

超新星における カイラル電磁乱流

山本 直希（慶應義塾大学）

2019年1月16日 「量子多体系の素核・物性クロスオーバー」

Main topics

- 重力崩壊型 超新星爆発の問題
- カイラル輸送現象
- 超新星におけるカイラル電磁乱流
- カイラル輻射流体力学

単位系： $\hbar = c = k_B = e = 1$

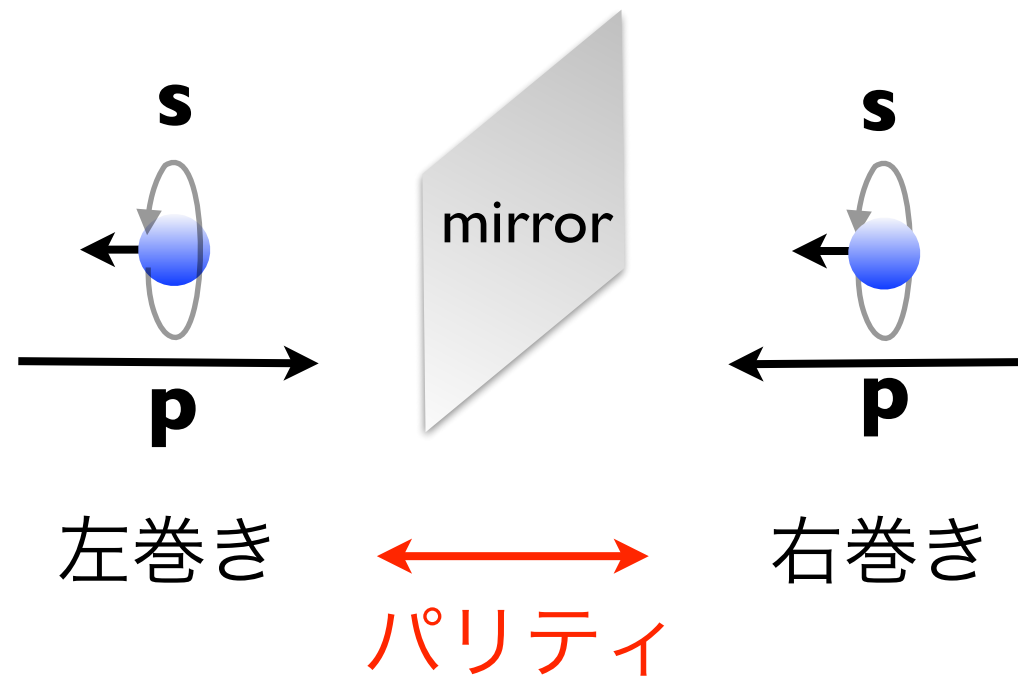
重力崩壊型 超新星爆発

超新星爆発

- 宇宙で最も大きな爆発現象の1つ
- 大質量星の中性子星への転移 & 重元素の起源
- 重力エネルギーの大部分をニュートリノが持ち運ぶ
- 従来のニュートリノ輸送理論では3次元の超新星爆発が困難

宇宙物理学の未解決問題の1つ

カイラリティ



「神」は左利きか？

左巻き粒子のみに働く弱い力を除き、物理法則は左右対称



W. Pauli

“God is just a **weak left-hander.**”



ミクロからマクロへ

ミクロなパリティの破れ → マクロな流体力学的な振舞い

ミクロ

素粒子標準模型における ν, e のカイラリティ



カイラル運動論 (Boltzmann方程式)

