

ニュートリノ集団振動がもたらす爆発天体現象における ニュートリノ輸送計算の新展開

財前真理 〈東京大学大学院総合文化研究科 mzizn@g.ecc.u-tokyo.ac.jp〉

超新星爆発や連星中性子星合体は宇宙における代表的な**爆発天体現象**である。その中心部で形成される高温高密度な極限環境では、ニュートリノが物質とほどよく結合することでエネルギーや運動量、レプトンを交換し、輸送する現象が起きる。この輸送効果によって、流体としてのマクロな対流から、ミクロな反応としての元素合成まで、様々な特徴量に影響を与えることとなる。結果として、超新星爆発では衝撃波が星の表面に到達できるかどうか、連星中性子星合体では金やランタノイドなどの重元素がどれだけ合成されるかといった点にまで影響を与えることが知られている。

しかし銀河系内や近傍銀河でこのような天体現象が発生するのは稀であり、観測的にその天体物理の理論を構成および較正するのは容易ではない。そこであらゆる物理を組み込んだ数値的な理論モデリングを行うことで、この天体現象への理解を進めることが可能となる。その上ではニュートリノの取り扱いが肝心であり、通常の流体計算などに加えて**ニュートリノ輸送計算**をまじめに解く必要がある。そうした理論モデリングにおける現在の大きな課題・不定性の1つが**ニュートリノ振動**である。このフレーバーが変化する効果を輸送計算に組み込もうとする研究が世界的にも盛んに行われている。

その中でも、ニュートリノの自己相互作用によって誘起される**集団振動**と呼ばれる現象が特に注目を集めている。ニュートリノ集団振動において興味深いのはその非線形性であり、フレーバー変換をもたらす引き金となる**フレーバー不安定性**が複数見つかっている。この不安定性の成長率は、周

囲の物質との吸収散乱などの衝突率と比べてずっと速いものである。そのため、ひとたびこの非線形なフレーバー変換が起きてしまえば十分に爆発天体現象のダイナミクスを変える可能性がある。天体現象の中心部から放出されたニュートリノは、ニュートリノ自身を含むあまたの物質と相互作用を繰り返しながら、そのフレーバー分布が複雑に変化し、周囲の物質へとフィードバックを与えることとなるのである。

このフレーバー変換現象の振る舞いを探るために、古典的な運動論であるボルツマン方程式をニュートリノ振動を含む形に拡張した**量子運動論的ニュートリノ輸送方程式**の数値シミュレーションが行われている。興味深いことに、ニュートリノ自体の移流や背景物質との吸収散乱によって、そのフレーバー分布が周期的な振動ではなく、ある特定の状態へと漸近していくことが最近明らかになりつつある。ニュートリノのフレーバー分布が至るこの準定常状態をうまくモデリングできれば、量子運動論を直接数値的に解くことなく、天体シミュレーションに組み込むことが可能となる。

そうした背景もあり、この非線形なフレーバー変換現象の漸近挙動を解析的に与えてやろうという動きが現在進んでいる。既に一部のフレーバー不安定性に対する振る舞いは大雑把ではあるがモデル化に成功し、爆発天体現象の数値シミュレーションに組み込まれ始めている。そこでは実際にニュートリノのフレーバー分布が変化することで天体現象のダイナミクスや元素合成量を変えることが確認されるなど、改めてこのニュートリノ振動の天体物理における重要性が高まりつつある。

用語解説

爆発天体現象：

恒星や中性子星などの天体が引き起こす現象。中心に高温高密度な環境を残す一方、周囲に鉄や金など様々な重元素をばら撒く天文学的にも重要なイベントである。

ニュートリノ輸送計算：

ニュートリノについてのボルツマン方程式を解くことで、周囲の流体との間でのエネルギーや運動量、レプトンの交換過程を取り扱うものである。

ニュートリノ振動：

ニュートリノが伝搬する間にそのフレーバーが周期的に振動する現象。ニュートリノが有限の質量をもつことで生じる。

集団振動：

高密度のニュートリノ自身で作るポテンシャルによって引き起こされる非線形なフレーバー変換現象。

フレーバー不安定性：

集団振動において、フレーバー間のゆらぎを指数関数的に増幅し、非自明なフレーバー変換を引き起こす引き金。高速フレーバー不安定性 (FFI) が代表例である。

量子運動論的ニュートリノ輸送方程式：

古典的な衝突過程や移流に加え、電子やニュートリノからのポテンシャルによる振動効果を組み込んだ計算。

