

弱い力のパリティの破れと 超新星・中性子星の物理

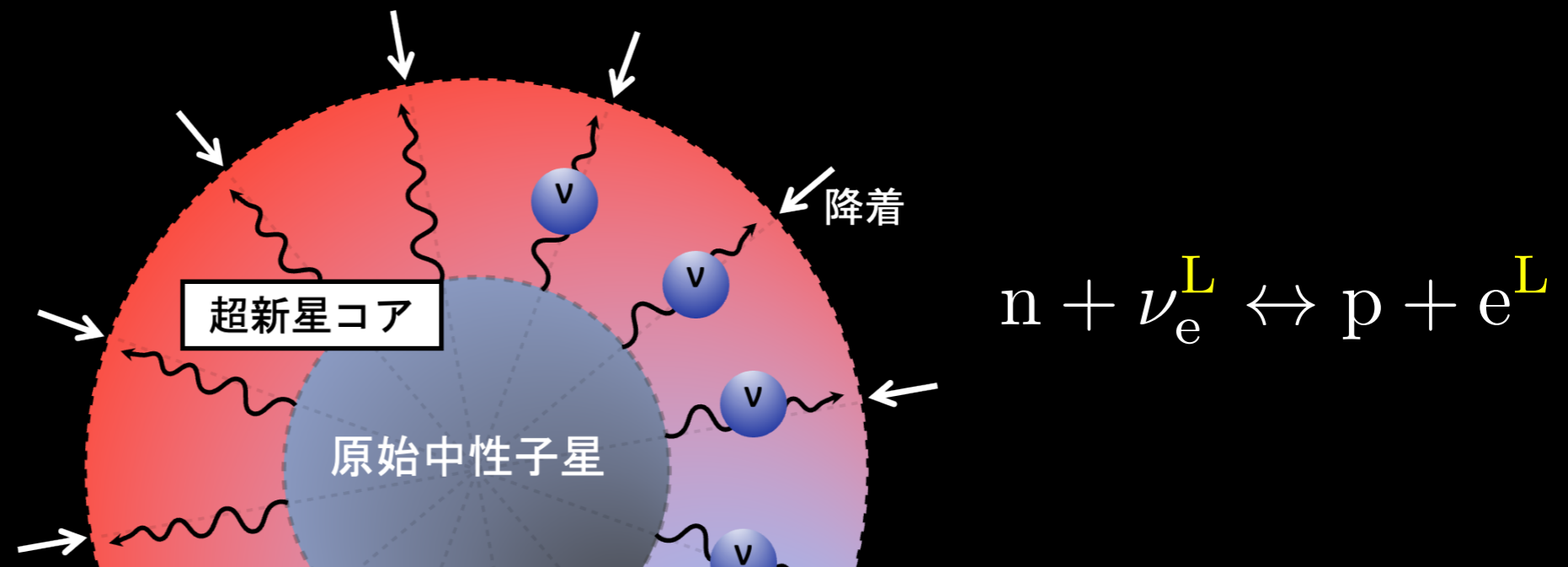
山本 直希 (慶應義塾大学)

～中性子星の観測と理論～

研究活性化ワークショップ 2023

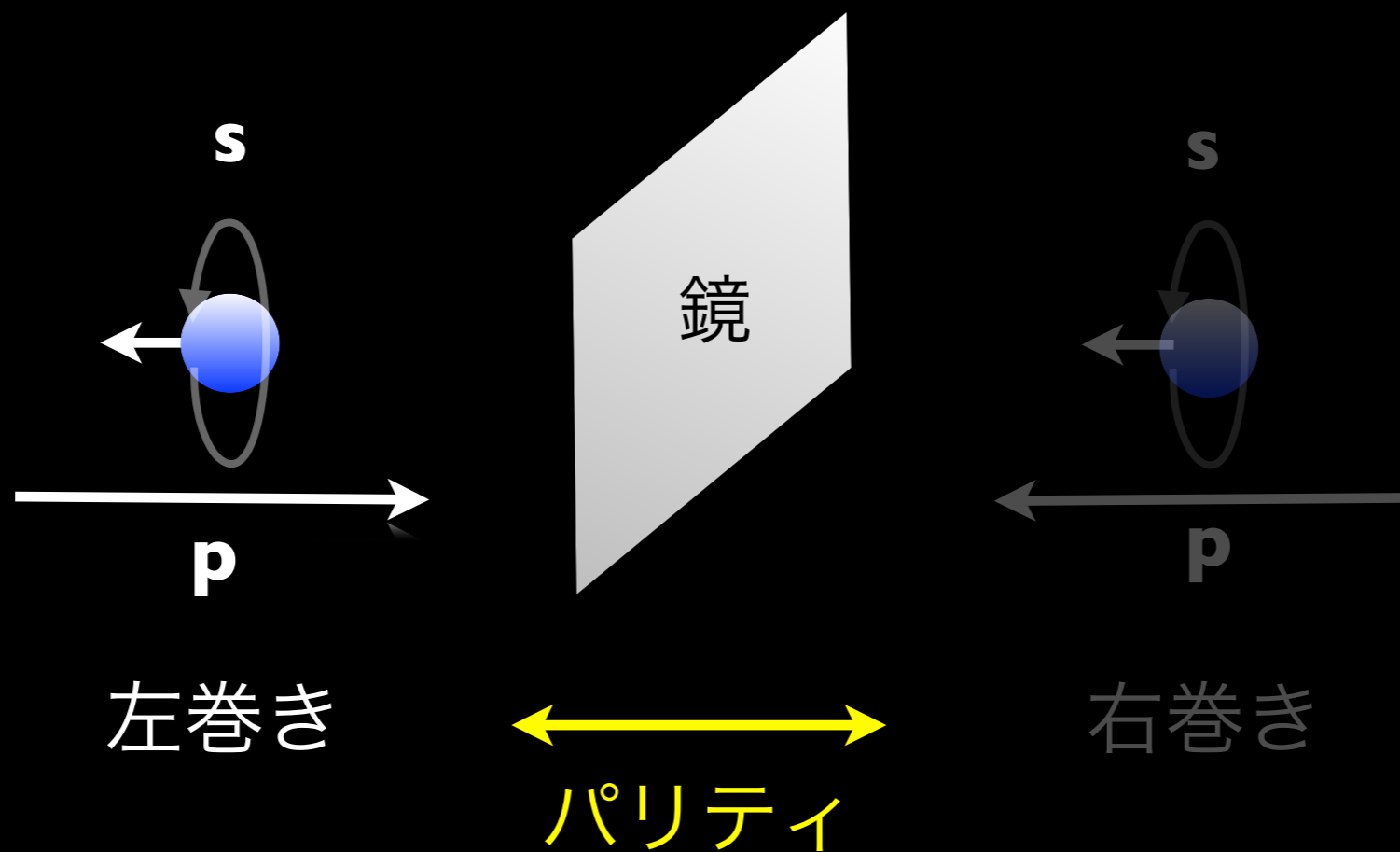
Main message

- 超新星爆発から中性子星形成に至る鍵：ニュートリノ加熱
- 素過程は素粒子標準理論の弱い力
- 従来の超新星の理論は弱い力の重要な性質を無視：
パリティ対称性の破れ
- 本来あるべきこの効果は物質の時間発展を質的に変える