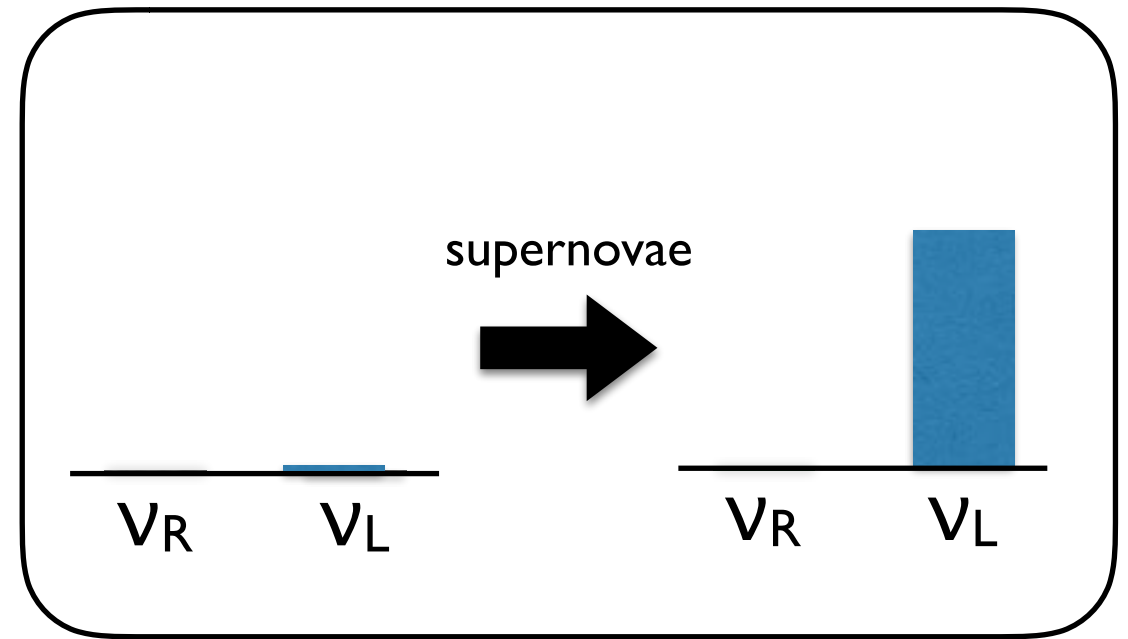
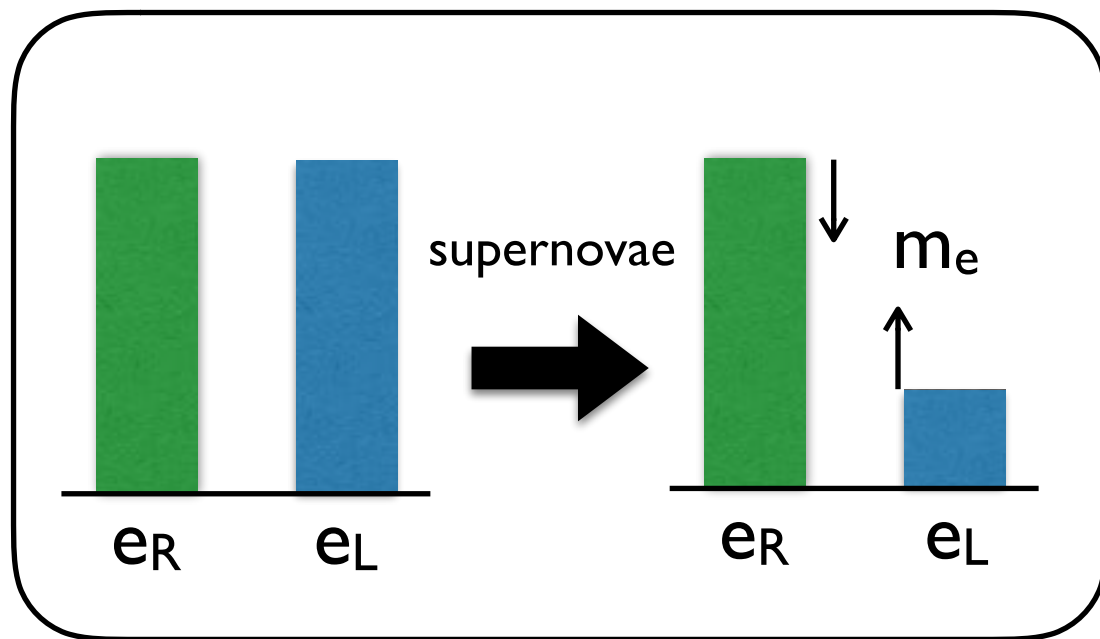
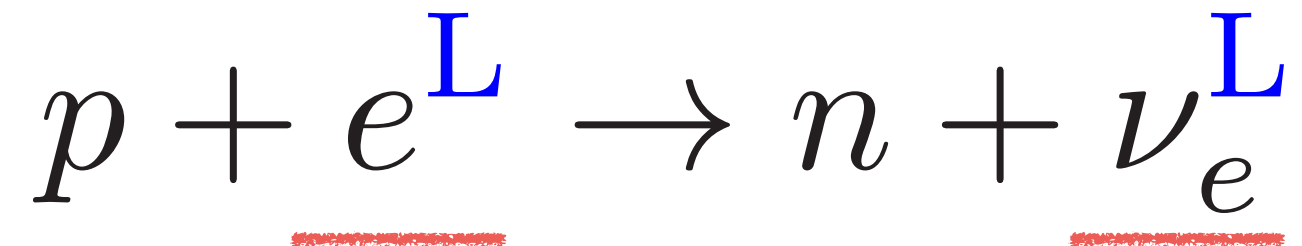


Son, Yamamoto (2012); Stephanov, Yin (2012), ...

マクロ

超新星の進化 (宇宙最大のパリティの破れ) Yamamoto (2016)

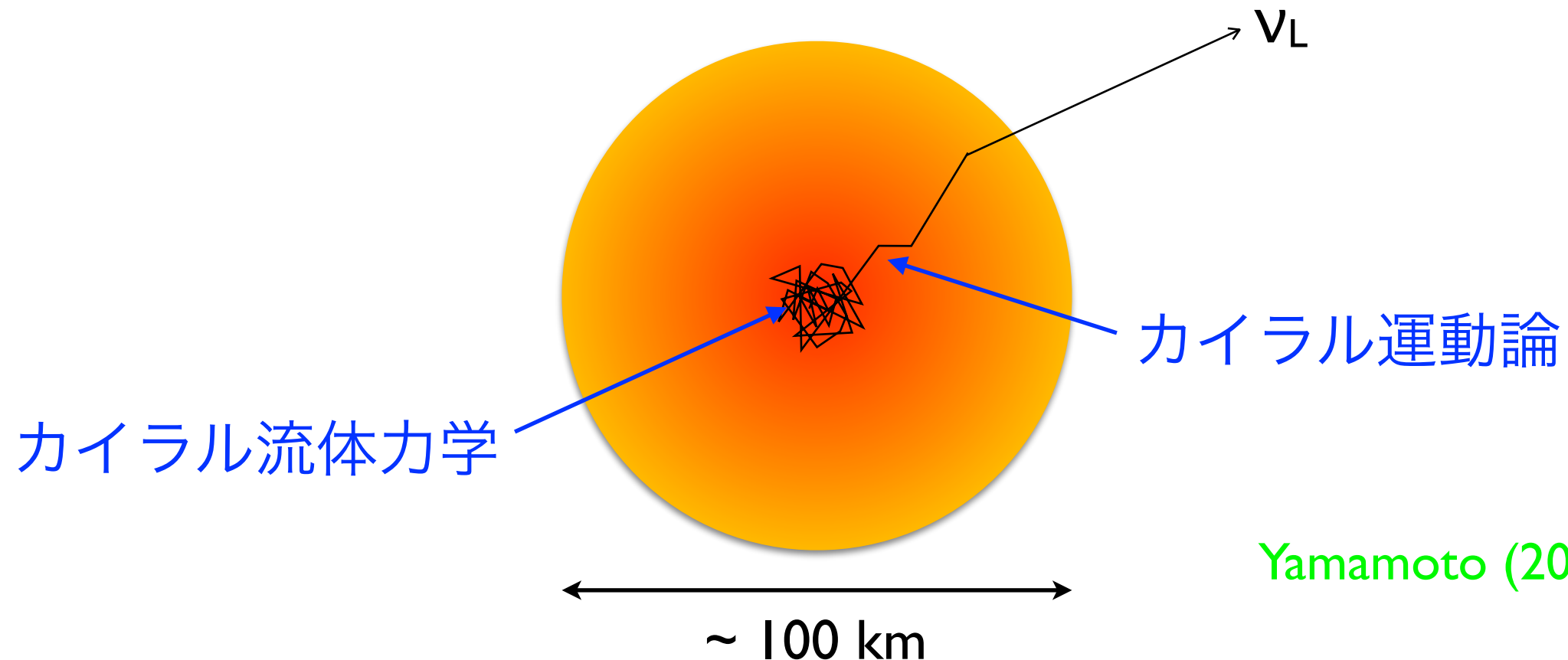
Supernova = Giant Parity Breaker



Ohnishi, Yamamoto (2014); Grabowska, Kaplan, Reddy (2015); Sigl, Leite (2016), ...

