

暗黒セクターの位相欠陥により生じる擬似Dyon

千歳彬文, 伊部昌宏 (東大宇宙線研)

arXiv:2303.10861, to appear in Phys. Rev. D

SU(2) → U(1) [→ Z₂] による暗黒光子模型

セットアップ

対称性と場の表現

A_D^a : SU(2)_D ゲージ場
 A : U(1)_{QED} ゲージ場
 ϕ^a, η^a : SU(2)_D 随伴スカラー

対称性の破れ

$$V(\phi, \eta) = \frac{\lambda_1}{2} (\phi^a \phi^a - v_1^2)^2 + \frac{\lambda_2}{2} (\eta^a \eta^a - v_2^2)^2 + \kappa (\phi^a \eta^a)^2$$

$(\lambda_1 v_1^4 \gg \lambda_2 v_2^4, \kappa > 0)$

$$\text{SU(2)}_D \xrightarrow{\langle \phi^a \rangle = v_1 \delta_3^a} \text{U(1)}_D \xrightarrow{\langle \eta^a \rangle = v_2 \delta_1^a} \text{Z}_2$$

ゲージ場の混合

Kinetic mixing: $-\frac{c_1}{2\Lambda} \phi^a F_{\mu\nu} F_D^{a\mu\nu}$
 Magnetic mixing: $-\frac{c_2}{16\pi^2 \Lambda} \phi^a F_{\mu\nu} \tilde{F}_D^{a\mu\nu}$
 ↑次元5の演算子 → 混合の小ささを説明
 (cf. U(1)_{QED} × U(1)_D → $e F_{\mu\nu} F_D^{\mu\nu}$: 次元4)

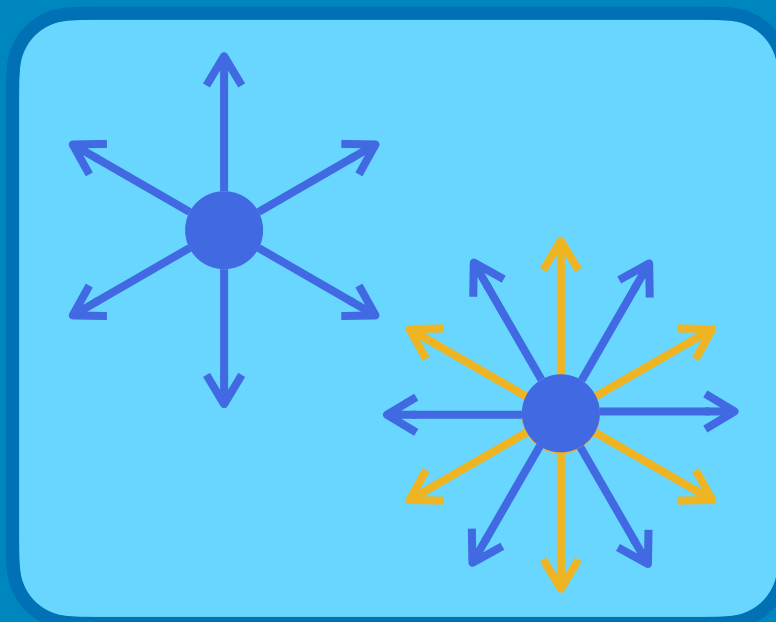
U(1)_{QED} × U(1)_D 有効理論

Kinetic mixing: $\frac{\epsilon}{2} F_{\mu\nu} F_D^{\mu\nu}$
 Magnetic mixing: $-\frac{\theta_{\text{mix}}}{16\pi^2} F_{\mu\nu} \tilde{F}_D^{\mu\nu}$, 全微分
 $F_{D\mu\nu} := \frac{\phi^a}{v_1} F_{D\mu\nu}^a$: 有効U(1)_D曲率テンソル
 ϕ のtrivial vacuum i.e. モノポール遠方で有効

暗黒セクターの位相欠陥

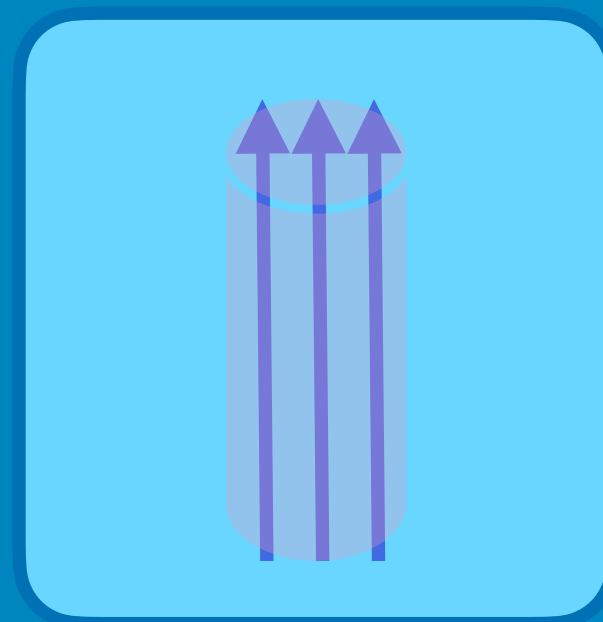
モノポール / Dyon

SU(2)_D → U(1)_D で出現
 $\pi_2(\text{SU(2)/U(1)}) = \mathbb{Z}$ により安定
 θ -termに依存して電荷が量子化