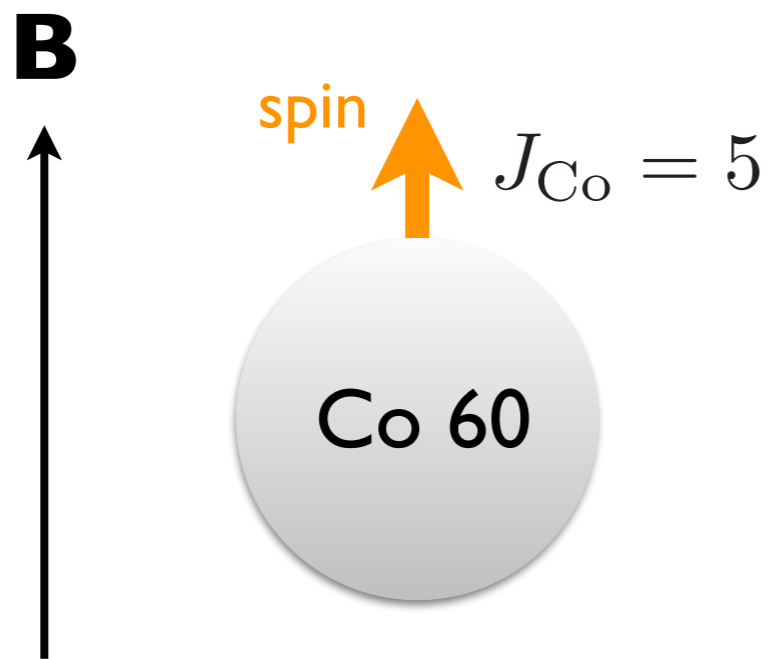
弱い力とパリティの破れ

カイラリティ



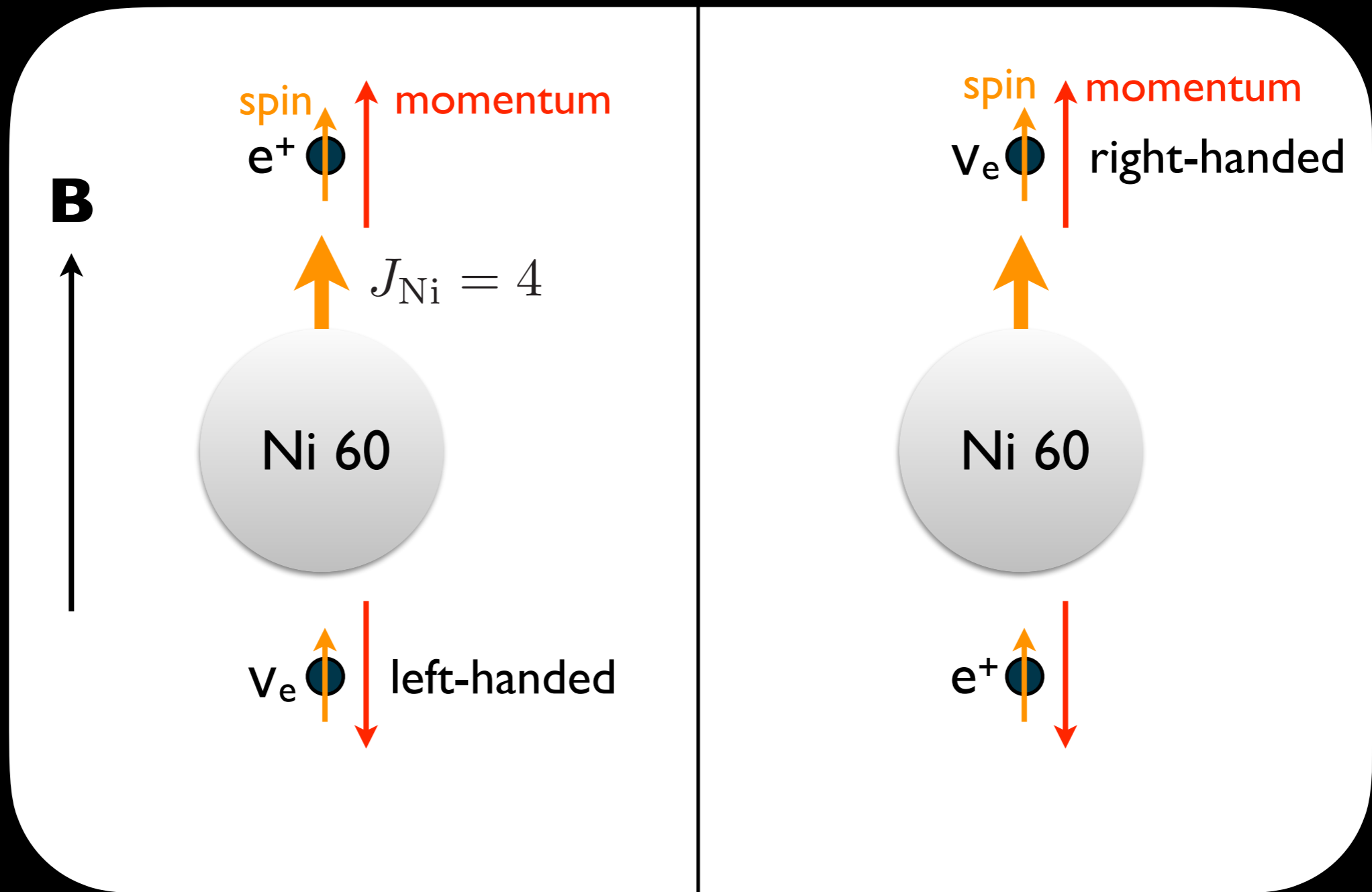
弱い力はパリティを**100%**破る

Wu experiment



Chien-Shiung Wu

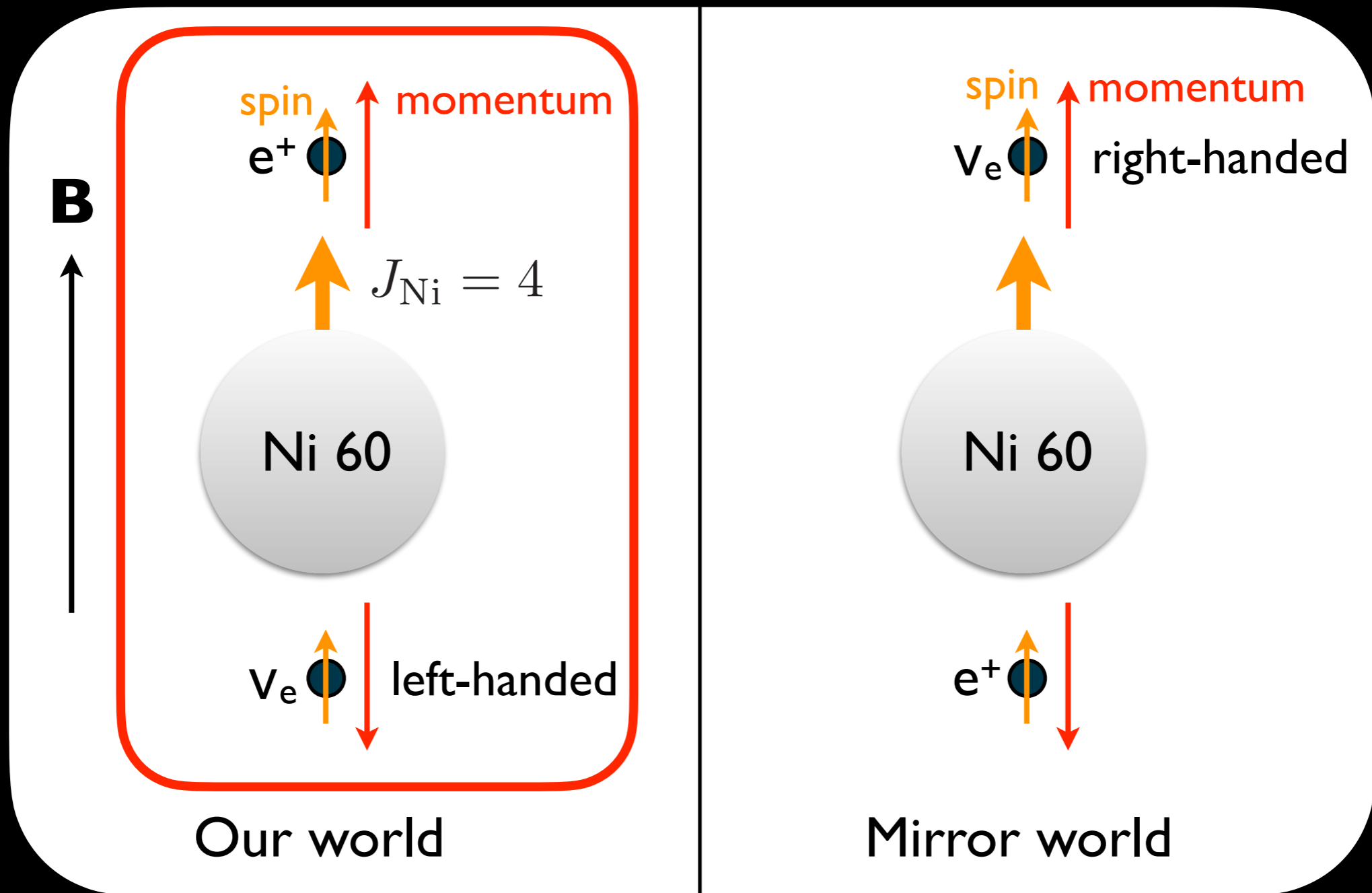
Wu experiment



$$5 = 4 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$$

Wu et al., (1957)

Wu experiment



「神」は左利き？

- 物理法則は（ほぼ）左右対称
- 唯一の例外：弱い力は左巻きの粒子だけに働く



W. Pauli