超新星のニュートリノ物質

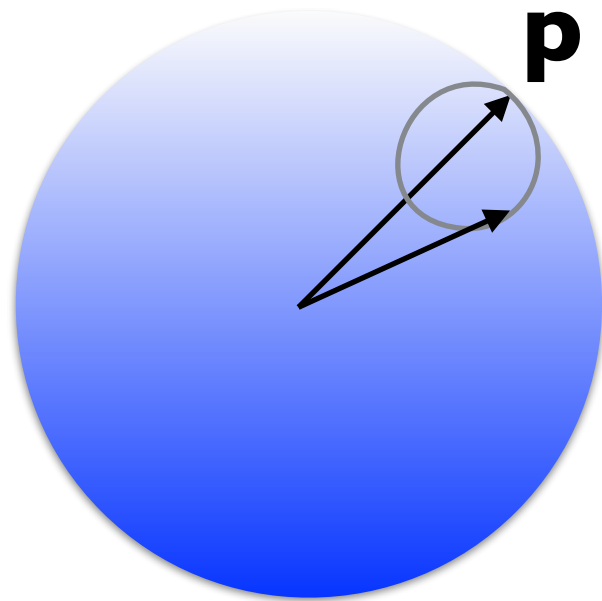
- ニュートリノ平均自由行程 $\sim$ コアで 1 cm ($\rho_N \sim 10^{15}$ g/cm³).
- ニュートリノ物質 = カイラル流体 ($\mu_\nu \sim 200$ MeV $\gg$ $T \sim 10$ MeV)
= 3次元トポロジカル物質



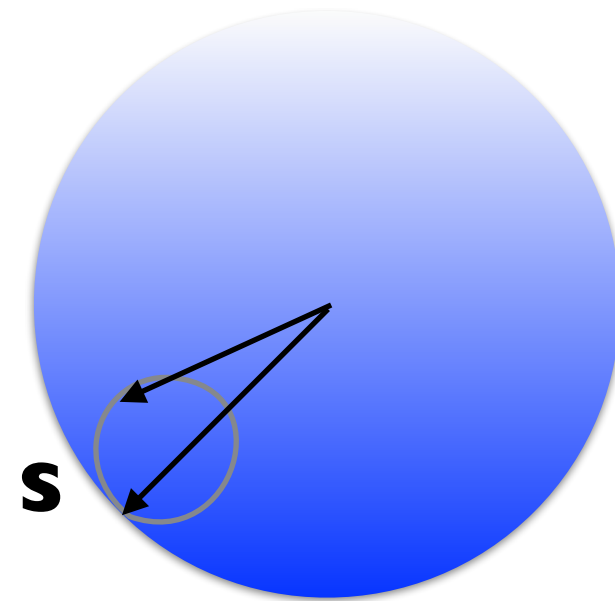
Yamamoto (2016)

