

Q-ballによるchiral magnetic effect

飯田 英明

理研 橋本数理物理学研究室

Ref.) M.Eto, K.Hashimoto, H.Iida, A.Miwa,

Phys. Rev. D 83, 125033 (2011)

(arXiv:1012.3264)

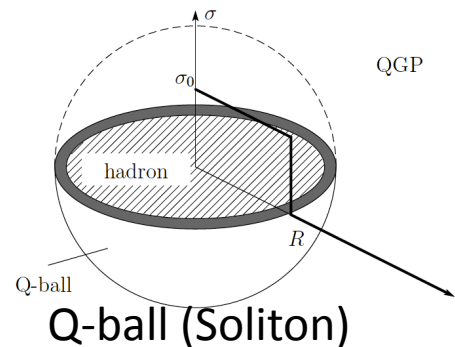
「熱場の量子論とその応用」

2011年 8月22日～24日 京都大学基礎物理学研究所

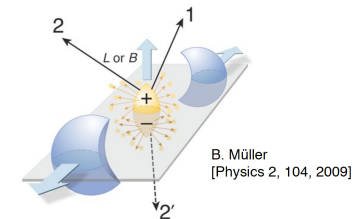
我々の主張

Chiral magnetic effect (CME)
...線形 σ 模型におけるQ-ballによって
引き起こされる可能性を提示

$$\mathcal{L}_{L\sigma M} + \mathcal{L}_{\text{chiral anom}} +$$



Chiral Magnetic Effect



- Parity violation in heavy ion collision: $\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}$
- Very strong magnetic field: $B \sim 10^{14-15} [G]$

Contents

- Chiral magnetic effect (CME)
- “Maxwell-Chern-Simons equation”
- 我々の研究
 - 線形 σ モデルでのaxial anomalyに対するeffective Lagrangian
 - Q-ballとCME
- この機構に特徴的な現象
- まとめ

Chiral magnetic effect (CME)

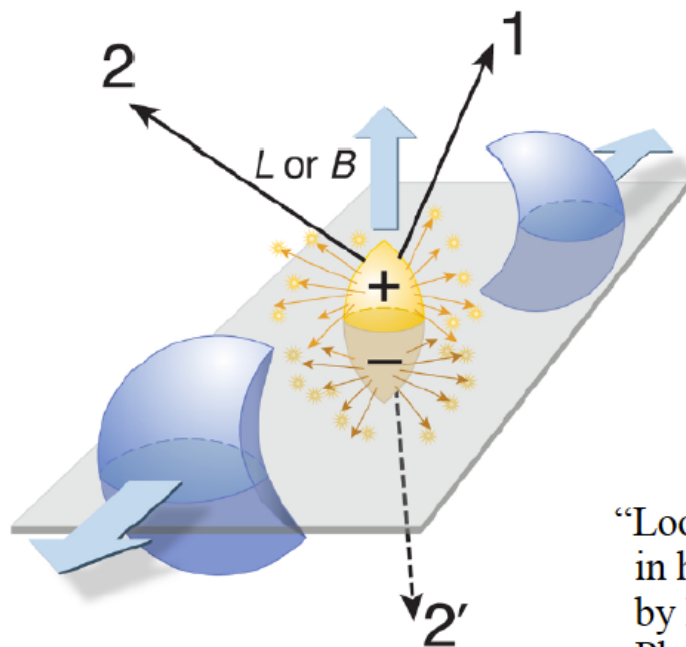
Ref.) D.Kharzeev, Phys.Lett.B633(2006)260.

D.Kharzeev, A.Zhytnitsky, Nucl.Phys.A797(2007)67.

D.Kharzeev, L.McLerran, H.Warringa, Nucl.Phys.A803(2008) 227.

...