“God is just a **weak left-hander.**”

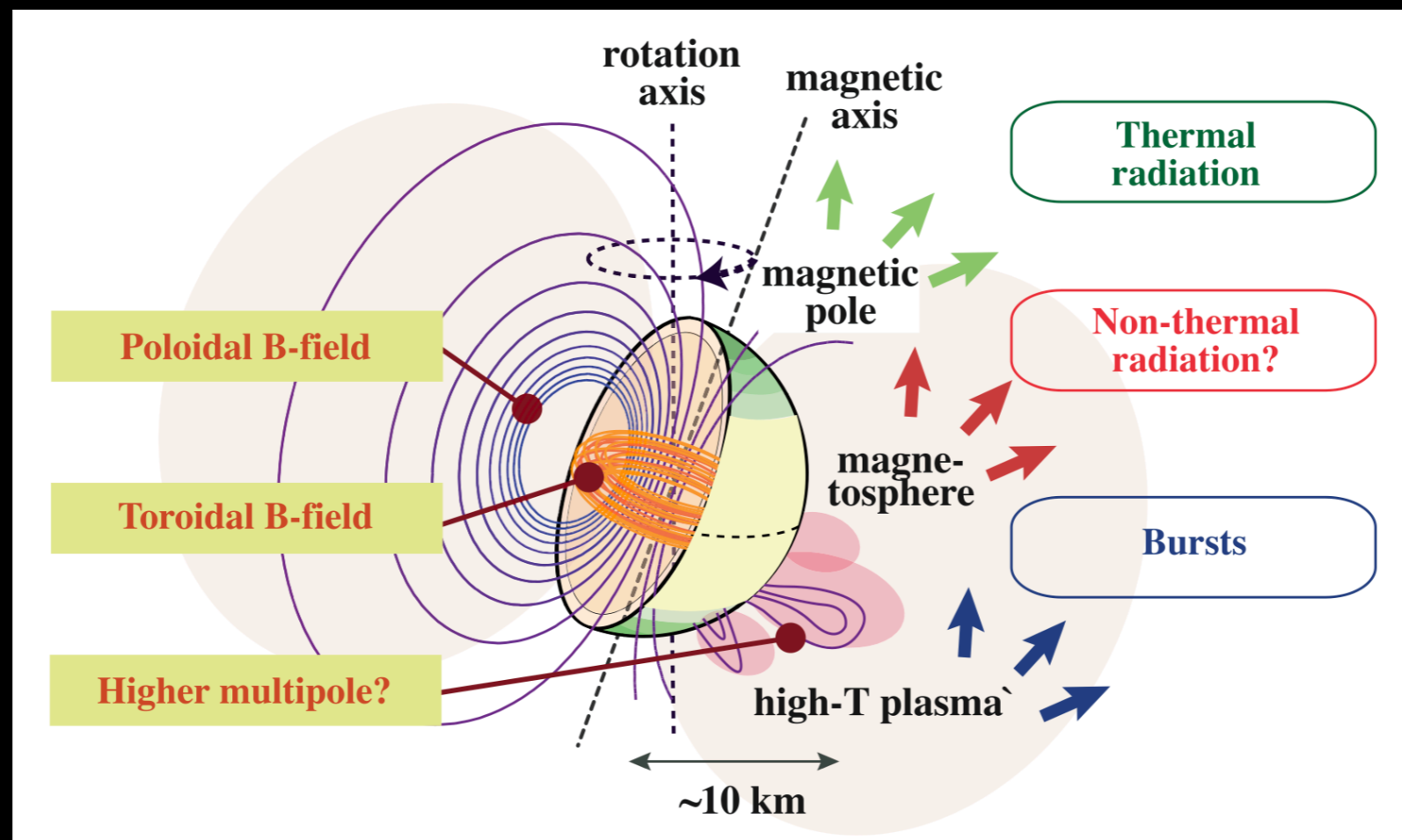




重力崩壊型超新星・
中性子星・マグネター

中性子星・マグネターー磁場

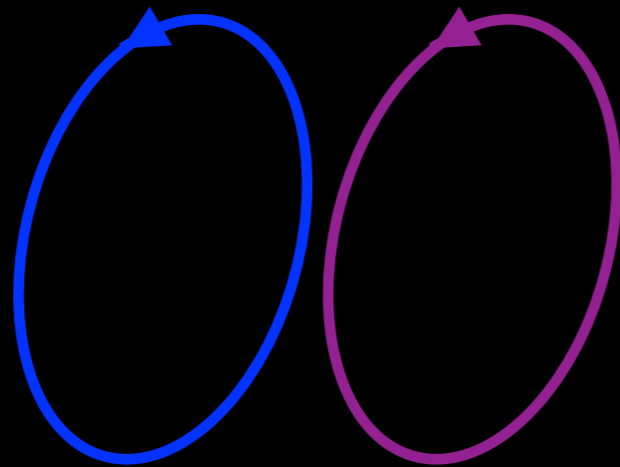
- 表面磁場は強いもので $\sim 10^{15}$ G
- このような強くて安定な磁場の起源？
(純粋な poloidal or toroidal 磁場は不安定)



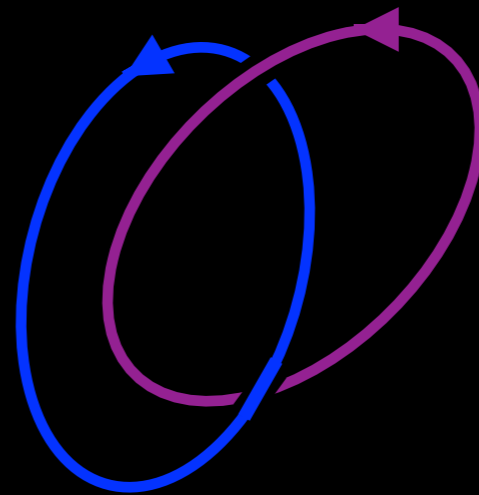
磁気ヘリシティ

- $\mathcal{H} = \int d^3x \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$: 磁場の絡み目 (トポロジカルな安定性)