カイラリティとトポロジー

左巻きフェルミオン



運動量空間



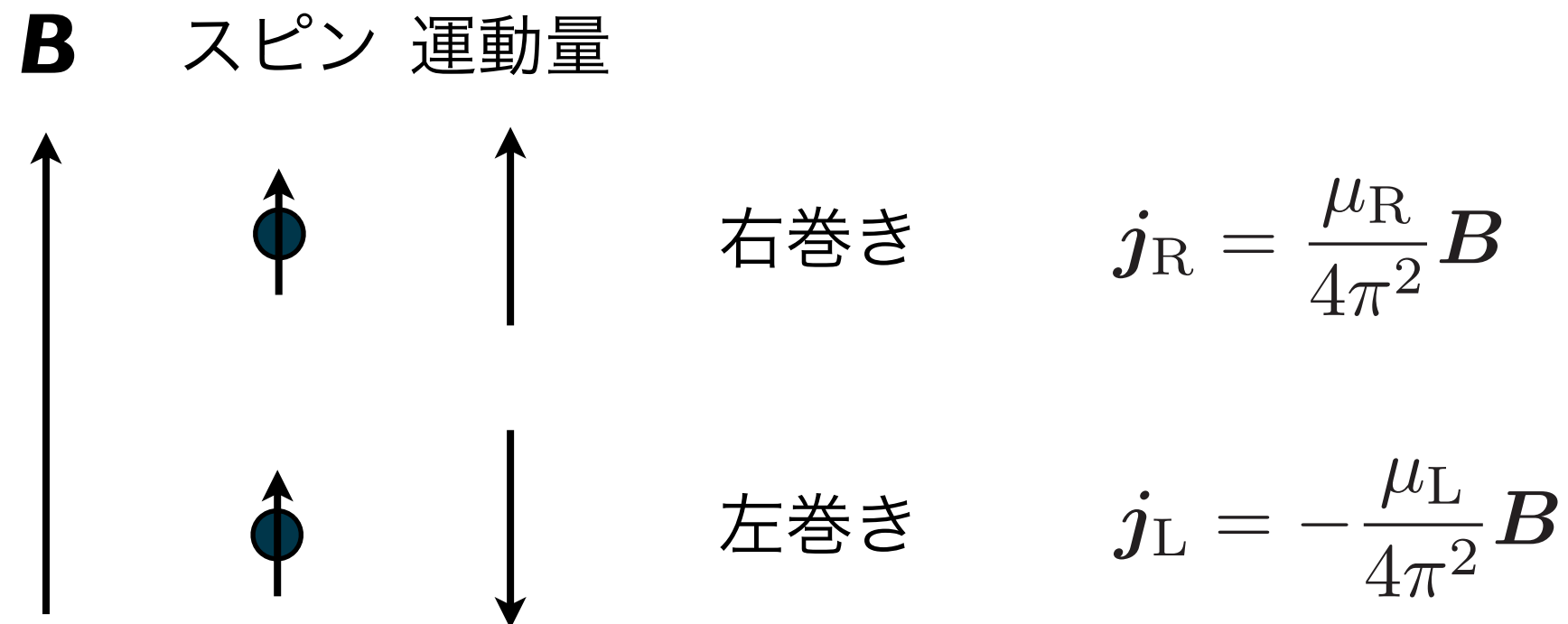
スピン空間

S^2 (運動量空間) から S^2 (スピン空間) へのmapping: 巻き数 -1

ニュートリノ物質 = 3次元トポロジカル物質

カイラル輸送現象

Chiral magnetic effect



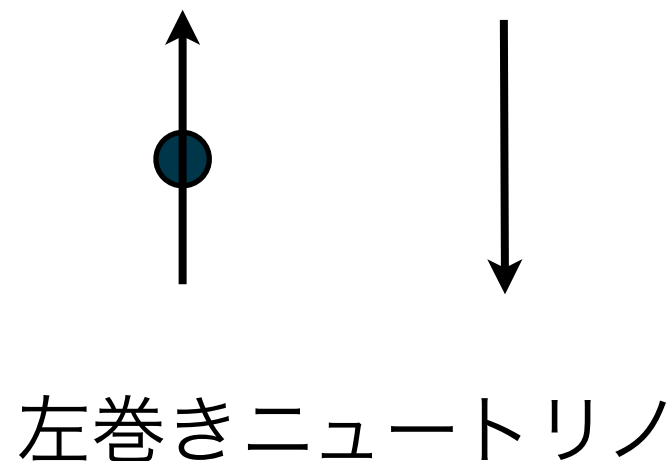
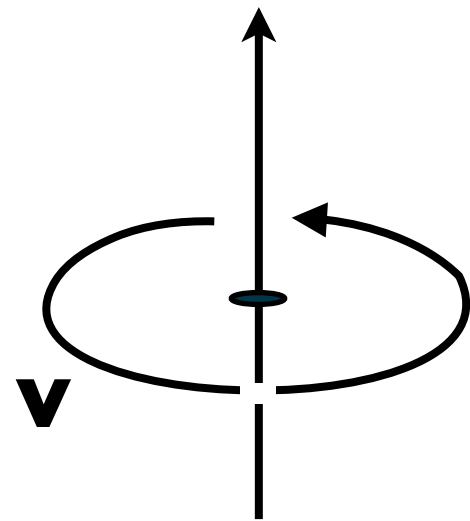
$$j_e = \frac{1}{4\pi^2} (\mu_R - \mu_L) B$$

厳密な輸送係数：場の量子論における量子異常と密接に関係

Vilenkin (1980); Nielsen, Ninomiya (1983); Fukushima, Kharzeev, Warringa (2008), ...

Chiral vortical effect

渦度 $\omega = \nabla \times v$ スピン 運動量



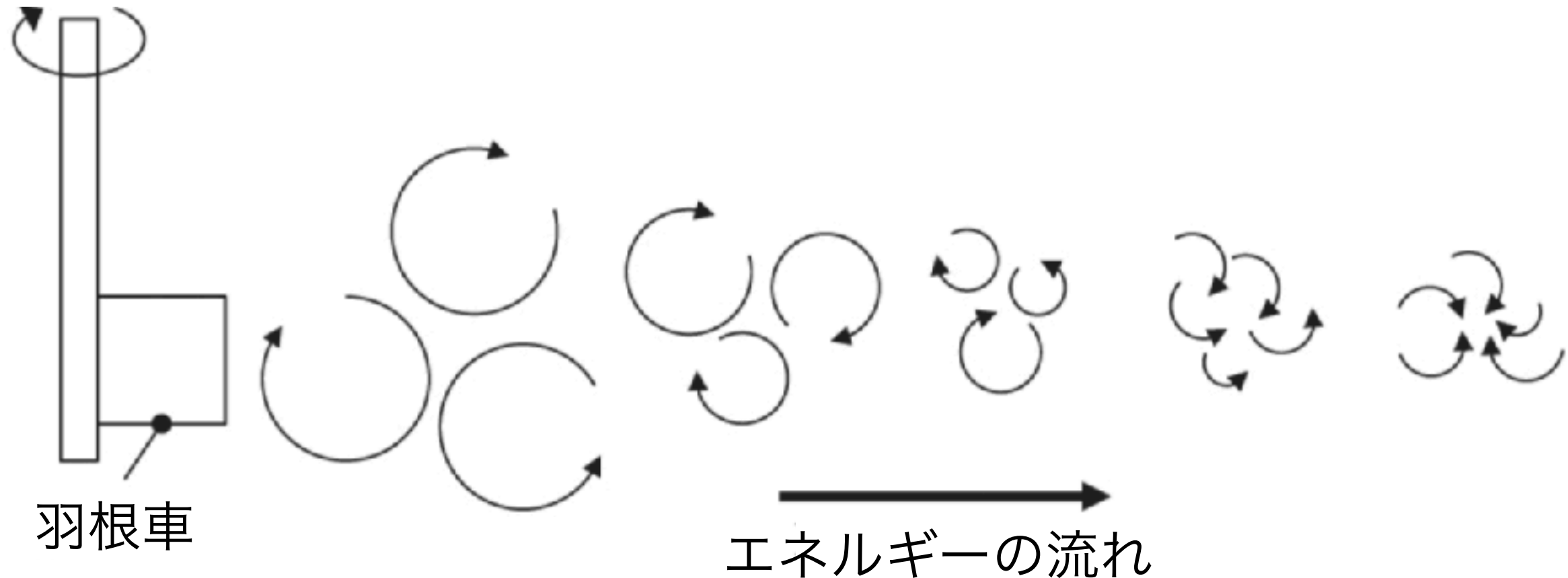
$$j = - \left(\frac{\mu^2}{8\pi^2} + \frac{T^2}{24} \right) \omega$$

従来の運動論（Boltzmann方程式）では記述できない

Vilenkin (1979); Erdmenger et al. (2009); Banerjee et al. (2011);
Son-Surowka (2009); Landsteiner et al. (2011)

