

## 大規模数値計算による初期宇宙構造の形成、進化および その大域的分布の理論的研究

Simulations of the Formation, Evolution, and Clustering  
of Early Cosmic Structure

吉田 直紀 (YOSHIDA NAOKI)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任准教授



### 研究の概要

最近の天文観測から、宇宙創生から現在まで137億年におよぶ進化の歴史の多くが明らかになってきました。しかし、はじめの数億年という早期の宇宙がどのように進化し、初めにどのような天体が生まれたのかについては未解明の謎が多く残っています。私たちは宇宙進化のスーパーコンピュータシミュレーションを用いてこの謎に迫っています。

研究分野：観測的宇宙論・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：宇宙物理・理論天文学・深宇宙探査

### 1. 研究開始当初の背景

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す。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ここ10年ほどの間に確立された「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ています。

### 3. 研究の方法

標準宇宙モデルに基づいた現実的な初期宇宙を空間3次元で設定し、暗黒物質による重力、銀河間ガス中の化学反応や放射輸送の過程を厳密に取り入れた数値シミュレーションを行っています。個々の物理過程には第一原理的手法を採用し、精緻な計算を行います。

### 4. これまでの成果

はじめに、宇宙初期での星形成の研究を行いました。星間ガス中に起こる化学反応や放射輸送を取り入れた計算を行い、ビッグバンと同時に生成されたわずかな物質密度の揺らぎから、3億年が経過するまでに膨張する宇宙の中でどのように星が生まれたのかを明らかにしました(図1)。

私たちの行った大規模シミュレーションによれば、ビッグバンの後3億年ほど経ったころ、質量が太陽の100万倍ほどの暗黒物質の塊ができます。その中心では星のゆりかごとなる分子ガス雲が形成されます。元素レベルでは水素とヘリウムだけから成るこの分子ガス雲の質量は太陽の数百倍程度で、その中でも密度のもっとも高い部分が自らの重力により暴走的に収縮し始めます。

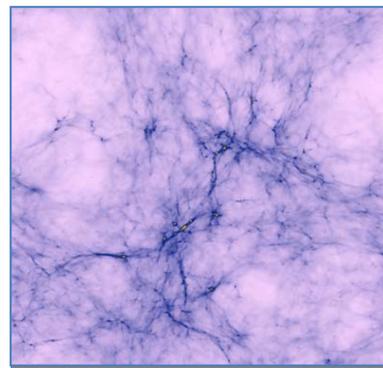


図1 宇宙年齢3億年の頃の物質分布

様々な過程を経てガス雲中心部は密度にして 20 桁以上も変化し、やがて太陽の 100 分の 1 ほどのちいさな原始星が生まれます。はじめは小さな原始星も、周りに大量にある水素ガスを取り込んですぐに成長し、太陽の数十倍から百倍近くもの質量を持つ大質量星となります。こうして生まれる「ファーストスター」は宇宙で初めて炭素や酸素、鉄などの重元素を生みだし、またそれまで暗闇だった宇宙に初めて光を灯します(図 2)。

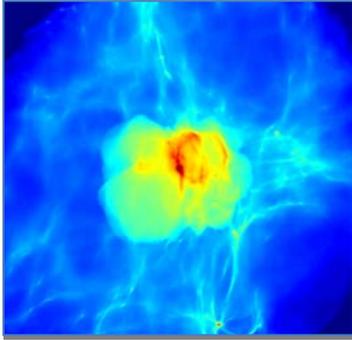


図 2 ファーストスターにより暖められる銀河間ガス

次に、私たちは宇宙初期のブラックホール形成の一つの理論モデルを提唱しました。これまでの遠方宇宙の観測から、宇宙創生後 10 億年という非常に早期に、質量が太陽の 10 億倍以上もある超巨大ブラックホールが存在することが分かっています。しかしどのようにして超巨大ブラックホールが形成されたのかは分かっていません。特に、その「種」が何だったのかは大きな謎として残っています。私たちは星の進化モデル計算を行い、ファーストスターが周りのガスを取り込み続ける場合には、その寿命二百万年の間に太陽の 900 倍にもなり、進化の最後に重力崩壊によって丸ごとブラックホールになるという道筋を発見しました。こうして生まれる中間質量ブラックホールは、さらに周辺のガスを取り込み、また合体も繰り返し、宇宙年齢 10 億歳の頃までに超巨大ブラックホールになることが可能です。

私たちの研究から示唆されるような大質量星が宇宙初期に生まれた場合には、それらが超新星爆発を起こしたり、ガンマ線バーストと呼ばれる天体となって、現在あるいは近い将来の望遠鏡・衛星で発見することが可能だと考えられています。これらの観測へ向けて、星形成の効率や明るさの分布などをコンピューターシミュレーションで明らかにしようとしています。

## 5. 今後の計画

2010 年代に稼働開始する大型望遠鏡のほとんどが、その主要な目的の一つとして宇宙最初期の天体の直接観測を掲げています。その有力なターゲットの一つとして、多数の星が形作る銀河が考えられます。この「初代銀河」の質量、明るさや特徴、その空間分布を明らかにすることが重要です。私たちはこれまでに構築してきた理論モデルと数値計算手法を用いて、初代銀河形成の大規模数値シミュレーションを行う予定です。その結果はインターネットなどを通して研究コミュニティに公開し、次世代の研究に役立ててもらいます。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- (1) N. Yoshida, K. Omukai, L. Hernquist, *Protostar Formation in the Early Universe*, Science, 321 (2008) 669-671
- (2) V. Bromm, N. Yoshida, C. McKee, L. Hernquist, *The Formation of the First Stars and Galaxies*, Nature, 459 (2009) 49
- (3) H. Umeda, N. Yoshida, K. Nomoto, M. Sasaki, S. Tsuruta, *Early Blackhole Formation by Accretion of Gas and Dark Matter*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 08 (2009) 024
- (4) N. Yoshida, *Structure Formation in the Early Universe*, Advanced Science Letters, 4 (2011) 286-296
- (5) V. Bromm, N. Yoshida, *The First Galaxies*, Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics, 49 (2011)

2008 年 8 月 国際純粋応用物理連合 (IUPAP) 若手科学者賞受賞

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

ホームページ等

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