

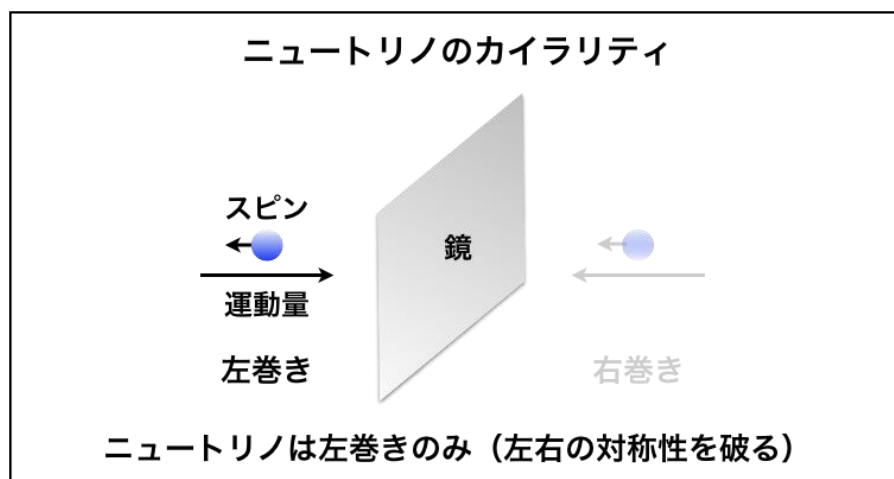
## 基礎科学・基盤工学インスティテュート (KiPAS) 2019 年度活動報告

研究題目：素粒子論に基づく超新星爆発のメカニズム解明に向けた挑戦的研究

主任研究員：山本 直希（理工学部物理学科）、研究員：Di-Lun Yang

### 2019 年度の研究活動内容

本研究では、宇宙物理学の未解決問題の1つである「超新星爆発のメカニズム」の解明を目指すことを主な目標としている。重力崩壊型の超新星爆発は、大質量星がその進化の最期に引き起こす、宇宙で最も大きな爆発現象の1つである。超新星爆発のメカニズムに特に重要な役割を果たすと理論的に考えられているのが、星の重力エネルギーの大部分を持ち運ぶ素粒子ニュートリノであるが、ニュートリノは「弱い力」でしか相互作用しないため、そのエネルギーをいかに効率よく周りの物質のエネルギーに転化し、爆発に利用できるかが鍵となる。しかしながら、実際の空間3次元では超新星爆発を理論的に再現するのは未だに困難であり、その爆発メカニズムはよくわかっていない。この問題に対して、これまでの山本の研究で、従来の超新星の理論ではニュートリノの最も基本的な性質である「カイラリティ」（下図）を無視しているため、その基礎方程式がそもそも正しくないことを指摘している。



2019 年度の研究では、この独自の着眼点に基づき、我々はミクロな素粒子の標準理論から出発して、超新星のダイナミクスを記述する基礎理論「ニュートリノのカイラル輻射輸送理論」（次頁の式）を系統的に構築することに成功した。この理論は、ニュートリノのカイラリティやニュートリノと物質の相互作用を考慮し、強い重力場中でも適用できるように一般相対論的效果を含む形で従来の非平衡輸送方程式の拡張を与えている。特に、今回導出した新たな項が、系の左右の対称性だけでなく、従来の解析でよく仮定されていた系の球対称性や軸対称性をあらわに破ることを明らかにした。さらに、素粒子の標準理論を用いて、物質のニュートリノ吸収率・放出率の量子補正に対するあらわな表式を解析的に導出した。

本研究成果はプレプリント [arXiv:2002.11348](https://arxiv.org/abs/2002.11348) (astro-ph.HE) として公開し、既に学術雑誌 The Astrophysical Journal への掲載が決定している。

## ニュートリノのカイラル輻射輸送理論

$$\left[ q^\mu (\partial_\mu - \Gamma_{\mu\rho}^\lambda q^\rho \partial_{q\lambda}) - \frac{\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_\alpha}{2q \cdot n} \left( \nabla_\mu n_\beta - n_\beta q^\rho \frac{\nabla_\mu n_\rho}{q \cdot n} \right) \partial_\nu + \frac{\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_\alpha n_\beta}{2q \cdot n} q^\rho R_{\rho\mu\nu} \partial_{q\lambda} \right] f$$

$$= (1-f)\Gamma_{(n)}^< - f\Gamma_{(n)}^>$$

カイラリティによって生じる新しい項

$$\Gamma_{(n)}^\lessgtr = q \cdot \Sigma^\lessgtr - \frac{\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_\alpha}{2q \cdot n} \left[ \left( \nabla_\mu n_\beta - n_\beta q^\rho \frac{\nabla_\mu n_\rho}{q \cdot n} \right) \Sigma_\nu^\lessgtr + n_\beta (\nabla_\mu - \Gamma_{\mu\rho}^\lambda q^\rho \partial_{q\lambda}) \Sigma_\nu^\lessgtr \right]$$

$f = f(t, x, q)$  ニュートリノ分布関数     $n^\mu$  フレームベクトル     $\Sigma_\mu^\lessgtr$  自己エネルギー

また、山本は7件の国際会議での招待講演、2件の国内学会での招待講演を含む計11件の講演を行った。さらに、素粒子・原子核・高エネルギー物理の各分野を専攻する大学院生を対象とした滞在型研究会「原子核三者若手夏の学校」において、トポロジカル輸送現象の素粒子・原子核・宇宙物理への応用に関する招待講演を行い、その解説記事を執筆した。

Yang は2件の国際会議での招待講演を含む計5件の講演を行った。

今後は、2019年度の研究で構築した「ニュートリノのカイラル輻射輸送理論」の超新星への包括的な応用研究の推進を目指している。

## 研究成果・業績

### 学術論文（査読あり）

- “Chiral Radiation Transport Theory of Neutrinos,” Naoki Yamamoto and Di-Lun Yang, accepted for publication in The Astrophysical Journal.

他2件

### 解説記事

- 「トポロジカル輸送現象入門」、山本 直希、原子核研究 第64巻 suppl.1, p.22–p.29 (2020).

### 国際会議発表等

- Naoki Yamamoto, NAOJ Workshop on Connecting Fundamental Physics, Chemistry, and the Origins of Biomolecular Homochirality, National Astronomical Observatory of Japan, June 27, 2019 (invited).

他国際会議 招待講演6件・一般講演1件

国内学会 招待講演2件・一般講演1件

2019年度 原子核三者若手夏の学校、滋賀県高島市、2019年8月9日（招待講演）。

- Di-Lun Yang, Recent Progress on Field and String Theory: Kyoto-NTU 2019, Kyoto, Japan, December 7, 2019 (invited).

他国際会議 招待講演1件・一般講演3件