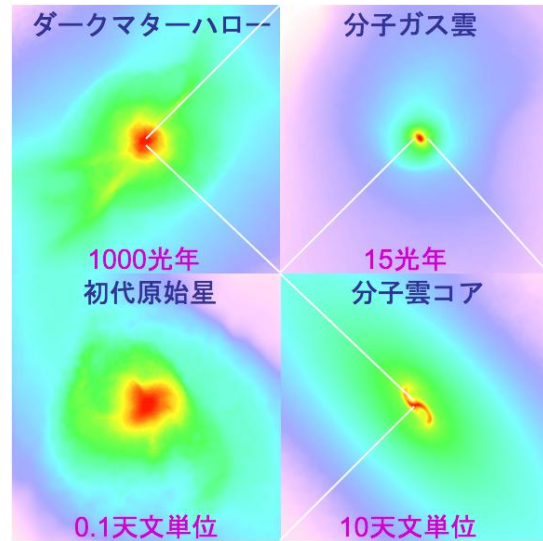
(1) 初代星形成シミュレーション

大規模シミュレーションを遂行して宇宙最初の星が生まれる様子を明らかにし、さらに原始星から主系列にいたるまでの進化を追うなかで、初代星成長の自己抑制機構を明らかにしました。この成果を2編の論文としてScience誌に発表しました(2008, 2011)。

原始星が誕生するまでの計算では、ガス密度が20桁にわたって進化し、最終的に星内部程度(およそ 10^{21} 個原子核/cc)に至る過程を連続的に追いました。その途中に起こる平衡・非平衡化学反応や輻射輸送を厳密に取り入れた計算を世界で初めて遂行しました(図1)。宇宙年齢3億年という早期に確かに星が生まれるということを結論づけ、宇宙再電離や低金属量星の元素含有量の観測との関連性を考察しました。

これらの結果をもとに、2009年にはNature誌に初代星形成の理論に関する総括記事を発表し、2011年にはAnnual Review誌に原始銀河に関する総括記事を発表するなど、当該分野での標準的な理論モデルを確立するに至りました。

図1 大規模数値シミュレーションから絵荒れた、宇宙初期ダークマター塊の中で誕生する原始星周辺の密度・圧力分布

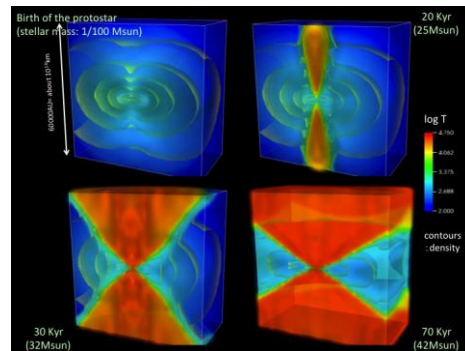


(2) 初代星の典型質量と進化の最終段階

上述の宇宙論的シミュレーションから得られた原始星周辺のガス密度、温度、速度の情報を直接用いて、原始星進化の輻射流体計算を行いました。この計算では、原始星が発する紫外光が周辺ガスを電離加熱する過程を取り入れ、いわゆるフィードバック機構の強さを明らかにしました。標準的な場合には、この電離フィードバックにより、原始星質量が太陽の数十倍になった頃に質量降着すなわち原始星成長が終わり、主系列星となる段階での質量(ZAMS質量)を決定することができました(図2)。

従来は初代星の典型的質量は太陽の数百倍程度と考えられており、銀河系に見つかった最古の星の金属含有量の観測との不整合が指摘されていました。今回の、自己抑制機構を取り入れた数値シミュレーションの結果はこの不整合を解消することになりました。

図2 原始星からの紫外線により周辺ガスが加熱され(赤部分)、噴出流を生ずる過程の輻射流体計算

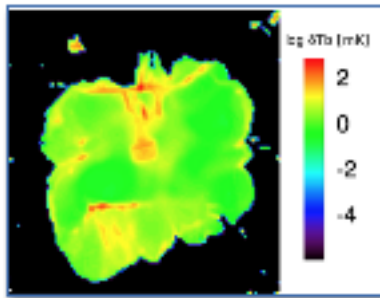


(3) 観測可能性

宇宙早期の観測可能性として、電波観測に着目しました。大質量の初代星まわりの電離領域が放出する中性水素 21 cm の強度を計算しました。個々の領域は物理的に小さく、将来の電波望遠鏡でも解像できないものの、電波強度自体はアンテナ温度にして数十ミリケルビンと十分大きく(図 3)、電離領域が多数存在する早期にはその 21cm 輝線の大域的揺らぎを電波望遠鏡群 Square Kilometer Array (SKA) で検出可能と結論しました。

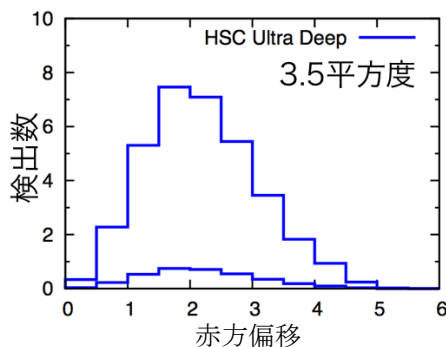
遠方宇宙からの水素 21 cm を観測する計画は SKA をはじめとしていくつか提案されており、初期宇宙での 21cm 源を特定し、その強度を計算することは非常に重要です。私たちの研究は初代星周りの電離領域からのシグナルを 3次元計算により初めて直接計算しました。