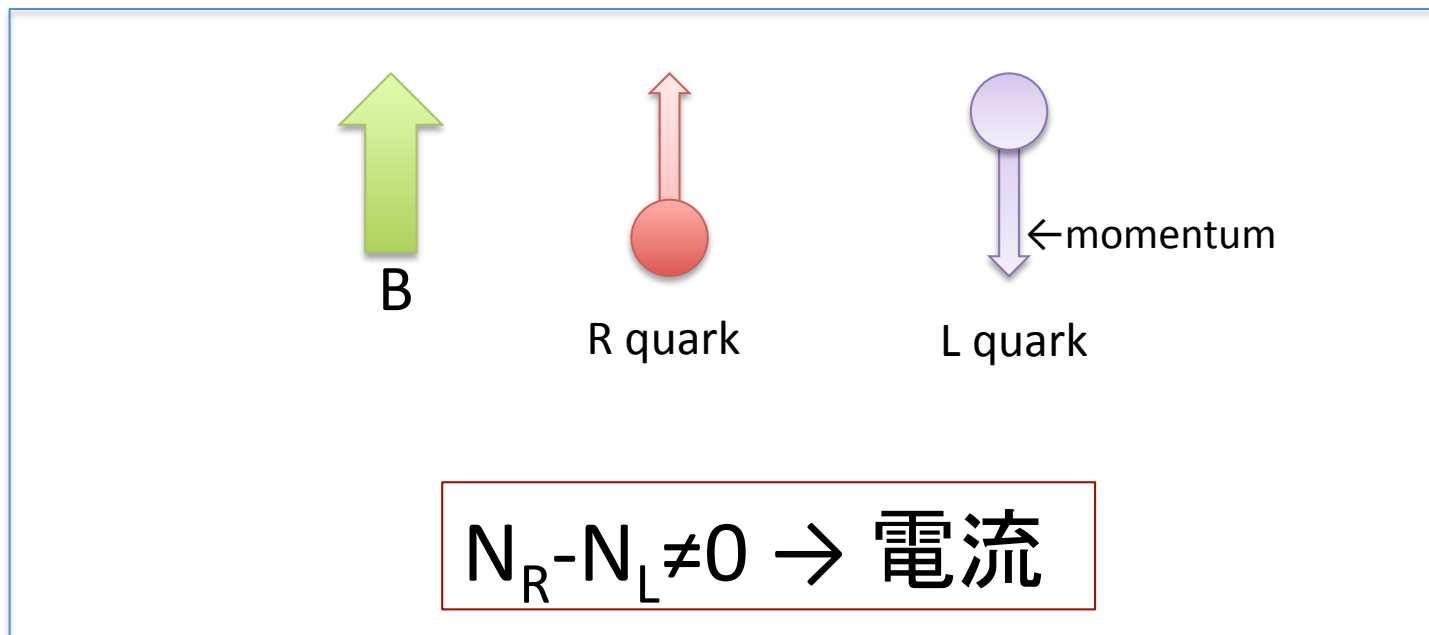
CME: Anomalyの効果により、QGP中で磁場の方向に電流



※相対論的重イオン衝突
 10^{17} [G]程度の
非常に強い磁場

“Looking for parity violation
in heavy-ion collisions”
by Berndt Müller
Physics 2, 104 (2009)

Chiral magnetic effect (CME)



$Q_5 = N_R - N_L \neq 0 \dots U(1)_A \text{ anomalyにより imbalance}$

“Maxwell-Chern-Simons equation”

Ref.) D.Kharzeev, Annals of Phys. 325 (2010) 205-218

- QCD+QED Lagrangian:

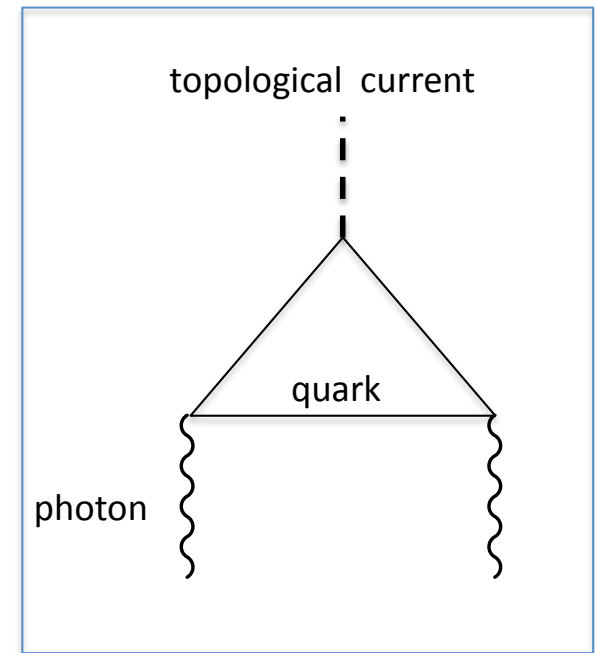
$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}G_{\alpha}^{\mu\nu}G_{\alpha\mu\nu} + \sum_f \bar{\psi}_f[i\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - igA_{\alpha\mu}t_{\alpha} - iq_fA_{\mu}) - m_f]\psi_f - \frac{\theta}{32\pi^2}g^2G_{\alpha}^{\mu\nu}\tilde{G}_{\alpha\mu\nu} - \frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$$

