

## 宇宙を飛び交うニュートリノの動きを明らかに ～世界初の6次元シミュレーションに成功～

物質を構成する基本的な素粒子の一つであるニュートリノは我々の宇宙に大量に存在し、わずかながら質量を持つことが知られています。しかし、その質量は、地上の素粒子実験などでは測定が困難で、未解明の謎として残っています。一方、宇宙における天体や物質の分布（大規模構造）の詳細な観測からニュートリノの質量を測定できることが近年の宇宙進化の理論によって示され、大型観測プロジェクトが世界中で計画されています。

理論的には、精緻な数値シミュレーションにより宇宙の大規模構造を詳細に再現することが必要ですが、そのためには、多次元空間中での素粒子の集団的な運動を記述する「ブラソフ方程式」を解かなくてはなりません。この難解な方程式を解くためには膨大な計算時間やコンピュータの記憶容量が必要なため、これまではニュートリノの分布を仮想的な粒子の分布に置き換え、近似的な解を得ることしかできませんでした。しかしこの方法では、再現された宇宙の物質分布に人工的な数値ノイズが混入するという大きな問題があります。

本研究では、筑波大学と東京大学が新たに開発したブラソフ方程式の高精度計算手法と、国内を代表するスーパーコンピュータを組み合わせることによって、ブラソフ方程式を直接解き、宇宙を高速で飛び交うニュートリノの6次元数値シミュレーションを行うことに、世界で初めて成功しました。これにより、ニュートリノの集団的な運動の様子を正確に調べることができるようになり、ニュートリノの質量を正確に測定するための理論モデルの構築が可能となりました。

### 研究代表者

筑波大学 計算科学研究センター

吉川 耕司 講師

京都大学 基礎物理学研究所

田中 賢 特定研究員

東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構

吉田 直紀 主任研究者/教授

ミズーリ州立ミズーリ工科大学

斎藤 俊 助教授

## 研究の背景

ニュートリノは、原子核のベータ崩壊などの素粒子の弱い相互作用に関わる電氣的に中性の素粒子で、重力相互作用以外では他の物質とほとんど相互作用をしないことが知られています。宇宙には、その非常に初期の段階から大量のニュートリノが存在していましたが、素粒子の標準模型<sup>注1)</sup>では光子と同様に質量が0として扱われていたため、宇宙大規模構造<sup>注2)</sup>の形成にはほとんど影響がないと考えられてきました。しかしながら、スーパーカミオカンデなどを用いた素粒子実験によるニュートリノ振動<sup>注3)</sup>現象の発見によって、ニュートリノにも質量があることが示され、ニュートリノが重力相互作用を通じて宇宙大規模構造形成に力学的な影響を与える可能性が指摘されました。一方、ニュートリノに質量があるという事実は明確になったものの、3種類あるニュートリノの質量や質量の大小関係（質量階層）は、素粒子の標準模型を超える素粒子理論を構築する上で重要であるにも関わらず未だに分かっていません。そこで、宇宙大規模構造形成にニュートリノが与える力学的な影響を天文学的な観測によって測定し、それをもとにニュートリノの質量を測定するアイデアが検討され、同時に、質量を持つニュートリノが宇宙大規模構造形成に与える影響を理論的かつ詳細に予言するための数値シミュレーションが行われるようになりました。

宇宙大規模構造形成の数値シミュレーションでは、物質分布や速度分布を統計的にサンプリングして多数の質点の位置と速度で表現するN体シミュレーションという手法が採用されています。この手法は過去数十年にわたって研究され、改良が加えられてきましたが、物質分布を統計的にサンプリングすることによって、数値シミュレーションの結果に人工的な数値ノイズ（ショットノイズ）が含まれてしまうという欠点があります。また、ニュートリノが宇宙大規模構造に及ぼす主な力学的影響としては、ニュートリノのうち少数の高速度成分が重要な役割を果たす無衝突減衰<sup>注4)</sup>という物理過程が挙げられますが、統計的なサンプリングでは高速度成分を忠実にサンプリングできず、正確な数値シミュレーションとなっていない可能性が指摘されていました。