超新星における カイラル電磁乱流

通常の乱流現象



<https://doi.org/10.1515/htmp-2016-0043>

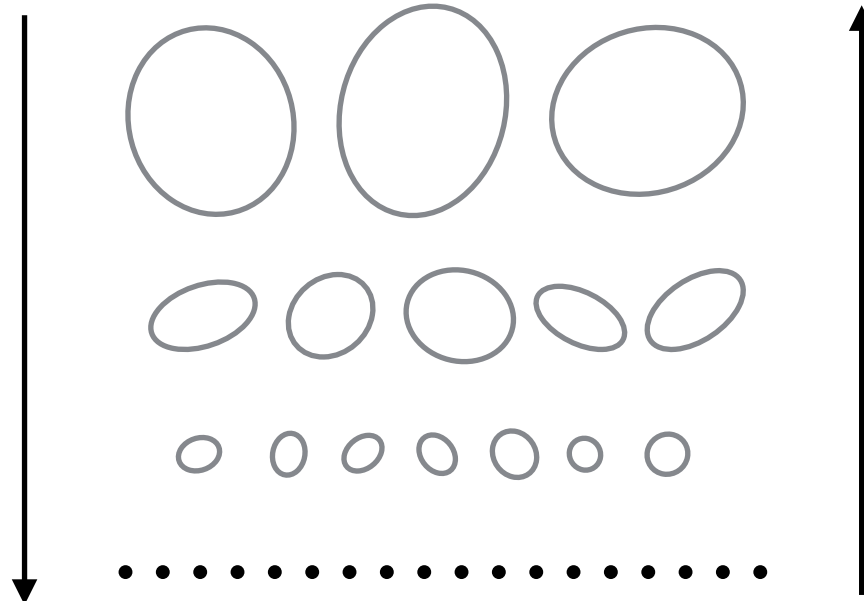
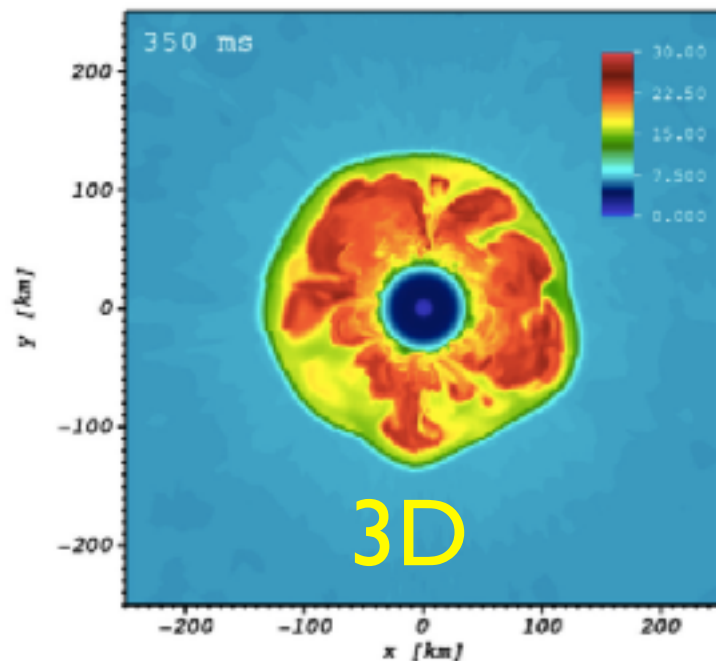
- 「構造」は小さくなって最終的に散逸（**順カスケード**）
- 電磁流体の磁場・流体の構造についても同様

乱流カスケードと爆発

順カスケード

(3D 通常の物質)

→ 爆発しにくい

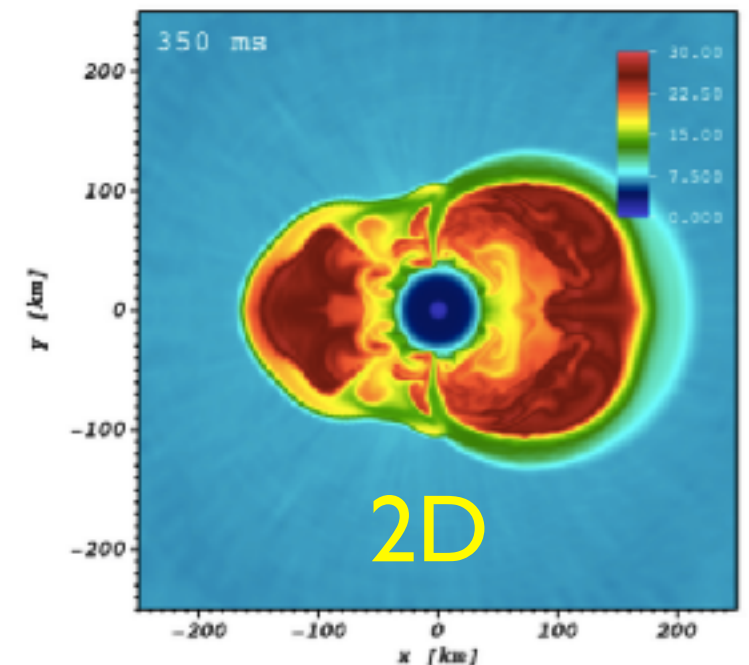


F. Hanke (2014)

逆カスケード

(2D 通常の物質)