Quark loopにより、 θ と電磁場がcouple

→ effective action: $-\frac{c}{4}\theta\tilde{F}^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$

- 真空では $\theta \doteq 0$
- 有限温度では、sphaleronにより、 θ がlocalにfluctuate
(θ の時空平均は0)

時空依存の $\theta \rightarrow$ nontrivialな現象



“Maxwell-Chern-Simons equation”

- θ 定数 : $-\frac{c}{4}\theta\tilde{F}^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ はtotal derivativeで書ける

$$\tilde{F}^{\mu\nu}F_{\mu\nu} = \partial_\mu J_{\text{CS}}^\mu \quad J_{\text{CS}}^\mu = \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} A_\nu F_{\rho\sigma} \quad \dots \text{total derivative}$$

- $\theta = \theta(x,t)$: total derivative + “CS term”

$$\theta\tilde{F}^{\mu\nu}F_{\mu\nu} = \theta\partial_\mu J_{\text{CS}}^\mu = \underbrace{\partial_\mu[\theta J_{\text{CS}}^\mu]}_{\text{total div.}} - \underbrace{(\partial_\mu\theta)J_{\text{CS}}^\mu}_{\text{survive!!}}$$

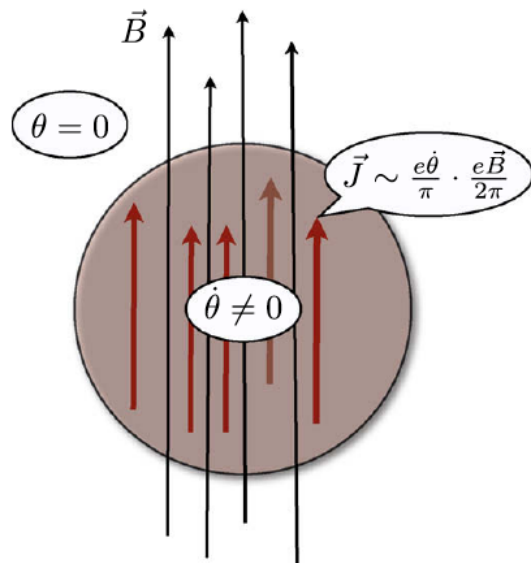
$$\mathcal{L}_{\text{MCS}} = -\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} - A_\mu J^\mu + \frac{c}{4}P_\mu J_{\text{CS}}^\mu$$

$$P_\mu = \partial_\mu\theta = (M, \vec{P})$$

“Maxwell-Chern-Simons equation”

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu - \underline{P_\mu \tilde{F}^{\mu\nu}} \quad \longleftrightarrow \quad \begin{cases} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \vec{J} + c \underline{(M\vec{B} - \vec{P} \times \vec{E})} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho + c \underline{\vec{P} \cdot \vec{B}} \end{cases}$$