## 研究内容と成果

このようなN体シミュレーションの問題点を回避するため、本研究では、物質の連続的な空間分布や速度分布をサンプリングすることなく、連続的な分布として数値シミュレーションを行う手法を用いて、宇宙大規模構造におけるニュートリノ運動の数値シミュレーションを行いました。この手法は、ブラソフ方程式という、多数の粒子の集団的な振る舞いを記述する方程式を数値シミュレーションによって解くもの（ブラソフシミュレーション）ですが、位相空間と呼ばれる空間3次元と速度空間3次元を合わせた合計6次元の仮想的な空間を扱う必要があり、膨大な記憶容量と計算量が必要となるため、これまで実際に採用された例はありませんでした。本研究では、スーパーコンピュータ「Oakforest-PACS」<sup>注5)</sup>、およびスーパーコンピュータ「京」<sup>注6)</sup>という国内最先端の大規模スーパーコンピュータと、本研究グループが過去に開発した、少ない記憶容量で高精度にブラソフ方程式を数値シミュレーションする計算手法を組み合わせることで、世界で初めてブラソフシミュレーションを実用化しました。これを用いて、宇宙大規模構造形成におけるダークマターとニュートリノの数値シミュレーションを行い、数値ノイズの全く無い計算結果を得ることに成功しました。その結果、これまでのN体シミュレーションでは数値ノイズに埋もれて正確に求めることが困難であった、ニュートリノの細かいスケールでの密度分布や宇宙大規模構造におけるニュートリノの温度分布が明らかとなり、これらがニュートリノの質量に大きく依存することを見出しました（図1、2）。

## 今後の展開

今後は、スーパーコンピュータ「京」の後継機となるスーパーコンピュータ「富岳」を用いてさらに高精度なシミュレーションを行い、宇宙大規模構造の観測からニュートリノの質量をより正確に求めていく予定です。このような数値シミュレーション結果は、現在行われている日本のすばる望遠鏡を用いた「Hyper Supreme-Cam すばる戦略プログラム」、Dark Energy Survey や Large Synoptic Survey Telescope 計画、Euclid 計画などの将来の大規模な宇宙大規模構造の観測計画における観測データの解釈にとって重要な役割を果たしうると考えられます。

また、本研究で用いたブラソフシミュレーションの手法は、同様に数値ノイズの悪影響が指摘されているダークマターなどの数値シミュレーションでも威力を発揮すると期待されます。

## 参考図

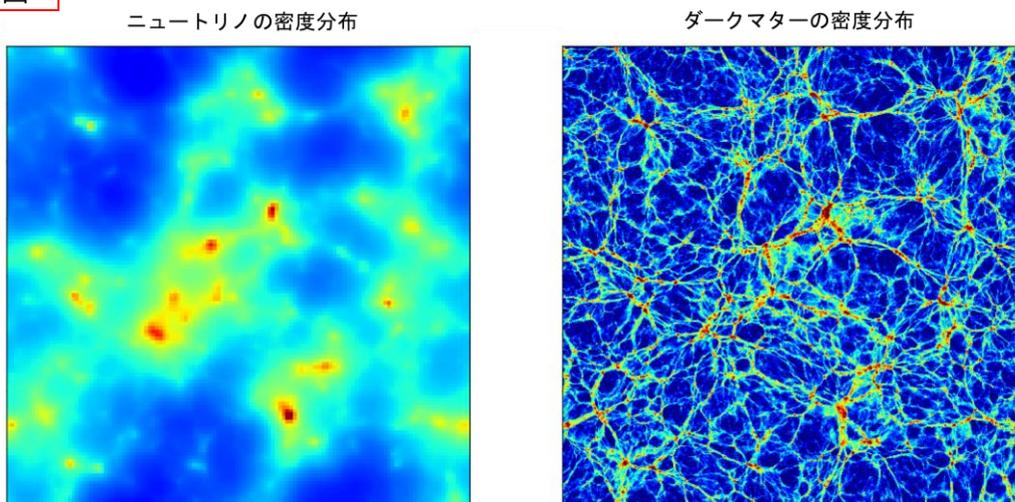


図1 宇宙大規模構造形成における、ニュートリノ（左）とダークマター（右）の密度分布。ニュートリノは質量が小さく速度分散が大きいいため、広がった分布を示すのに対して、ダークマターはフィラメント構造と呼ばれるひも状の高密度領域を形成する。