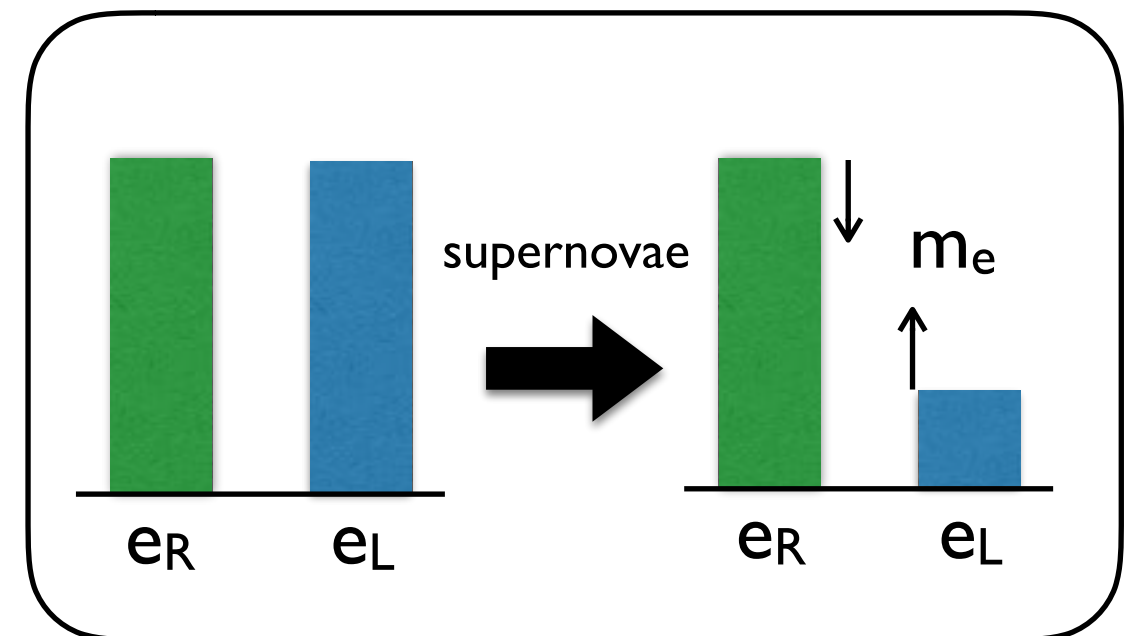
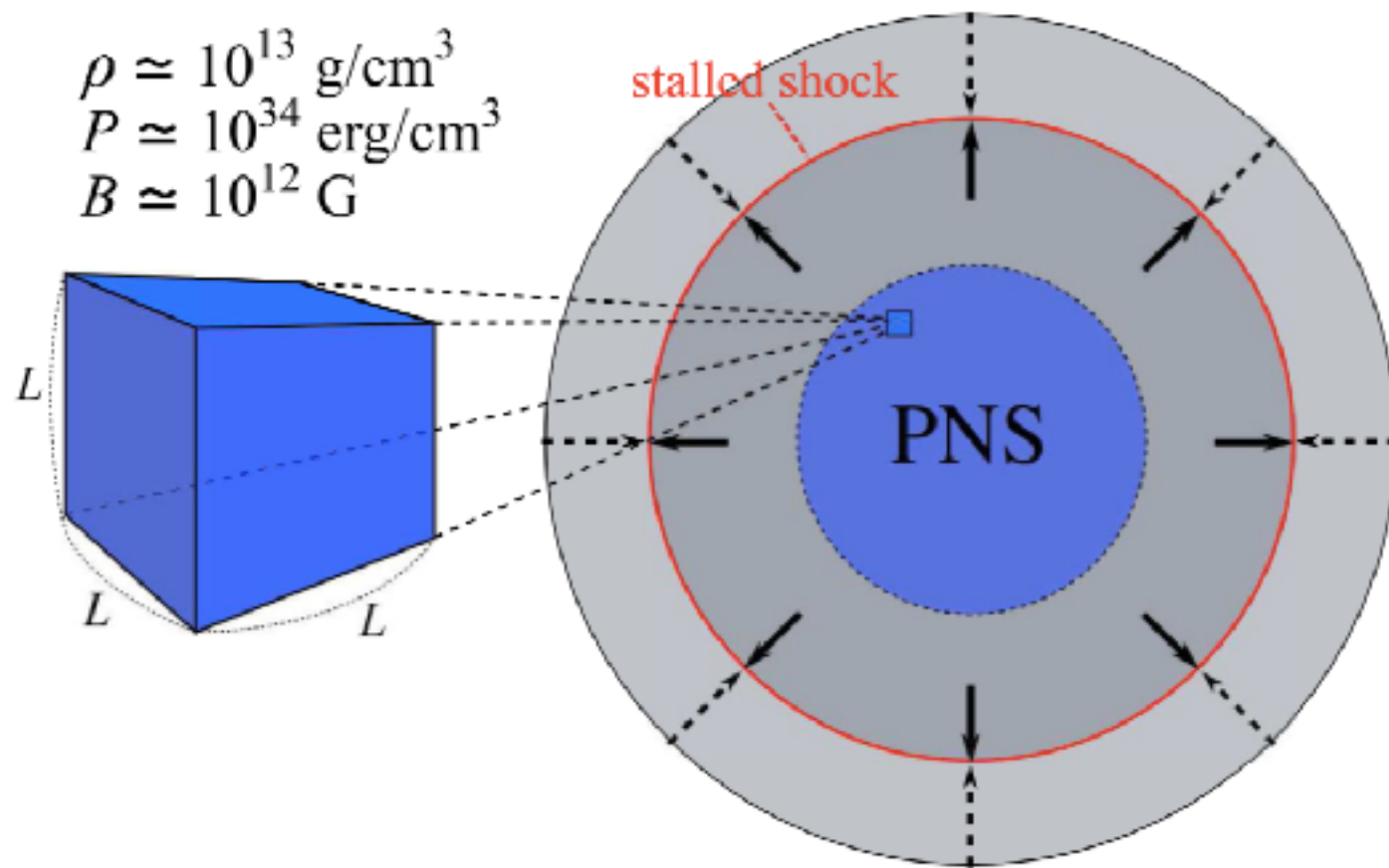
→ 爆発しやすい



3D カイラル物質ではどうか？

原始中性子星 (PNS)

Masada, Kotake, Takiwaki, Yamamoto, arXiv:1805.10419



電子のカイラル効果に着目
(ニュートリノは future work)

カイラル電磁流体力学

Masada, Kotake, Takiwaki, Yamamoto, arXiv:1805.10419

- コアにおけるカイラルMHD ($p, \mathbf{e}_R, \mathbf{e}_L$):

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\partial_t (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + (\text{散逸項})$$

$$\partial_t \mathbf{B} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B} + \eta \nabla \times \underbrace{(\xi_B \mathbf{B})}_{\text{CME}}$$

$$\partial_t n_5 = \underbrace{\frac{\eta}{2\pi^2} (\nabla \times \mathbf{B} - \xi_B \mathbf{B}) \cdot \mathbf{B}}_{\text{量子異常}}$$

- Setup (100 MeV = 1):

$$\rho_0 = 5.0, \quad P_0 = 1.0, \quad M = 10.0, \quad \xi_{B0} = 4 \times 10^{-3}, \quad \eta = 100$$