$\mathcal{H} = 0$

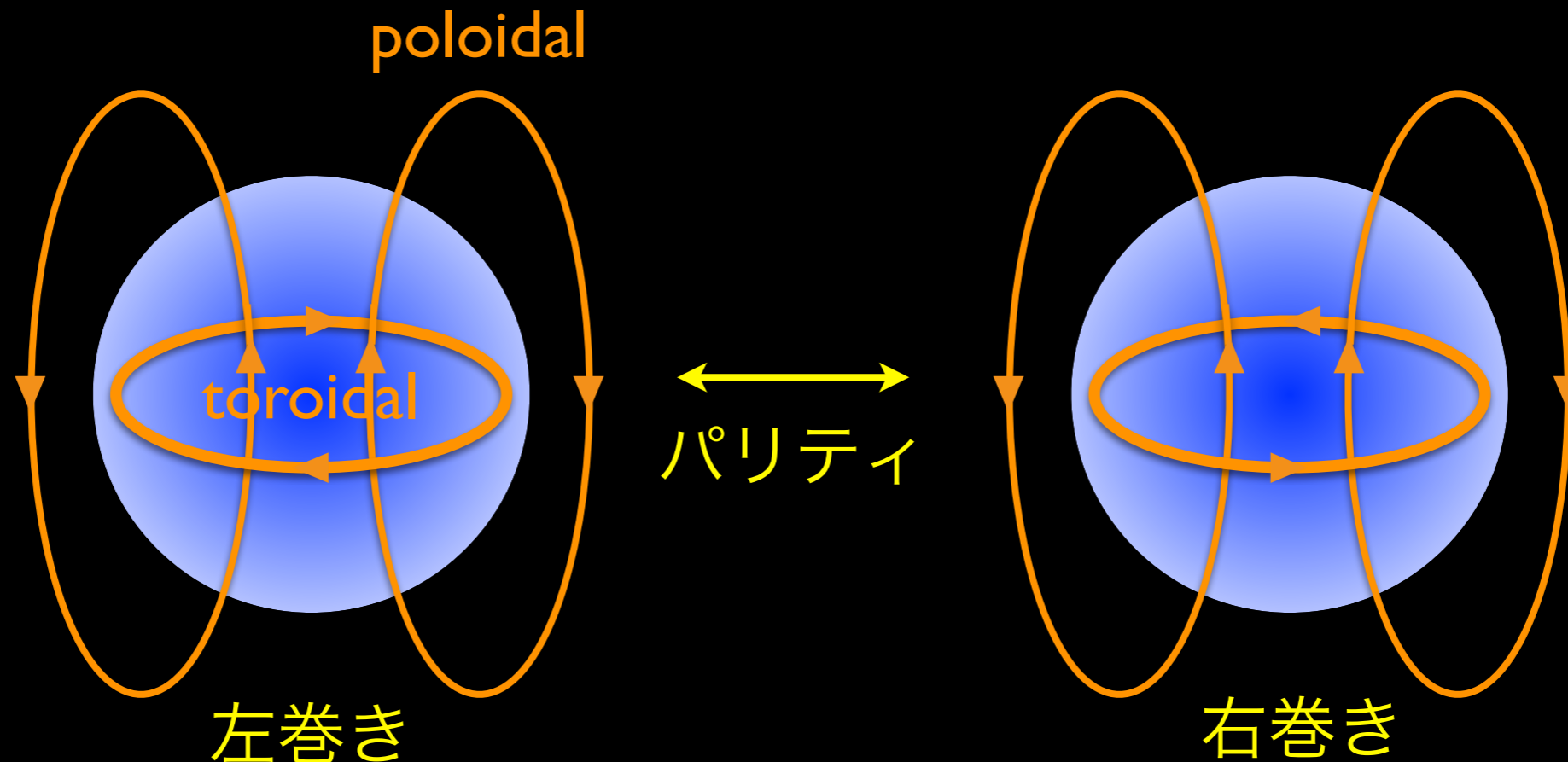


$\mathcal{H} \neq 0$



磁気ヘリシティ

- $\mathcal{H} = \int d^3x A \cdot B$: 磁場の絡み目 (トポロジカルな安定性)
- 通常MHDの初期条件として仮定されるが、その起源は?
(大域的な \mathcal{H} はパリティ奇)



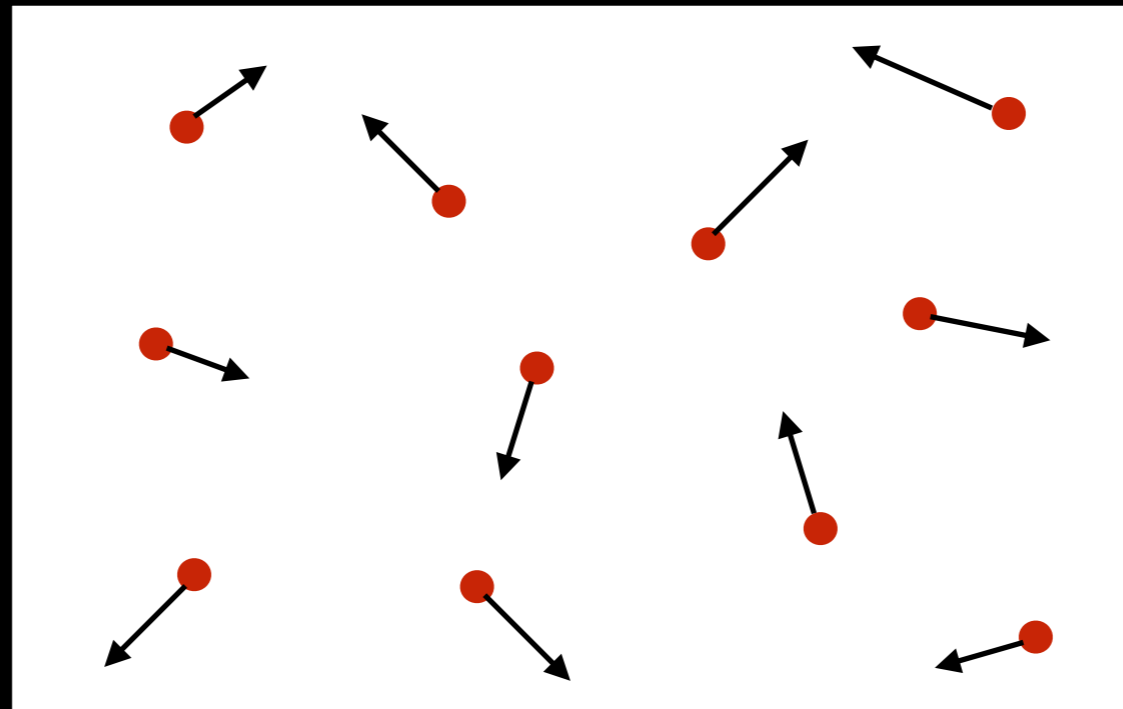
超新星の理論

超新星の時間発展を解く

- 超新星 = ニュートリノ・電子・核子の量子多体系
- ミクロな素粒子の標準理論を解くのは practical には不可能
- 代わりに粗視化した理論を考える
(例) 空気の流体力学：分子のダイナミクスは不要
- ニュートリノは非平衡：運動論 (Boltzmann方程式) を解く

