



## 高エネルギー天体現象中の ニュートリノ輸送シミュレーション

研究・開発機関 : 国立天文台  
 利用施設 : スーパーコンピュータ「富岳」、他HPCI拠点計算機  
 計算規模 : 2048ノード(超新星爆発モデル)、9216ノード(連星中性子星合体モデル)  
 利用ソフトウェア : 一般相対論的量子運動論的ニュートリノ輸送コード (GRQKNTコード)

### Before

- ニュートリノという素粒子は、宇宙で発生する様々な高エネルギー現象において重要な役割を担う事がわかっています。
- そのプロセスを理解するには、数値シミュレーションが不可欠ですが、ニュートリノの量子的な効果を取り入れたシミュレーションを行うには多くの問題があり、これまで正確な理論モデルの構築に至っていません。

### After

- 我々は、ニュートリノ振動と呼ばれる量子的効果を取り入れた輻射輸送の巨視的シミュレーションを世界で初めて実現しました。
- この成果により、超新星爆発や連星中性子星合体などの超高エネルギー天体現象の理解がさらに深まる事が期待されます。

### ■背景と目的

宇宙では我々が想像できないほどの高エネルギー天体現象が頻繁に発生しています。例えば、太陽の10倍以上の質量をもつ星が爆発する「超新星爆発」や、太陽と同じぐらいの質量を持ちつつ半径がわずか10kmほどの星(中性子星と呼ばれています)同士が合体する「連星中性子星合体」があります。これらの現象では、物質密度が水の100兆倍以上となり、温度も数百億度にも達します。このような極限現象を理解するには、地球上での実験は不可能なため、数値シミュレーションを用いた解析が不可欠です。

これらの高エネルギー天体現象の中でも特に理解が難しいとされているのが、「ニュートリノ」と呼ばれる粒子の挙動です。ニュートリノはあまり馴染みのない粒子だと思われていますが、実際は太陽から放射されたニュートリノが常に地球に降り注いでおり、我々の体を毎秒100兆個以上も通り抜けています。超新星爆発や連星中性子星合体では、さらに大量のニュートリノが放出され、これらが空間中を伝播し、物質と相互作用することで、天体現象全体に大きな影響を与える事がわかっています。また、ニュートリノは3種類(フレーバーと呼ぶ)存在することがわかっており、それらがお互いに混ざり合いながら空間を伝播します(図1参照)。このニュートリノ振動は量子論的特性の一つで、超新星爆発や連星中性子星合体でも起こりうるのですが、これを詳細にシミュレーションに組み込むことは、これまで非常に難しい課題とされてきました。

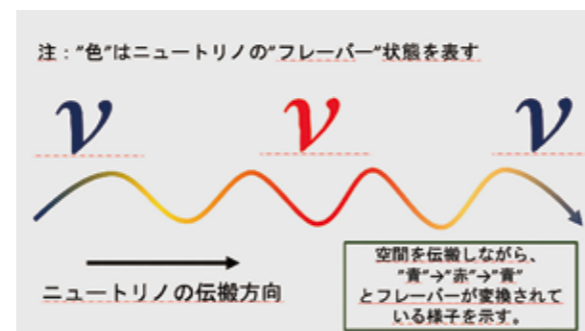


図1 空間でのニュートリノの伝播

### ■利用成果

このような現状の中、我々はスーパーコンピュータ「富岳」を利用して、ニュートリノ量子運動論に基づいた大規模数値シミュレーションを行いました。図2には、超新星爆発中のニュートリノ振動の強度分布を示しており、シミュレーションの結果、超新星爆発の中心付近で激しいニュートリノ振動が発生することがわかりました。その振動が発生した原因として、ニュートリノ同士の相互作用が、ニュートリノ振動を相乗的に強めた事が挙げられます。重要な点は、従来の超新星爆発の標準理論では、ニュートリノ同士の相互作用を考慮しておらず、そのため超新星爆発の中心付近ではニュートリノ振動は発生しないとされていました。これに対して、我々の結果はこの仮定を覆すものであり、さらにニュートリノは超新星爆発メカニズムに重要な役割を担うため、本結果は超新星爆発メカニズムを解明する上で重要なデータとなります。