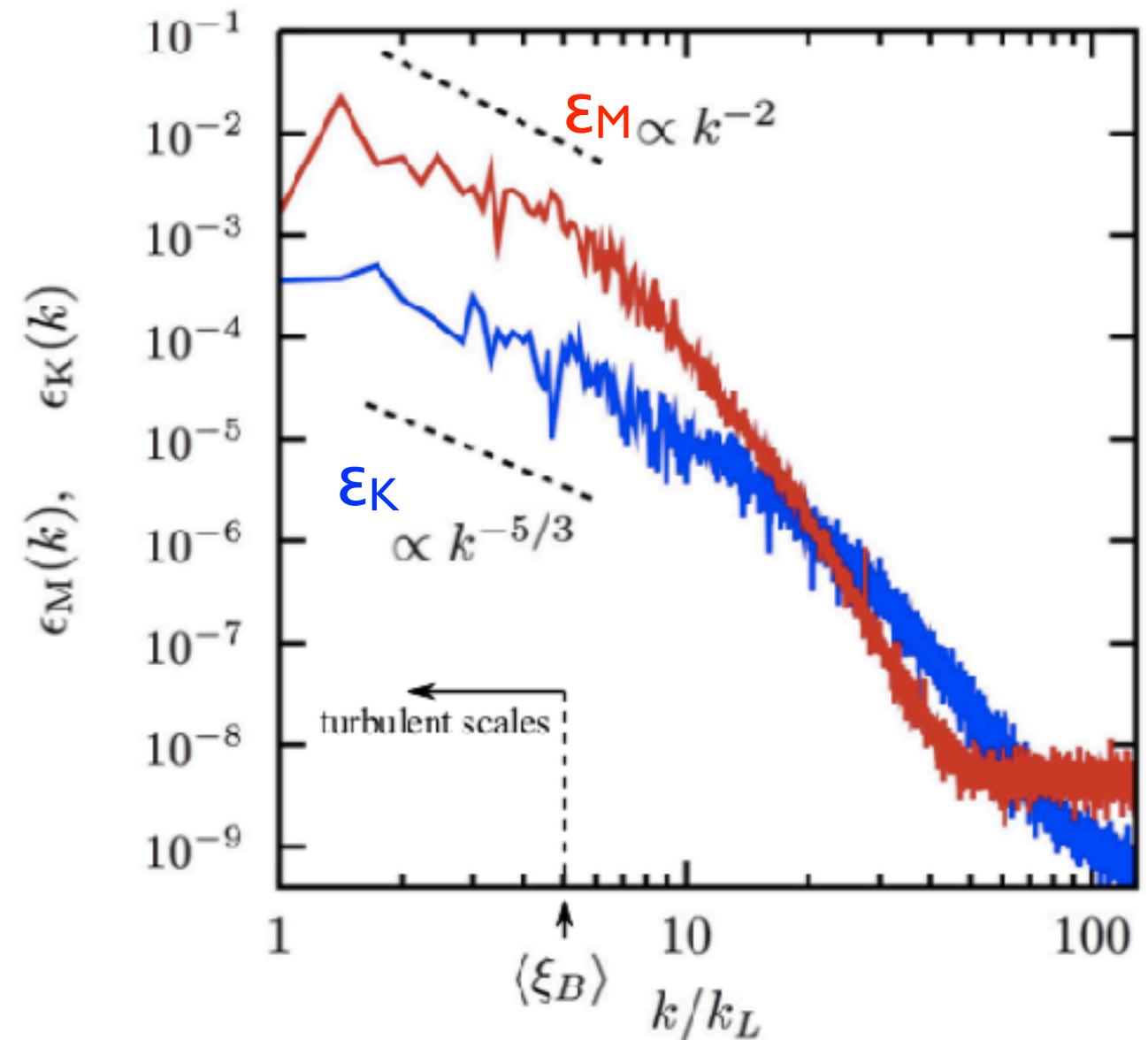
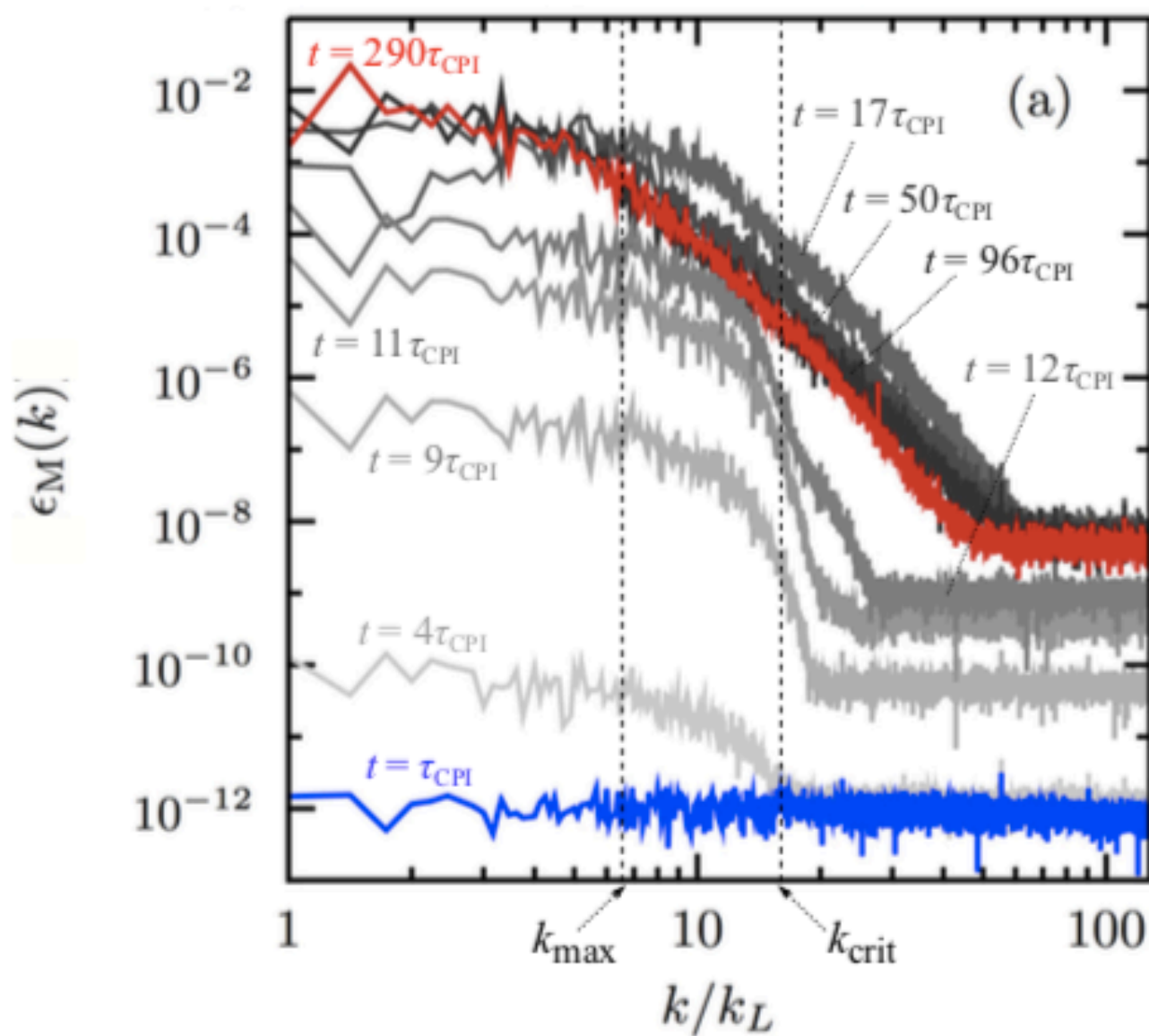
(原始中性子星コアを想定)