運動論とは？

- 非平衡時間発展を記述する理論



分布関数
 $f = f(t, \mathbf{x}, \mathbf{p})$

- 従来の中性粒子に対する Boltzmann 方程式

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} = C[f]$$

衝突項

流体力学・運動論 = 有効理論

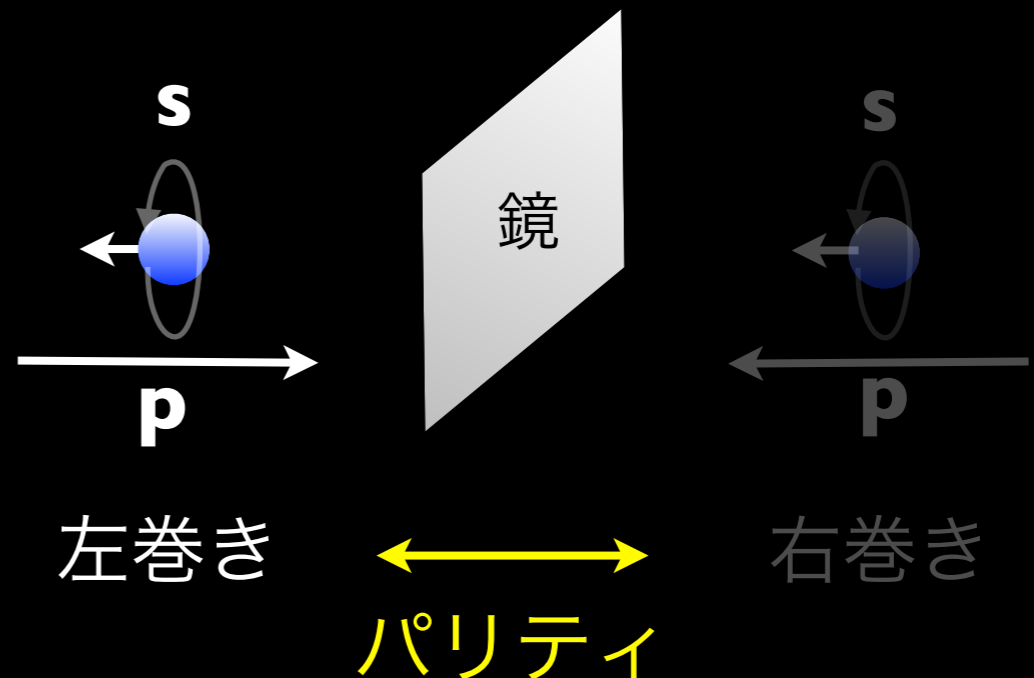
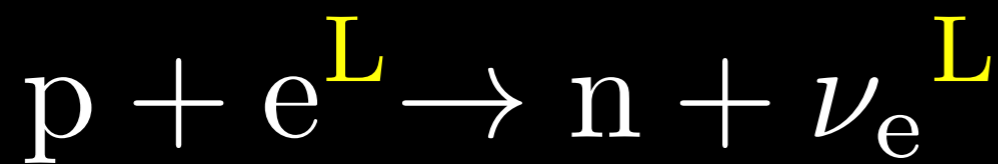
- 現代的には系の対称性と系統的な展開に基づく有効理論
(例) 流体力学: (平均自由行程)/(典型的なスケール) $\ll 1$ で展開
- 対称性に基づいて理論を書き下す (top-down approach)
- ミクロな理論を適切に粗視化して導出 (bottom-up approach)
- 理論は対称性で分類される (例) 常流動・超流動の流体力学

物理の理論は全て対称性に基づく有効理論

従来 of 理論の問題

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \boldsymbol{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{x}} = C[f]$$

- 弱い力のパリティ（空間反転）対称性の破れを無視
→ 対称性に基づく有効理論の教義に反する



Bottom-up approach

ミクロ

素粒子の標準理論



パリティの破れを含む有効理論 (Boltzmann 方程式)



マクロ

超新星の流体力学的な時間発展

カイラル輻射輸送理論

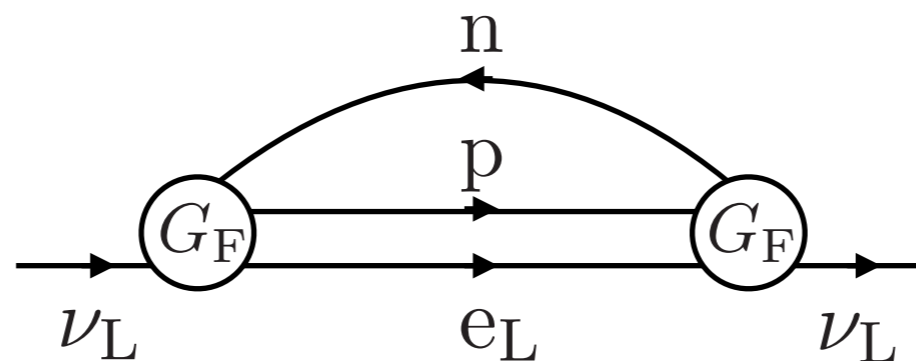
Yamamoto, Yang, ApJ (2020)

素粒子の標準理論 + 非平衡場の理論 + 一般相対論

$$\left[q^\mu D_\mu - (D_\mu S^{\mu\nu}) \partial_\nu + S^{\mu\nu} q^\rho R_{\rho\mu\nu}^\lambda \partial_{q\lambda} \right] f = (1-f) \overset{\text{放出}}{\Gamma^<} - f \overset{\text{吸収}}{\Gamma^>}$$

$$D_\mu = \nabla_\mu - \Gamma_{\mu\nu}^\lambda q^\nu \partial_{q\lambda}, \quad \Gamma_{\mu\nu}^\lambda = (q^\nu - D_\mu S^{\mu\nu}) \Sigma_{\nu}^{\lambda}, \quad S^{\mu\nu} = \frac{\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} q_\alpha n_\beta}{2q \cdot n}$$

ニュートリノ自己エネルギー

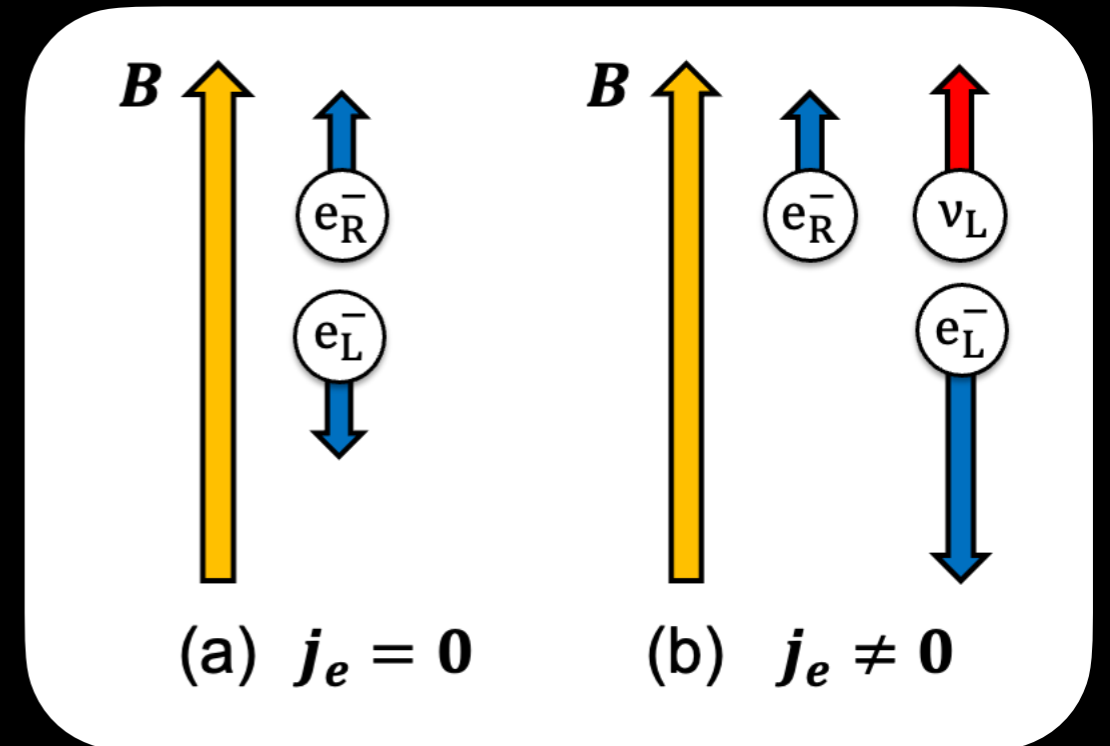


カイラル電流

$$\mathbf{j}_e = \xi_B \mathbf{B}$$

ニュートリノからの backreaction による

※ カイラル磁気効果とは異なる
(左右の電子数の差は不要)