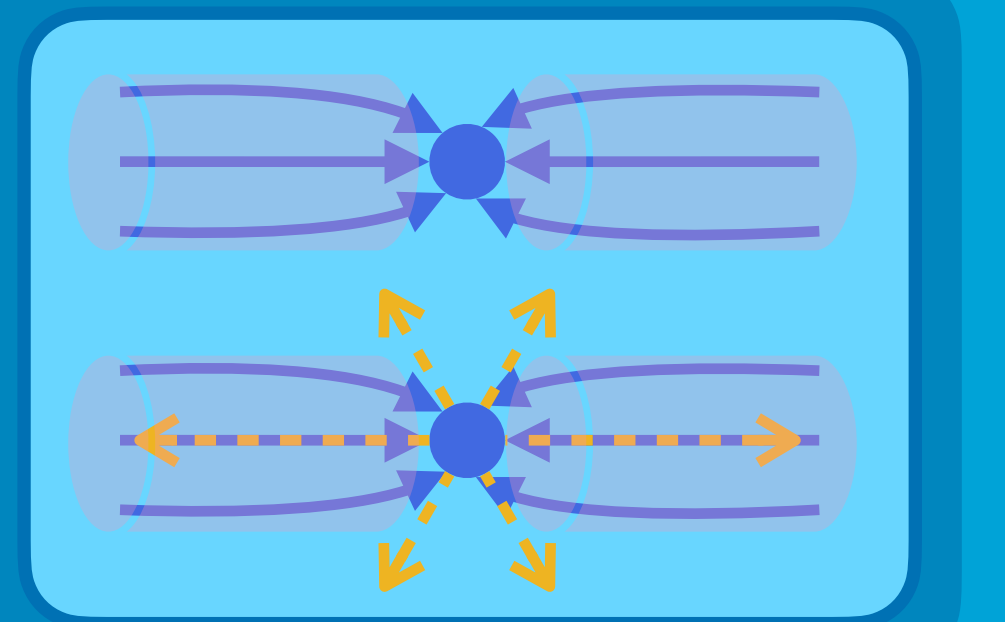
宇宙ひも

U(1)_D → Z₂ で出現
 $\pi_1(\text{SU(2)/Z}_2) = \mathbb{Z}_2$ により安定
 中を磁力線が通っている



ビーズ

U(1)_Dが破れると、
 モノポールの磁場は
 宇宙ひもに閉じ込められる



Q: 暗黒セクターの位相欠陥はQEDセクターとどう相互作用する?

誘起されるQED電磁場

→ [暗黒] 磁場
 → [暗黒] 電場

U(1)_D symmetric phase

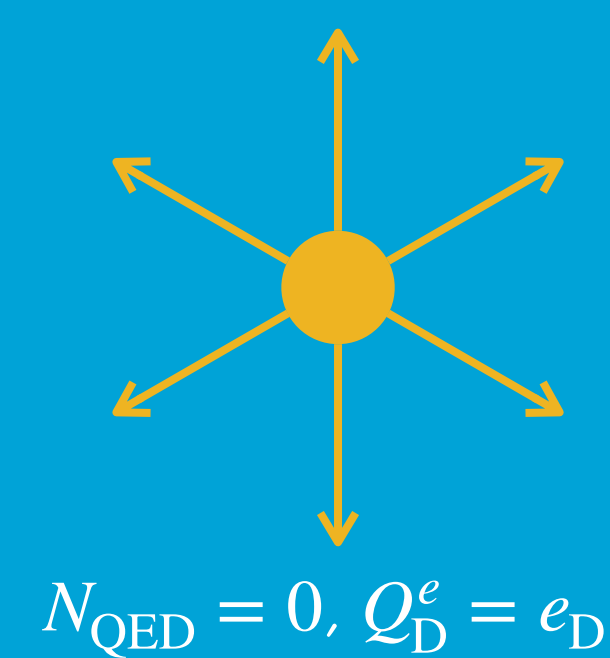
QED Noether charge

$$\text{EoM: } \partial_\mu F^{\mu\nu} - e \partial_\mu \left(\frac{\phi^a}{v_1} F_D^{a\mu\nu} \right) + \frac{\theta_{\text{mix}}}{8\pi^2} \partial_\mu \left(\frac{\phi^a}{v_1} \tilde{F}_D^{a\mu\nu} \right) = e J_{\text{QED}}^\nu$$