Movies of 3D simulations are available at:
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~masada/movie.mp4>

Masada, Kotake, Takiwaki, Yamamoto, arXiv:1805.10419

エネルギースペクトル

Masada et al., arXiv:1805.10419; see also Brandenburg et al., arXiv:1707.03385



ミクロな素粒子のカイラリティ → 逆カスケード → 爆発しやすくなる

Inverse Energy Cascade in Three-Dimensional Isotropic Turbulence

Luca Biferale,¹ Stefano Musacchio,² and Federico Toschi³

¹*Department of Physics & INFN, Università Tor Vergata, Via della Ricerca Scientifica 1, 00133 Rome, Italy*

²*CNRS, Laboratoire J. A. Dieudonné UMR 7351, Parc Valrose, 06108 Nice, France*

³*Department of Physics and Department of Mathematics and Computer Science, Eindhoven University of Technology, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands & CNR-IAC, Via dei Taurini 19, 00185 Rome, Italy*

(Received 2 November 2011; published 20 April 2012)

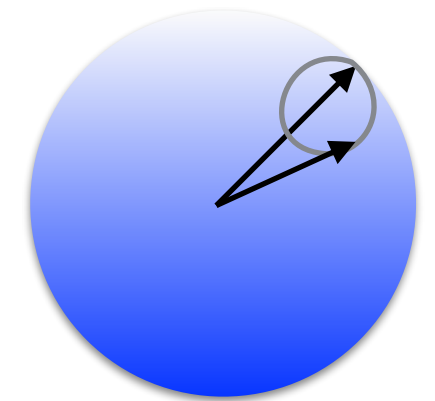
We study the statistical properties of homogeneous and isotropic three-dimensional (3D) turbulent flows. By introducing a novel way to make numerical investigations of Navier-Stokes equations, we show that all 3D flows in nature possess a subset of nonlinear evolution leading to a reverse energy transfer: from small to large scales. Up to now, such an inverse cascade was only observed in flows under strong rotation and in quasi-two-dimensional geometries under strong confinement. We show here that energy flux is always reversed when mirror symmetry is broken, leading to a distribution of helicity in the system with a well-defined sign at all wave numbers. Our findings broaden the range of flows where the inverse energy cascade may be detected and rationalize the role played by helicity in the energy transfer process, showing that both 2D and 3D properties naturally coexist in all flows in nature. The unconventional numerical methodology here proposed, based on a Galerkin decimation of helical Fourier modes, paves the road for future studies on the influence of helicity on small-scale intermittency and the nature of the nonlinear interaction in magnetohydrodynamics.

3D Navier-Stokes方程式 (非圧縮) でもパリティを破ると逆カスケード

カイラル輻射流体力学 に向けて

トポロジーとBerry曲率

- $\pi_2(S^2)=\pm 1 \rightarrow \mathbf{p}=\mathbf{0}$ でのモノポール
- モノポール“磁場” = Berry曲率 $\Omega_p = \pm \frac{p}{2|p|^3}$
- Ω_p は運動方程式・輸送理論を補正



ニュートリノのBerry曲率が非平衡ダイナミクスに重要
(カイラル運動論)

Son, Yamamoto (2012); Stephanov, Yin (2012), ...

ニュートリノ輸送

- カレント: $j = \int_p (\hat{p} f - |\mathbf{p}| \boldsymbol{\Omega}_p \times \nabla_x f)$
- エネルギー運動量テンソル:
$$T^{ij} = \int_p |\mathbf{p}| \left(\hat{p}^i \hat{p}^j f - \frac{1}{2} p^i \epsilon^{jkl} \Omega_p^k \partial_l f - \frac{1}{2} p^j \epsilon^{ikl} \Omega_p^k \partial_l f \right)$$

$\boldsymbol{\Omega}_p = -\frac{\mathbf{p}}{2|\mathbf{p}|^3}$: ニュートリノ Berry 曲率

Son-NY, PRD (2013); Chen-Son-Stephanov, PRL (2015)

Neutrino **chiral** radiation hydro

Yamamoto, work in progress

$$\nabla_{\alpha} (T_{\text{hyd}}^{\alpha\beta} + T_{\nu}^{\alpha\beta}) = 0$$

原子核・電子
(流体力学)

ニュートリノ
(カイラル運動論)

Conclusion

ミクロ

素粒子・弱い力の謎
(素粒子物理)

マクロ

超新星爆発の謎
(宇宙物理)

新奇的な乱流現象

トポロジカル輸送現象
(物性物理)

素粒子標準理論の予言する新しい非平衡量子多体現象
= 素核・物性・宇宙のクロスオーバー