$(P_\mu = \partial_\mu \theta = (M, \vec{P}))$



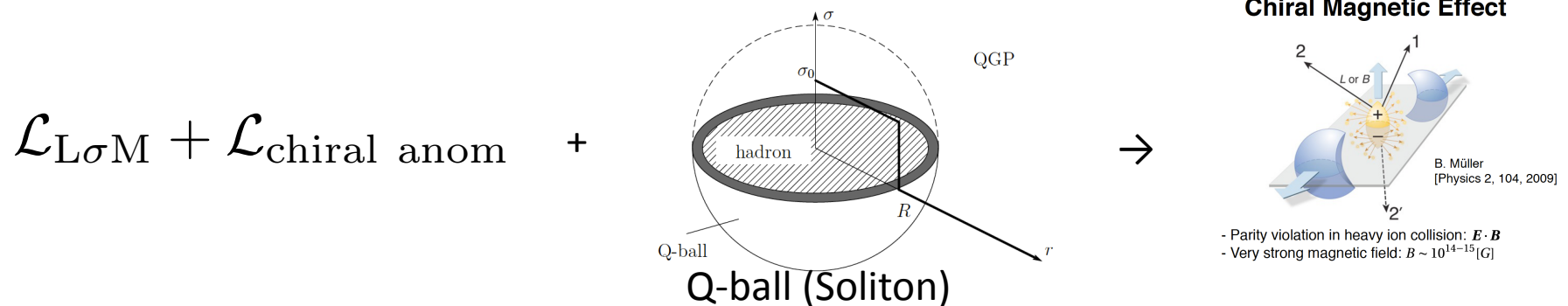
$$\vec{J} = -cM\vec{B} = -\frac{e^2}{2\pi^2}\dot{\theta}\vec{B}$$

... CME

我々の研究

- Axial anomalyを考慮すると、 $-\frac{c}{4}\theta\tilde{F}^{\mu\nu}F_{\mu\nu}(\theta(t))$ に類似な項が、線形 σ 模型(L σ M)に存在。
- Q-ball解(L σ Mのソリトン解)...時間依存する $\theta(t)$ を構成

➡ chiral magnetic effect



- $-\frac{c}{4}\theta\tilde{F}^{\mu\nu}F_{\mu\nu}$ に対応するLσMの項

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\cancel{5}} &= \frac{3ie^2}{32\pi^2}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}\sum_i q_i^2(\log\Phi_i - \log\Phi_i^*) \\ &= \frac{3e^2}{16\pi^2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}P_\mu A_\nu F_{\rho\sigma},\end{aligned}$$

$$P_\mu = (P_0, \vec{P}) \equiv \partial_\mu \text{Im}\left(\sum_i q_i^2 \log\Phi_i\right)$$

(q_i : electric charges of quarks u, d, s, ...)

... Axial anomalyを再現するように構成

$$\Phi_{ij} = \bar{q}_R^j q_L^i$$

$$\Phi_i = \text{diag}(\Phi_i, \Phi_2, \Phi_3) = \sigma e^{i\eta'T^0 + i\pi^0 T^3 + i\eta T^8}$$

$$\rightarrow \mathcal{J}^\mu = \frac{3e^2}{4\pi^2}P_\nu \tilde{F}^{\nu\mu}$$

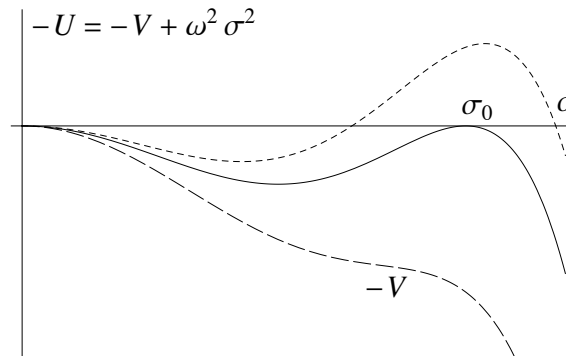
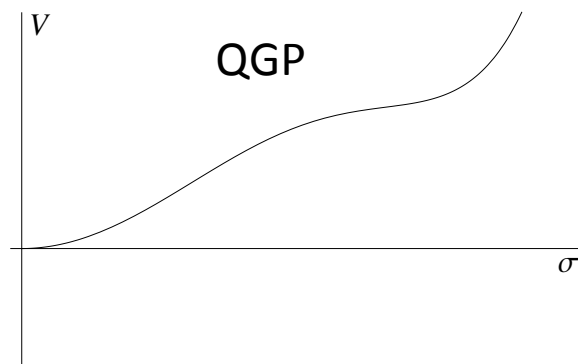
• Q-ballとCME

