

超新星爆発におけるカイラル輸送現象

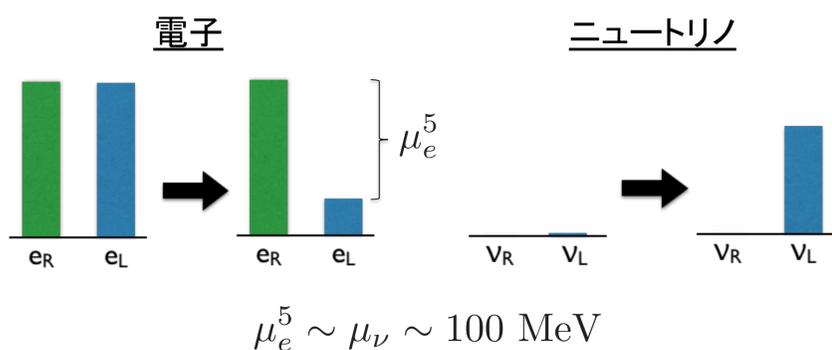
慶應義塾大学 理工学部 山本直希

重力崩壊型の超新星爆発では、電子捕獲過程によって、左巻きニュートリノと右巻き電子が大量に生成される。このようなカイラルフェルミオンに特有のトポロジカル量子輸送現象(カイラル輸送現象)が、超新星爆発そのものや、その後の大質量星の進化に重要な役割を果たす可能性について議論する。

カイラル輸送現象の例として、磁場や渦度の向きに電流や粒子流が流れるカイラル磁気効果やカイラル渦効果がある。このような輸送現象はカイラルプラズマ不安定性を引き起こし、その結果、磁気ヘリシティをもつ強磁場や流体ヘリシティを生成する。前者はマグネター磁場の起源の新しい機構を与える一方、後者は渦を大きくする効果 (inverse cascade) によって、超新星爆発そのものを起こしやすくすると期待される。

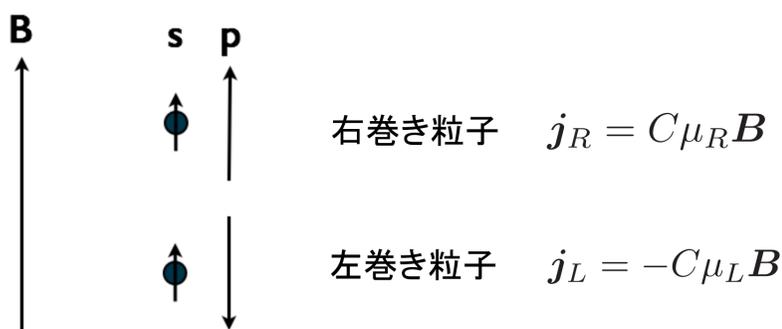
超新星爆発におけるカイラルフェルミオン

電子捕獲反応: $p + e_L^- \rightarrow n + \nu_L^e$



カイラル輸送現象

Chiral Magnetic Effect (CME)



磁場の向きの電流: $j_e = C\mu_5 B$

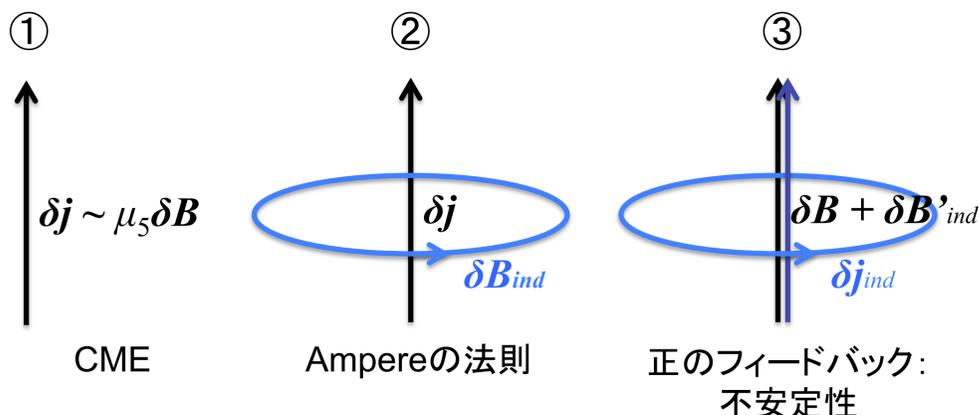
Vilenkin (1980); Nielsen-Ninomiya (1982); Kharzeev et al. (2008)

磁場を渦度にしても同様の輸送現象: Chiral Vortical Effect (CVE)

$$j_L = -(D_1\mu_L^2 + D_2T^2)\omega$$

カイラルプラズマ不安定性 (CPI)

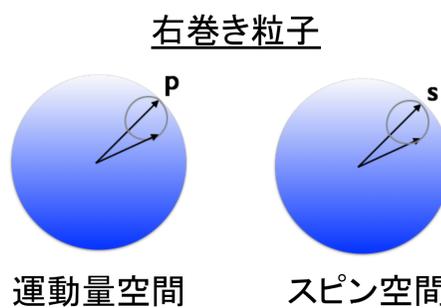
系に一様に μ_5 があるとき、無限小磁場の摂動を考える。



→ 磁気ヘリシティをもつ強磁場の生成

カイラル輸送理論

Boltzmann方程式 → カイラル粒子に特有のBerry曲率による補正



$S^2(p\text{空間})$ から $S^2(s\text{空間})$ へのmapping: 巻き数 +1 (左巻き粒子: 巻き数 -1)

p 空間の曲率 = Berry曲率

$$\Omega_p = \pm \frac{p}{2|p|^3}$$

カイラル粒子の運動方程式

$$\begin{cases} \dot{x} = v + \dot{p} \times \Omega_p = \frac{1}{\sqrt{\omega}} [v + E \times \Omega_p + (v \cdot \Omega_p) B] \\ \dot{p} = E + \dot{x} \times B = \frac{1}{\sqrt{\omega}} [E + v \times B + (E \cdot B) \Omega_p] \end{cases}$$

カイラル輸送理論

$$\omega \equiv 1 + B \cdot \Omega_p$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{\omega}} [v + E \times \Omega_p + (v \cdot \Omega_p) B] \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} + \frac{1}{\sqrt{\omega}} [E + v \times B + (E \cdot B) \Omega_p] \cdot \frac{\partial n_p}{\partial p} = C[n_p]$$

磁気・流体・混合ヘリシティ

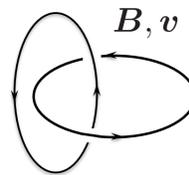
カイラル物質における保存則

$$Q_5 + C_1 Q_{\text{mag}} + C_2 Q_{\text{flu}} + C_3 Q_{\text{mix}} = \text{const.}$$

C_1, C_2, C_3 : 厳密に決定される係数(トポロジーと関係)

$Q_{\text{mag}}, Q_{\text{flu}}, Q_{\text{mix}}$

磁気・流体・混合ヘリシティ: 磁場・流速の絡み目



- 右巻き電子 → 磁気ヘリシティをもつ強磁場 $B_{\text{max}} \sim 10^{18} \text{ Gauss}$ → マグネター磁場の起源?
- 左巻きニュートリノ → 流体ヘリシティ → Inverse cascade?

参考文献

- Chiral Kinetic Theory: D. T. Son & NY, PRL (2012)
- Chiral Plasma Instability: Y. Akamatsu & NY, PRL (2013)
- Magnetars and CPI: A. Ohnishi & NY, arXiv:1402.4760
- Chiral transport of neutrinos: NY, arXiv:1511.00933