



2023年7月11日

報道関係者各位

慶應義塾大学

超新星における素粒子の左右の対称性の破れの効果を解明 —ミクロな素粒子論からマクロな天体現象への新たな知見—

私たち人間の体を構成している炭素や酸素などの元素は、もともと大質量星の内部で核融合反応によって作り出され、星の進化の最終段階である重力崩壊型超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれて存在しています。しかし、超新星爆発のメカニズムは未だに理論的によくわかっていません。

慶應義塾大学理工学部の山本直希准教授と中央研究院（台湾）のヤン・ディールン助研究員は、電子やニュートリノという素粒子のカイラリティ^{※1}の性質を考慮して、素粒子の量子多体系^{※2}の時間発展を系統的に解析する新しい理論的手法を開発しました。この手法を重力崩壊型超新星に応用し、ニュートリノを放出する際の反作用によって、磁場の方向に電流が生じるという現象を明らかにしました。さらに、この現象から、宇宙最強磁場をもつ天体であるマグネター^{※3}の磁場や、パルサーキック^{※4}と呼ばれる天体現象を同時に説明しうるメカニズムが提案されました。これらの新しい現象とメカニズムは、重力崩壊型超新星の進化を理解する上で重要な知見を与えると期待されます。

本研究成果は、2023年7月6日（現地時間）に米国物理学会誌『*Physical Review Letters*』のオンライン版にて公開されました。

1. 本研究のポイント

- ・素粒子のカイラリティの性質を考慮して、素粒子の量子多体系の時間発展を系統的に解析する新しい理論的手法を開発。
- ・この手法を重力崩壊型超新星に応用し、ニュートリノを放出する際の反作用によって磁場の方向に電流が生じるという新奇な現象を解明。
- ・マグネターの磁場やパルサーキックを説明しうる新しいメカニズムを提案。

2. 研究背景

自然界には、重力、電磁気力、弱い力、強い力という4種類の力が存在しています。重力や電磁気力は日常生活でもなじみ深い力ですが、弱い力は原子核の崩壊や太陽での核融合反応と関係しており、強い力は原子核中の陽子や中性子を結びつけるという重要な役割をしています。一般に、物質の構成要素である素粒子には、右巻きや左巻きのカイラリティと呼ばれる性質がありますが、弱い力は左巻きの素粒子にしか働かず、左右の対称性を破っていることが知られています。特に、ニュートリノという素粒子は、左巻きのカイラリティしかもたないという顕著な性質があります。

このようなニュートリノが重要な役割を果たすと考えられているのが重力崩壊型超新星爆発という天体現象です。太陽の約10倍以上の質量をもつ恒星が、進化の最終段階で鉄の中心核を作ると、核融合反応でエネルギーを作り出すことができず、星は自身の重力によってつぶれてしまいます。この重力崩壊によって中心核の密度が十分高くなると、外側から落ちてくる物質を中心核ではね返して爆発を起こします。このような超新星爆発のメカニズムは、未だに理論的には解明されていません。星の重力収縮によって解放されるエネルギーの大部分は、星内部で大量に生成されるニュー

トリノのエネルギーになるため、爆発を起こすのに重要な鍵を握るのがニュートリノだと考えられています。ところが、従来の超新星の理論では、電子やニュートリノの基本的な性質であるカイラリティを無視しており、素粒子の標準理論^{*5}に基づいていないという問題点がありました。

3. 研究内容・成果

研究グループは、素粒子の標準理論に基づいて電子やニュートリノのカイラリティの性質を考慮し、素粒子の量子多体系の時間発展を系統的に解析する新しい理論的手法を開発しました。これを重力崩壊型超新星に応用した結果、ニュートリノが放出される際に電子が反作用を受けることによって、磁場に沿った電流が生じるという現象を明らかにしました。通常の金属では、電場をかけると電場方向の電流が生じますが、弱い力が左右の対称性を破るという性質のために、超新星では磁場方向の電流という新奇な現象が可能になります。さらに、この現象から誘起される新しいタイプの磁場増幅機構によって、 10^{15} ガウスを超える磁場を生成しうることがわかりました。これらの結果に基づいて、宇宙最強磁場をもつ天体であるマグネターの磁場や、パルサーキックを同時に説明するメカニズムを提案しています。

4. 今後の展開

今回明らかにされた超新星における新奇な現象は、重力崩壊型超新星の進化を理解する上で重要な知見を与えると期待されます。また、新しい理論的手法は、超新星だけでなく、初期宇宙における素粒子の量子多体系がどのように時間的に進化するかという問題への応用も考えられています。

※本研究は、慶應義塾基礎科学・基盤工学インスティテュート (KiPAS) の研究プロジェクトとして行われ、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費補助金 (課題番号: 19K03852、22H01216)、および台湾国家科学及技術委員会 (課題番号: MOST 110-2112-M-001-070-MY3) による支援を受けています。

<原論文情報>

Naoki Yamamoto and Di-Lun Yang, “Effective Chiral Magnetic Effect from Neutrino Radiation” *Physical Review Letters*, vol. 131, 012701 (2023).

doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.012701>

<用語説明>

※1 カイラリティ: 電子やニュートリノなどの素粒子の性質で、左右の非対称性に関係する。特に、素粒子の標準理論において、ニュートリノは左巻きのカイラリティだけをもち、左右の対称性を 100% 破っていることが知られている。

※2 量子多体系: 素粒子のような量子力学に従う粒子が多数集まって相互作用する系。

※3 マグネター: 中性子星の中で特に強い磁場をもつ天体。表面磁場の大きさが地磁気の 10^{15} (1000 兆) 倍を超える。

※4 パルサーキック: 中性子星が秒速数 100 km という大きな速度をもつ現象。

※5 素粒子の標準理論: 素粒子とその間に働く力 (電磁気力、弱い力、強い力) をまとめた基礎理論。

※ご取材の際には、事前に下記までご一報くださいますようお願い申し上げます。

※本リリースは文部科学記者会、科学記者会、各社科学部等に送信させていただいております。

・研究内容についてのお問い合わせ先

慶應義塾大学 理工学部 物理学科 准教授 山本 直希 (やまもと なおき)

TEL : 045-566-1574 E-mail : nyama@rk.phys.keio.ac.jp

- 本リリースの配信元

慶應義塾広報室（望月）

TEL : 03-5427-1541 FAX : 03-5441-7640

E-mail : m-pr@adst.keio.ac.jp <https://www.keio.ac.jp/>