Q-ball解...LσMのソリトン

Ref.) S.Coleman, Nucl. Phys. B262 (1985) 263-283

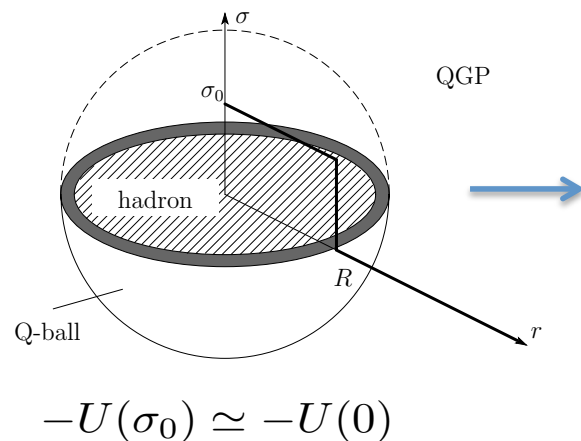
以下1 flavor & η' ballを考える

$$\Phi = \sigma(r)e^{i\eta'(t)}, \quad \eta'(t) = \omega t, \quad \rightarrow \quad \sigma'' + \frac{2}{r}\sigma' - \frac{1}{2}\frac{\partial U}{\partial \sigma} = 0, \quad U(\sigma) \equiv V(\sigma^2) - \omega^2\sigma^2.$$



$$-U(\sigma_0) \geq -U(0)$$

: Q-ball解存在



$$\vec{\mathcal{J}} = \frac{3e^2}{4\pi^2} q^2 \omega \vec{B} \dots \text{CME!}$$

$$\left(\mathcal{J}^\mu = \frac{3e^2}{4\pi^2} P_\nu \tilde{F}^{\nu\mu} \right)$$

この機構に特徴的な現象

- Q-ball解: QGP相にchiral sym.の破れた励起状態
- Quark mass termがあると?

$U(1)_A$ の破れ...Q-ball不安定

$$\epsilon = \frac{h}{\sigma_0 \omega_0^2} \quad \text{によるperturbationで解を構成}$$

$$\vec{\mathcal{J}} = \frac{3e^2}{4\pi^2} q^2 \vec{B} \omega_0 \left(1 - \epsilon \frac{3\alpha_1 - 2}{3\alpha_1 + 2} \cos \omega_0 t + \dots \right)$$

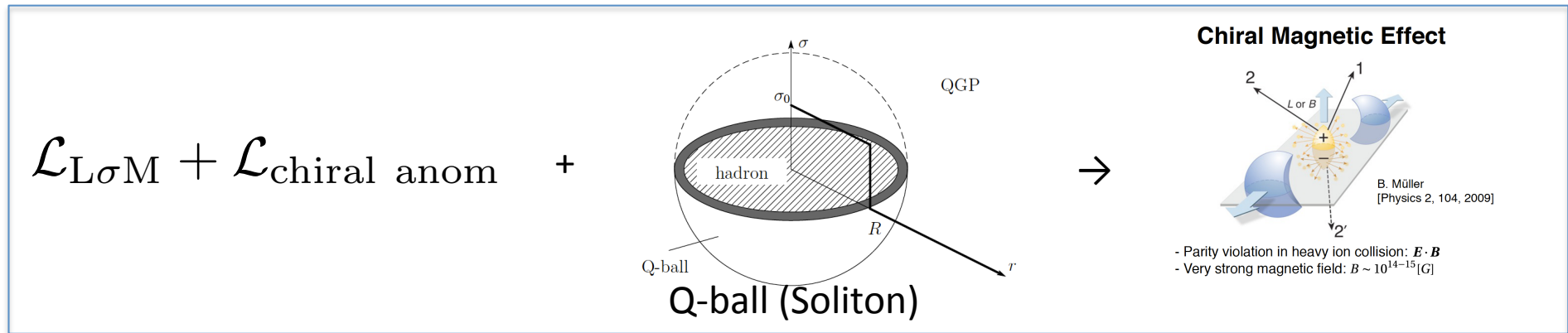
交流

- π_0 & η ballもできる

$$U(1)_{L-R}^2 \in SU(3)_{L-R} \in SU(3)_L \times SU(3)_R$$

まとめ

- 線形 σ 模型 + axial anomaly $\rightarrow$ CME



- 特徴的な現象:
 - QGP中にカイラル対称性が破れた励起状態
 - quark mass...直流の中に小さな交流
 - η' ball、 π_0 ball、 η ball