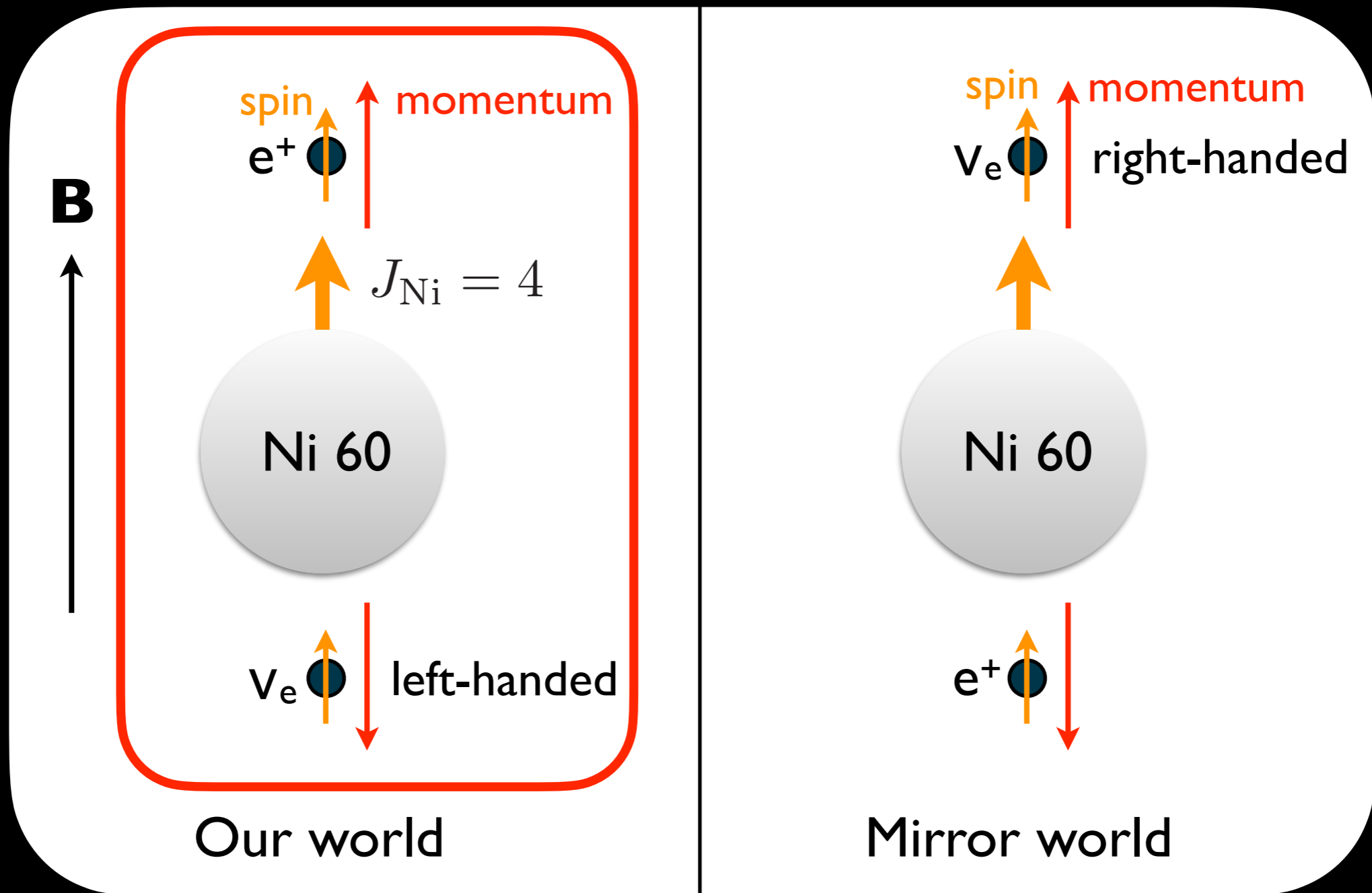
Yamamoto, Yang, PRL (2023)

$$\xi_B = \frac{1}{4\pi^3} (g_V^2 + 3g_A^2) G_F^2 (n_p - n_n) t \int_0^\infty p^2 dp \left[\frac{\bar{f}_e (1 - f_\nu)}{1 - e^{\beta(\mu_n - \mu_p)}} + \frac{(1 - \bar{f}_e) f_\nu}{1 - e^{\beta(\mu_p - \mu_n)}} \right] + (\text{antiparticle's})$$

ゲイン領域で $|\xi_B| \sim 0.1-1 \text{ MeV}$

$$Y_e \simeq 0.4, \quad \rho \sim 10^{10} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}, \quad T \sim 10^{11} \text{ K}, \quad \mu_n - \mu_p \simeq 3 \text{ MeV}, \quad t \sim 0.1 \text{ s}$$

Wu experiment



$J_{e,\nu} \propto B$: パリティの破れの非平衡多体系での帰結

カイラル磁気流体の性質

Local simulation for supernovae

Masada et al., PRD (2018); Matsumoto et al, PRD (2022)

Chiral magnetohydrodynamic (MHD) equations

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

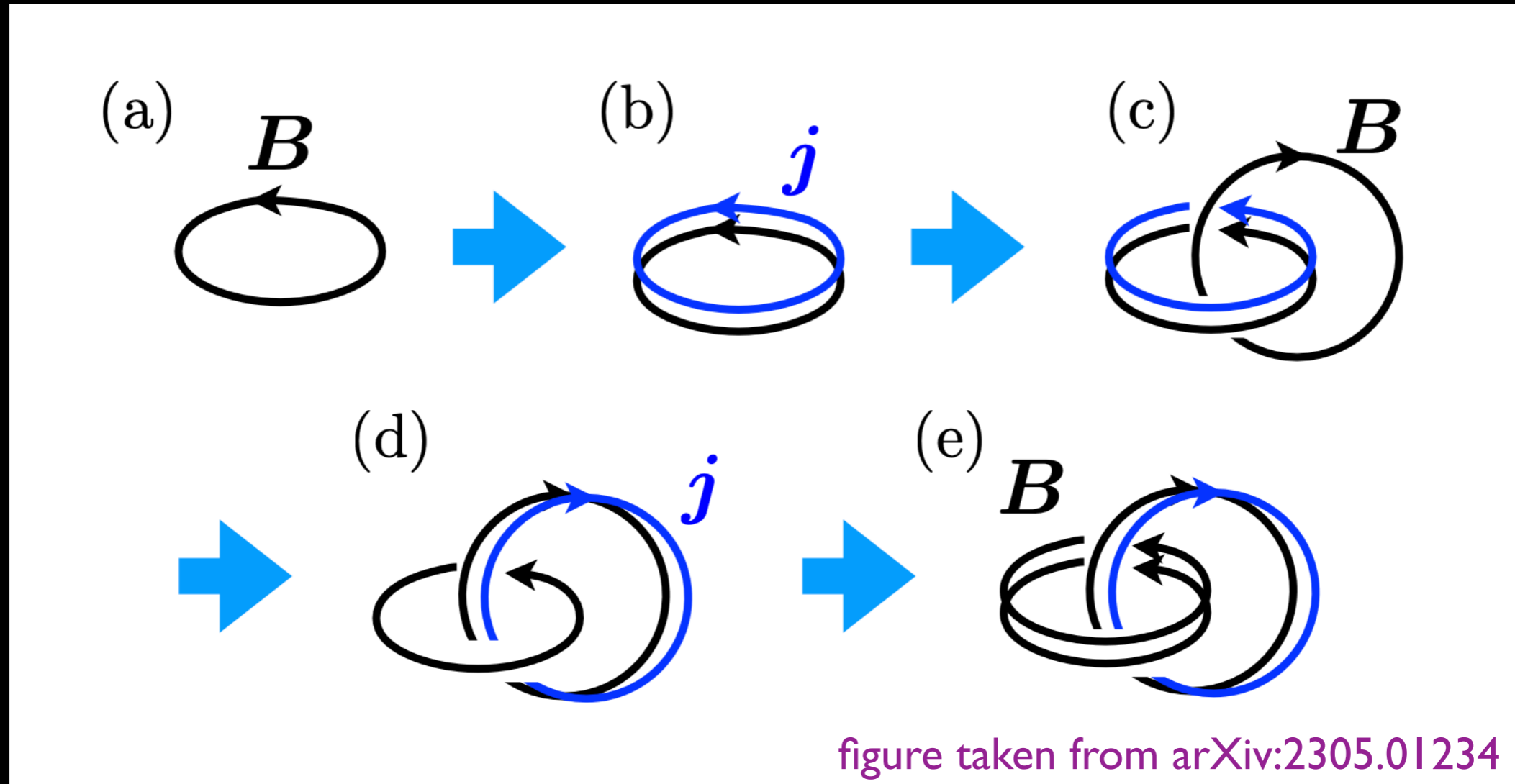
$$\partial_t (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + (\text{dissipation})$$