図3には、連星中性子星合体環境下での結果をのせています。超新星爆発と同様に、ニュートリノ同士の相互作用により激しいニュートリノ振動が発生することが、わかりました。特に興味深いのは、連星中性子星合体の最中のニュートリノ振動のパターンが超新星爆発環境と異なることです。超新星爆発では、3種類のフレーバーが完全に混ざり合う傾向があるのに対して、連星中性子星合体では、異なるフレーバーが互いに入れ替わる「フレーバースワップ」と呼ばれる現象が現れることがわかりました。これは、連星中性子星合体の環境下で、各ニュートリノフレーバーの空間分布が大きく変わることを意味します。このようなニュートリノの挙動は、従来の連星中性子星合体の理論でも考慮されておらず、今後の標準モデルに組み込まれる事が期待されます。

超新星爆発及び連星中性子星合体の環境下でのニュートリノの量子運動論的輻射輸送シミュレーションは、非常に計算負荷が高く、また理論や計算技術的側面からも多くの課題があったため、これまでは実現できていませんでした。しかし、本シミュレーションプロジェクトは「富岳」の大規模並列計算機を用いて初めて実現できたものであり、その一方で、予期しなかった現象(例えば、フレーバースワップ)が観測されニュートリノの新たな特性を示すなど、世界的にユニークな結果を創出し続けています。我々は今後も、数値シミュレーションやその他の様々な手法を駆使して解析を進め、超新星爆発および連星中性子星合体の理論的研究をさらに推進していく予定です。

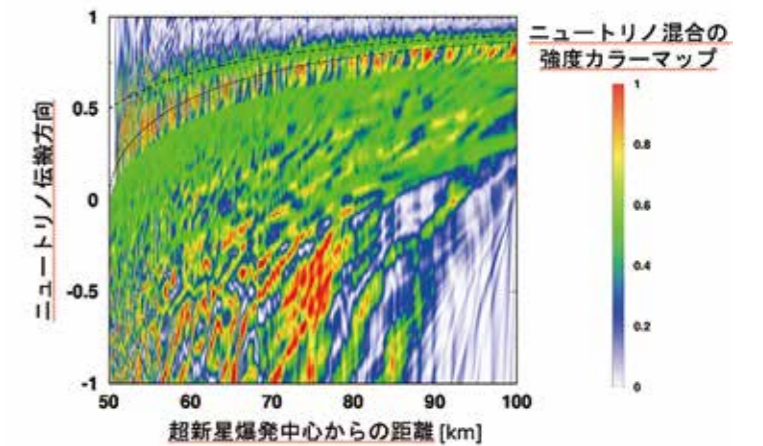


図2 超新星爆発中のニュートリノ振動の強度分布

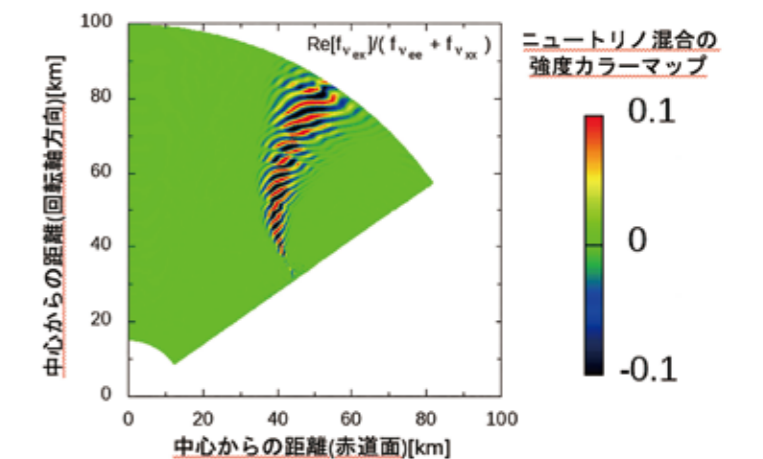


図3 連星中性子星合体環境下でのニュートリノ量子運動論的輻射輸送シミュレーション結果