

論文内容の要旨

論文課題： Neutrino Probes of Core-collapse Supernova Interiors

(ニュートリノで探る重力崩壊型超新星の内部
構造)

氏名 堀内 俊作

本論文は、第一に最新の観測データに基づいた「超新星ニュートリノ」の観測見込について理論的に考察し、第二に超新星の内部構造を探るニュートリノを用いた新しいプローブの可能性を論じている。そもそもニュートリノは、その強い透過力と無電荷のゆえに、宇宙物理研究において重要な研究対象となってきた。たとえば、重力崩壊型超新星爆発（超新星、以下同様）は、ニュートリノ源として知られており、超新星ニュートリノの検出から得られる物理学的知見は、素粒子の標準理論を超えたニュートリノの性質や、極めて高温・高密度状態の核反応や、光子では覗くことのできない星の表面下の構造など、大きな成果が期待できるものなのである。

第一に、まず一般に超新星において解放される全エネルギーのうち、大半はメガエレクトロンボルト (MeV) 程度のエネルギーを持つ熱的ニュートリノとして解放される。そのためこの熱的ニュートリノは超新星の理解に欠かせないものであるが、観測例は 1987 年の超新星 SN1987A の一例しかなく、1987 年以

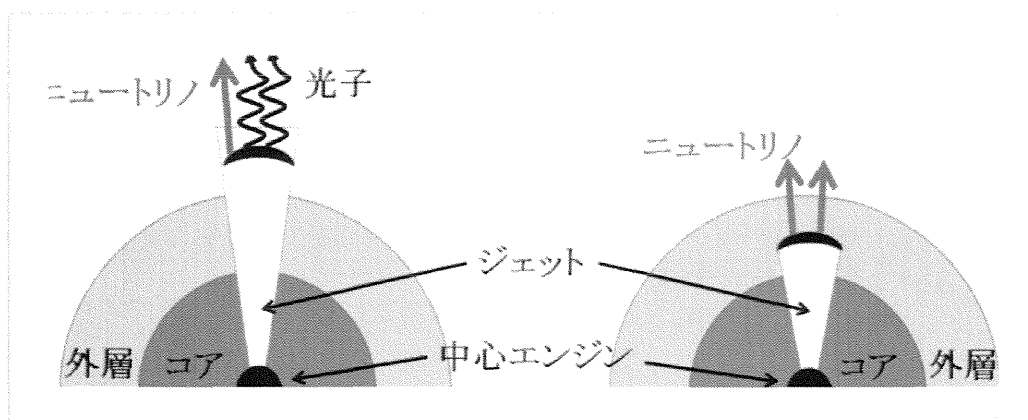
降も、地球上のニュートリノ検出器で熱的ニュートリノが検出できるほどこの地球近くで超新星は起きていない。ところが、「超新星背景ニュートリノ放射」(DSNB、以下同様)は、遠方に起きた過去のすべての超新星から放射された熱的ニュートリノの集計であり、その観測は近傍の超新星の発生を待つ必要がない。DSNBを理論的に予言するには、個別の超新星からの熱的ニュートリノ放射の情報だけでなく、過去の超新星発生レートの情報が必要となる。

この超新星発生レートを定量的に導くため、我々は、超新星と関連のある以下の物理量をクロスチェックした。まず、星の誕生の情報を記録する星形成率、次に星の一生の情報を記録する銀河外背景光子放射や星の質量密度、そして最後に星の末期の情報を記録する超新星発生レートを同時に評価した。その結果、大質量星の誕生から末期までの一貫した描写が得られ、十分な超新星レートがあることと、これまでより小さい超新星発生レートの不確定性を示すことができたのである。近い将来に、DSNBが超新星の内部やニュートリノの物理のプローブになりうるということが結論付けられたのである。

第二に、相対論的陽子の核反応より生成され、超新星の中間的時間帯(つまり、熱的ニュートリノ放出の後、可視光の放出の前)に放射されうるギガエレクトロンボルト(GeV)からテラエレクトロンボルト(TeV)程度の非熱的ニュートリノの放出可能性を理論的かつ多面的に示した。

まず星の表面下の磁場のプローブとなるニュートリノに着目した。近年、非常に強い磁場が一部の大質量星や中性子星に観測されており、その磁場起源について議論が続いている。強磁場を保持した大質量星が超新星爆発すれば、星の磁場を利用した粒子加速と非熱的ニュートリノ放射が可能であり、超新星が銀河内で起こった場合、現在のニュートリノ検出器で検出可能であることを示した。星の表面下の磁場のプローブとなりうるだけでなく、磁場起源への示唆も得られる。

さらに非熱的ニュートリノを用いた超新星ジェットのプロブを論じている。近年、超新星とガンマ線バースト(GRB、以下同様)が関連していることが



観測的に確認され、100程度のローレンツ因子のジェットが超新星を伴っていることが強く示唆された(左図)。このことは、GRBに対する理解を大きく深めると同時に、新たな疑問を現在も投げかけている。すなわち「全ての超新星はGRBにみられるような相対論的ジェットを伴っているのか?」という疑問である。この疑問に対する答えは光による観測からだけではえることができず、光では見えないジェット(右図)もプローブできる、透過力の強いニュートリノが疑問を解く重要な鍵となるのである。

この光では見えない星の中に隠されてしまうジェットからのニュートリノは、超新星が地球からおよそ5メガパーセック(約 10^{23} メートル)の距離以内であれば、地上で検出可能となる。これは年間に一個程度の超新星が期待される距離である。ニュートリノの検出は、超新星とGRBの新たな関連を裏付けるとともに、ジェットの発生率や性質のプローブとなり、超新星やジェット生成メカニズムの理解にも寄与しうるのである。

本論文の研究結果を踏まえると、超新星のトータルな理解におけるニュートリノの重要性が再確認できるだけでなく、その役割がさらに高まっていくと思われるのである。