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

$$\partial_t \mathcal{H}(\xi_B) = \frac{\eta}{2\pi^2} (\nabla \times \mathbf{B} - \xi_B \mathbf{B}) \cdot \mathbf{B}$$

see also Rogachevskii et al. (2017), Brandenburg et al. (2017), Schober et al. (2018)

Chiral plasma instability

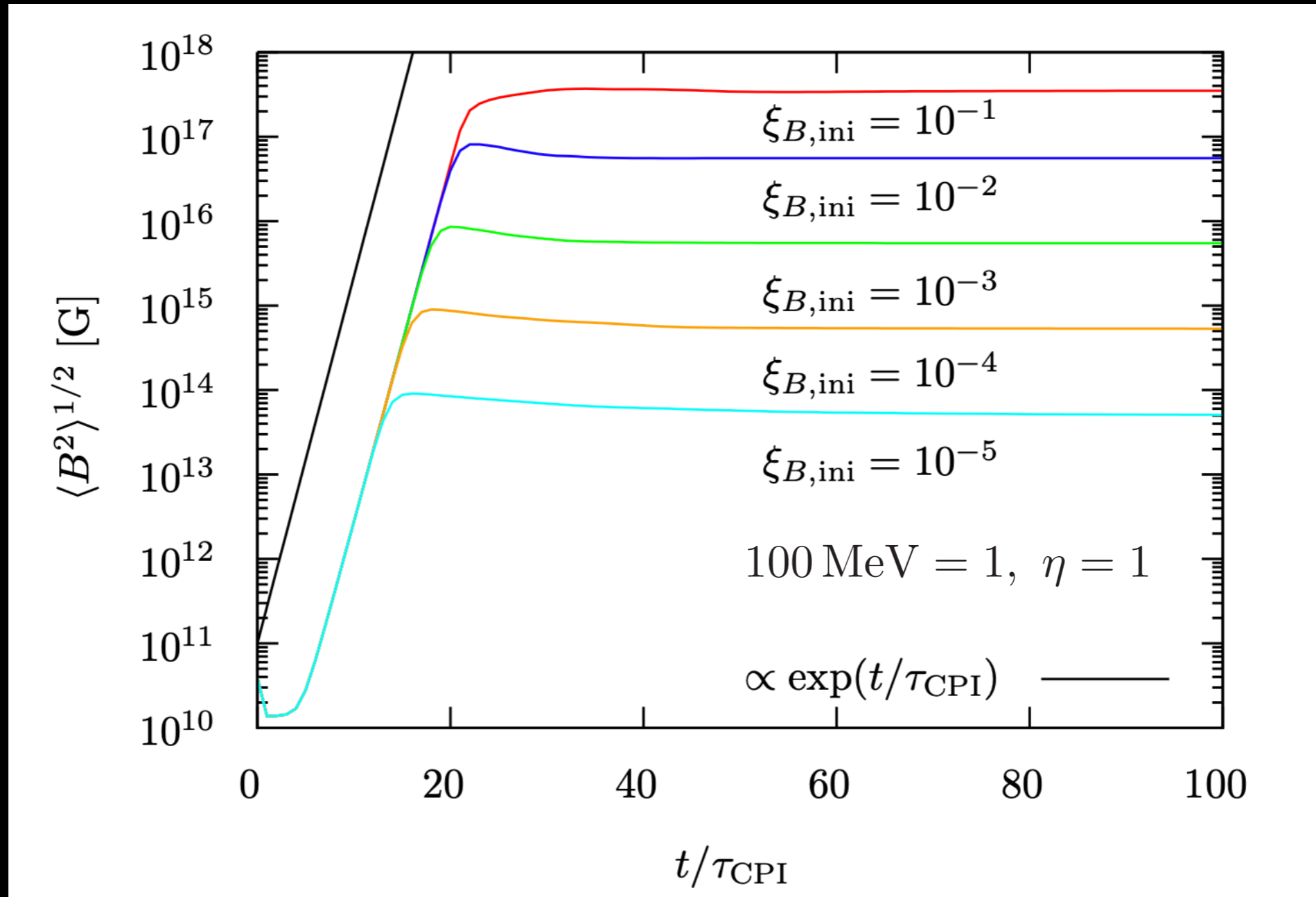


正のフィードバック → 磁気ヘリシティをもつ強磁場生成

Akamatsu, Yamamoto, PRL (2013), Ohnishi, Yamamoto (2014), ...

CPIによる磁場の増幅

Matsumoto, Yamamoto, Yang, PRD (2022)



強く安定なマグネター磁場の可能なメカニズム？

パルサーキックへの寄与

ニュートリノのエネルギー流が中性子星をキックする



$$v_{\text{kick}} \sim 100 \left(\frac{B}{10^{15} \text{ G}} \right) \text{ km/s}$$