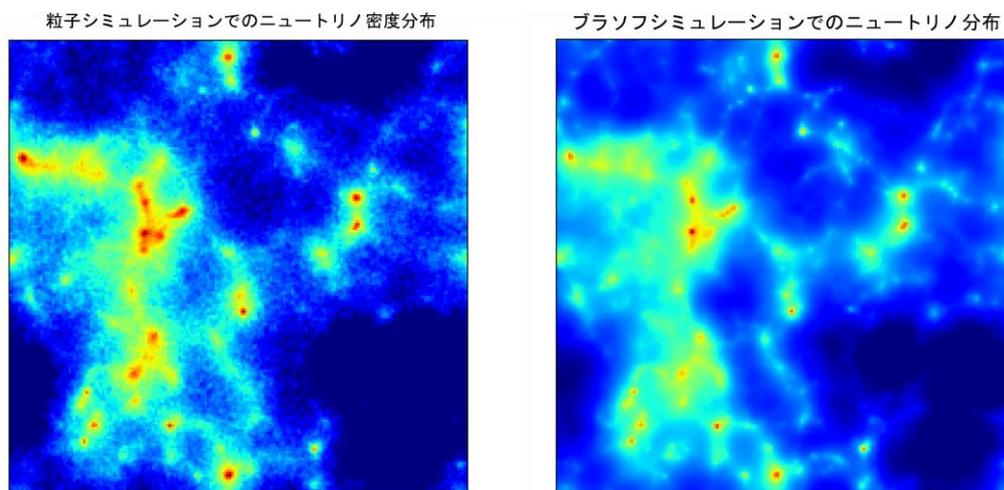


図2 N体シミュレーション（左）とブラソフシミュレーション（右）による、宇宙大規模構造形成におけるニュートリノ密度分布の比較。N体シミュレーションで得られるニュートリノ密度分布には数値ノイズによるざらつきが発生するが、ブラソフシミュレーションで得られる密度分布は非常になめらかで、細かい密度の濃淡も明瞭に捉えることができる。

## 用語解説

### 注1) 素粒子の標準模型

クォークやレプトンを基本的な素粒子として、それらの間に働く電磁相互作用・弱い相互作用・強い相互作用を記述する素粒子物理学の理論。

### 注2) 宇宙大規模構造

宇宙の銀河の分布が示す非一様な構造。銀河がほとんど存在しない「ボイド」と呼ばれる領域や銀河が多く集まる「フィラメント構造」が存在する。宇宙の質量の大半を占めるダークマターも同様の分布をしており、宇宙初期の非常に小さな密度揺らぎが重力相互作用によって増大して宇宙大規模構造を形成すると考えられている。

### 注3) ニュートリノ振動

ニュートリノには電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類の状態があり、ニュートリノが空間を伝搬していく過程でそれぞれの存在確率が周期的に変化する現象。日本の素粒子観測装置スーパーカミオカンデで発見され、ニュートリノが質量をもつ直接的な証拠となっている。

### 注4) 無衝突減衰

速度分散をもつ多数の粒子が重力相互作用をする場合、速度分散の大きさに依存したある空間スケール以下の波長をもつ密度揺らぎが時間とともに減衰する現象。速度分散が大きいほどより波長の大きな密度揺らぎが減衰する。

### 注5) スーパーコンピュータ「Oakforest-PACS」

筑波大学計算科学研究センターと東京大学情報基盤センターが共同運営する「最先端共同 HPC 基盤施設」(JCAHPC: Joint Center for Advanced High Performance Computing) が管理運用する、超並列メニーコアクラスター。2016年12月より本格運用開始。2016年11月から2017年11月まで国内最高性能。

### 注6) スーパーコンピュータ「京」

理化学研究所計算科学研究センターで2019年まで運用されたスーパーコンピュータ。2011年6月から2011年11月まで世界最高性能。2011年6月から2016年11月まで国内最高性能。

## 研究資金

本研究は計算基礎科学連携拠点(JICFuS)の元、文部科学省ポスト「京」重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明」、文部科学省スーパーコンピュータ「富岳」成果創出加速プログラム(宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築)、科学研究費補助金(JP18H04336)の支援により実施されました。

## 掲載論文

【題名】 Cosmological Vlasov-Poisson Simulations of Structure Formation with Relic Neutrinos: Nonlinear Clustering and the Neutrino Mass

(ニュートリノを含む構造形成の宇宙論的 Vlasov-Poisson シミュレーション: 非線形クラスターリングとニュートリノ質量)

【著者名】 吉川耕司(筑波大学計算科学研究センター)、田中賢(京都大学基礎物理学研究所)、吉田直紀(東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構)、斎藤俊(ミズーリ州立ミズーリ工科大学)

【掲載誌】 The Astrophysical Journal

【掲載日】 2020年11月30日

【DOI】 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abbd46>