図 3 早期電離領域から発せられる波長 21cm の電波の輝度温度。単位はミリケルビン、



次に、遠方超新星の検出可能性を検討し、2014年から開始されるすばる HSC サーベイでの探索方法を提案しました。紫外線で特に明るくなる IIn 型超新星に着目し、3ヶ月から1年以上の変光天体探索により、計画されている 3.5 平方度の領域で数個以上の超新星が赤方偏移 3 以上に見つかりと結論しました(図 4)。実際に検出されれば、最遠方超新星のこれまでの記録を更新する可能性が高いと考えられます。

図 4 すばる望遠鏡 HSC サーベイ (2014 年開始) で期待される遠方超新星検出数



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 27 件)

(主要論文 7 件 [総括記事 2 編含む])

1. “Sub-mm Galaxies in Cosmological Hydrodynamics Simulations”, 清水一紘, 吉田直紀, 岡本崇, MNRAS, 427 (2012) 2866
DOI 10.1111/j.1365-2966.2012.22107.x

2. “Detectability of High-Redshift Super Luminous Supernovae with Upcoming Optical and Infrared Surveys”, 田中雅臣、守谷堯、吉田直紀、野本憲一, MNRAS, 422 (2012) 2675,
DOI 10.1111/j.1365-2966.2012.20833.x

3. “Proto-stellar feedback halts the growth of the First Stars in the Universe”, 細川隆史, 大向一行, 吉田直紀、H. W. Yorke, Science, 334 (2011) 1250
DOI 10.1126/science.1207433

4. “The First Galaxies”, V. Bromm, 吉田直紀, Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, 49 (2011) 373
DOI 10.1146/annurev-astro-081710-102608

5. “The Formation of the First Stars and Galaxies”, V. Bromm, 吉田直紀、L. Hernquist, C.F. McKee, Nature, 459 (2009) 49
DOI 10.1038/nature07990

6. “The 21cm Signature of Early Relic HII Regions”, 徳谷碧、吉田直紀、S.-P. Oh, 杉山直、MNRAS, 395 (2009) 777
DOI 10.1111/j.1365-2966.2009.14604.x

7. “Protostar Formation in the Early Universe”, 吉田直紀、大向一行、L. Hernquist, Science, 321 (2008) 669
DOI 10.1126/science.1160259

[学会発表] (計 22 件)

(主要な国際学会招待講演 10 件)

1. 吉田直紀, “Physics of Primordial Star Formation”, 国際研究集会 The Physics of Star Formation, 2012/10/16, イタリア トリエステ

2. 吉田直紀, “Star Formation in the Early Universe”, 国際学会 第 39 回 COSPAR 総会, 2012/7/20, インド マイソール

3. 吉田直紀, “Physics of Primordial Star Formation”, 国際研究集会 First Stars IV, 2012/5/21, 京都

4. 吉田直紀, ”Wide-Field Cosmology Surveys”, 国際研究集会 DENET “The Accelerating Universe”, 2011/10/24, フランス パリ

5. 吉田直紀, “Hunting for the First Stars”, 国際研究集会 The First Galaxies, 2011/7/1, ドイツ リングベルグ

6. 吉田直紀, “Chemistry in the Early Universe”, 米国物理学会 DAMOP 基調講演, 2010/5/27, 米国 ヒューストン

7. 吉田直紀, ”Formation of the First Stars”, 国際研究集会 “21cm Cosmology”, 2010/2/10, 米国 アスペン

8. 吉田直紀, The First Stars and Blackholes”, 国際研究集会 “Intermediate Mass Blackholes”, 2009/4/1, 米国 アーバイン

9. 吉田直紀, ”The First Light”, 国際学会 “New Vision 400”, 2008/10/13, 中国 北京

10. 吉田直紀, ”Structure Formation in the Universe”, 国際学会 “Conference on Computational Physics”, 2008/8/2, ブラジル オウロプレット

[図書] (計3件)

1. 「宇宙137億年解説」 吉田直紀, 2009, 東京大学出版会
2. 「宇宙はどこまで分かったのか」, 2010, 岡村定矩 編、日本評論社
3. 「宇宙で最初の星はどうやって生まれたのか」 吉田直紀, 2011, 宝島社新書

[その他]

(1) 報道関連情報

NHK コズミックフロント「ファーストスター」2013年3月

BS フジ「ガリレオ X」暗黒物質の謎 2011年6月

NHK コズミックフロント「ダークマターの謎に挑む」2011年4月

NHK スペシャル「宇宙の始まりに挑む」2010年4月

NHK サイエンスゼロ「宇宙を満たす暗黒物質」2008年5月

ウォールストリートジャーナル紙”The Making of the First Stars” 2008年8月

New York Times 紙 “First Stars Were Brute” 2008年7月

(2) 授賞等

2009年4月 米国テキサス大学オースティン校ベアトリス・ティンスレー記念研究者

2008年8月 国際純粋応用物理連合 (IUPAP)若手科学者賞受賞

(3)アウトリーチ活動

ナガセ大学学部研究会 2012年8月, 2010年8月

全国同時七夕講演会 2012年7月、2009年7月

柏市松葉幼稚園での日食講演会 2012年5月、2009年7月

六本木ヒルズアカデミー 2010年2月

ホームページ等

<http://member.ipmu.jp/naoki.yoshida/cosmos.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

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：