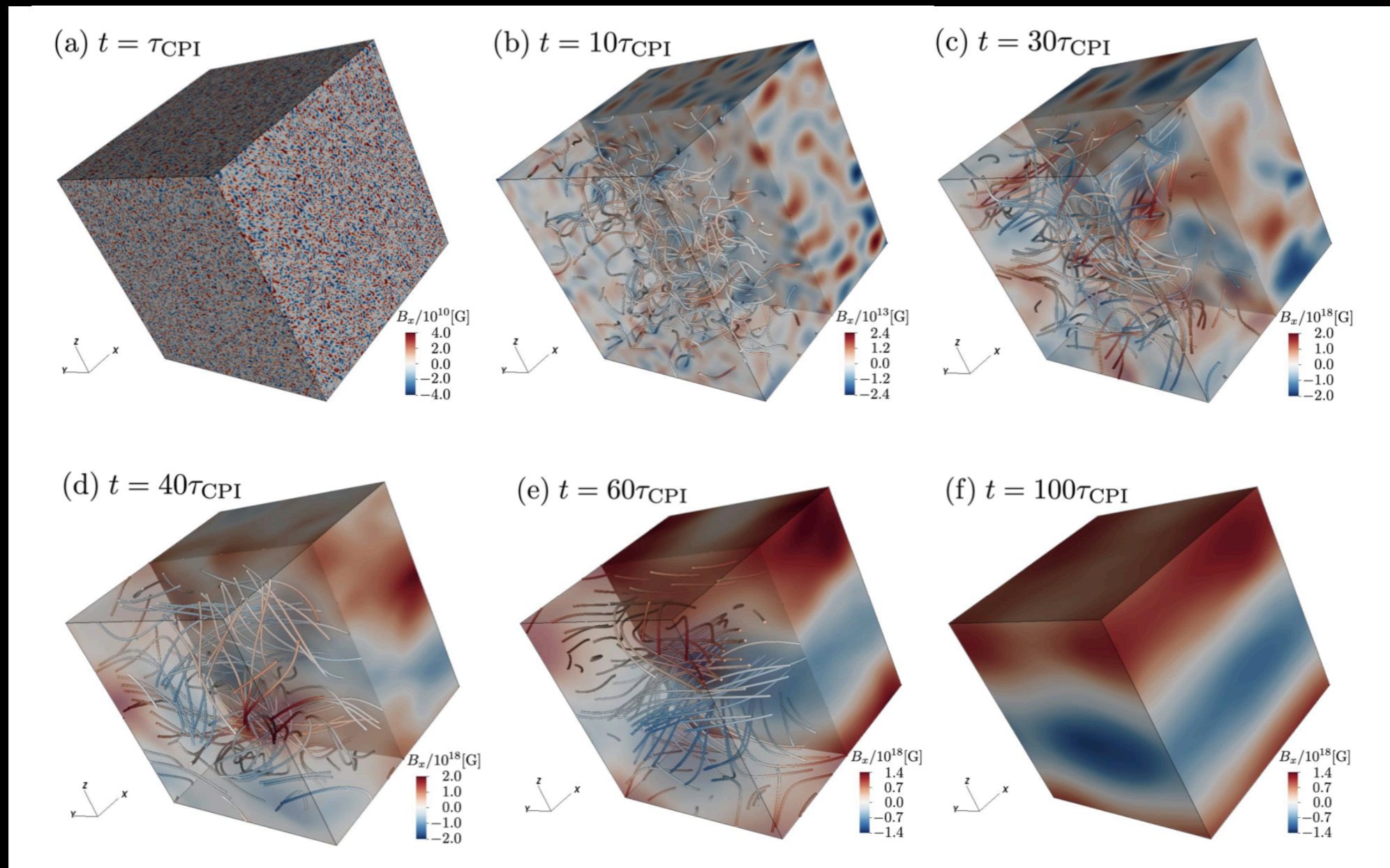
$B \sim 10^{15} \text{ G}$ の磁場で観測されているパルサーキックと同程度の寄与

現象論 Vilenkin, ApJ (1995); 系統的な輸送理論による導出 Yamamoto, Yang, PRD (2021)

磁場の時間発展

$$\xi_{B,ini} = 10^{-1}$$

Matsumoto, Yamamoto, Yang, PRD (2022)

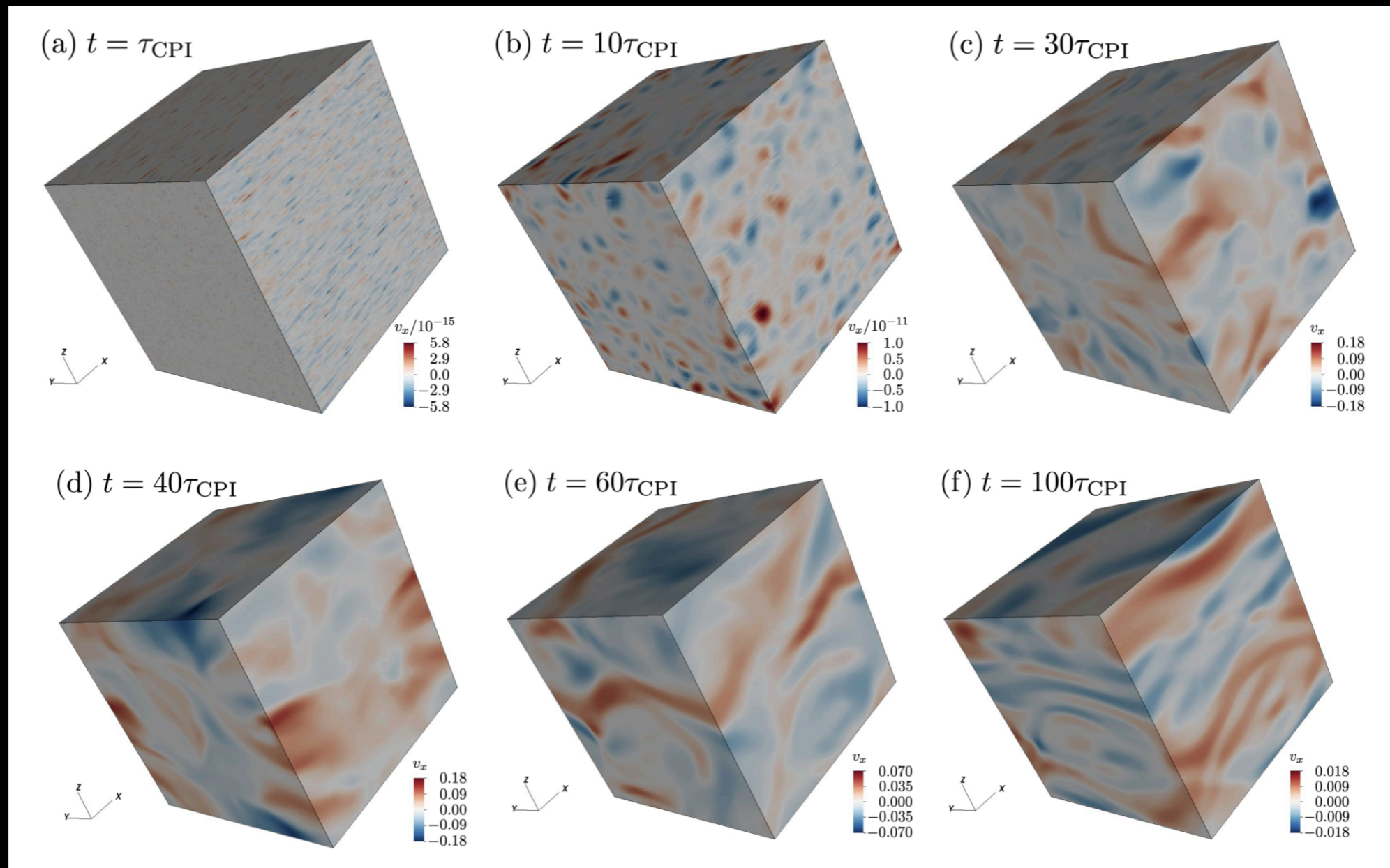


see also Brandenburg et al., ApJ (2017); Masada et al., PRD (2018)

流速の時間発展

$$\xi_{B,ini} = 10^{-1}$$

Matsumoto, Yamamoto, Yang, PRD (2022)



パリティの破れ（ヘリシティ）効果は逆カスケードの傾向を与える

Summary & Outlook

- 従来の超新星の理論では弱い力のパリティの破れを無視
- カイラル効果が流体の振舞いを質的に修正:
カイラルプラズマ不安定性、逆カスケード...
- マグネター磁場やパルサーキックへの寄与
- 他のカイラル効果（渦度、スピンホール効果...）の影響？
- 将来的なグローバルシミュレーション、爆発への影響？