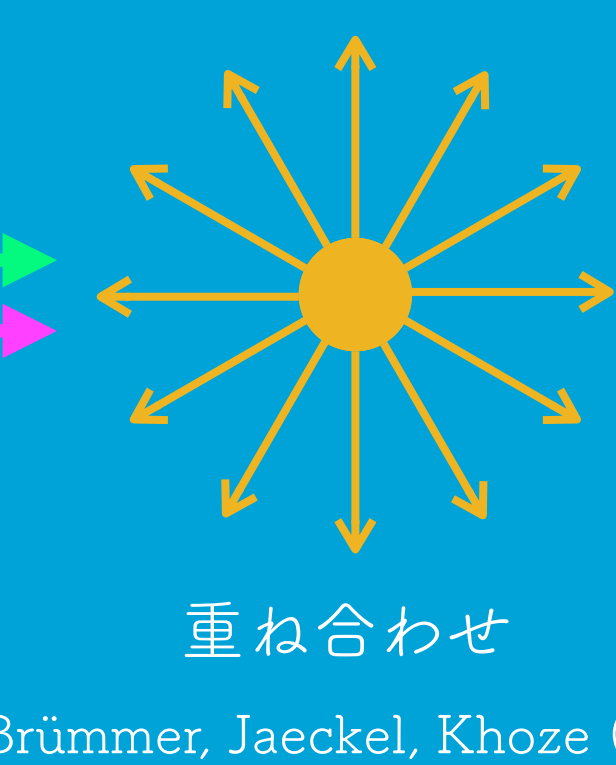
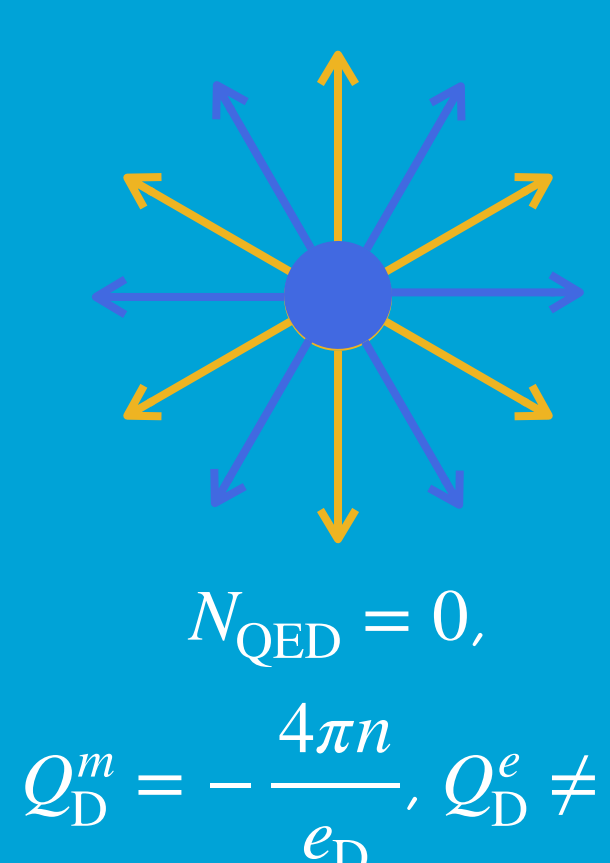
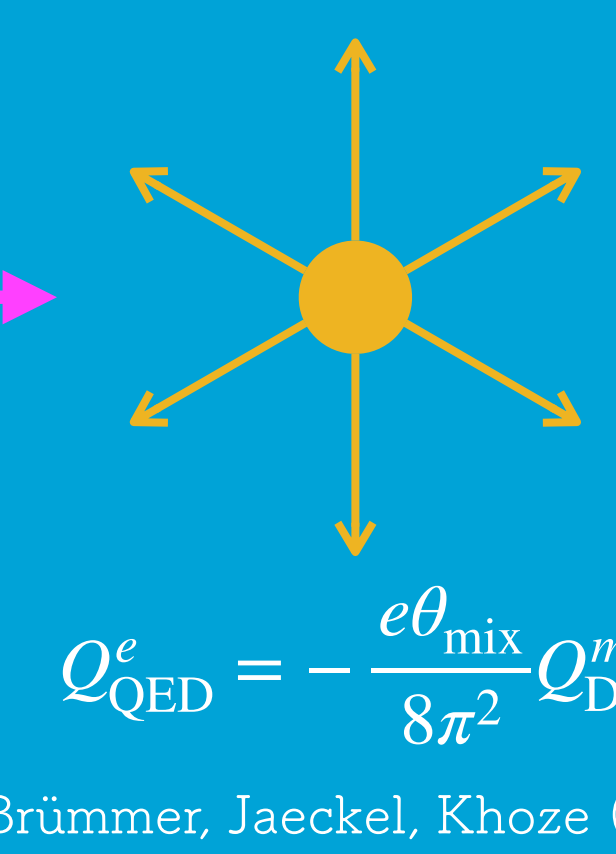
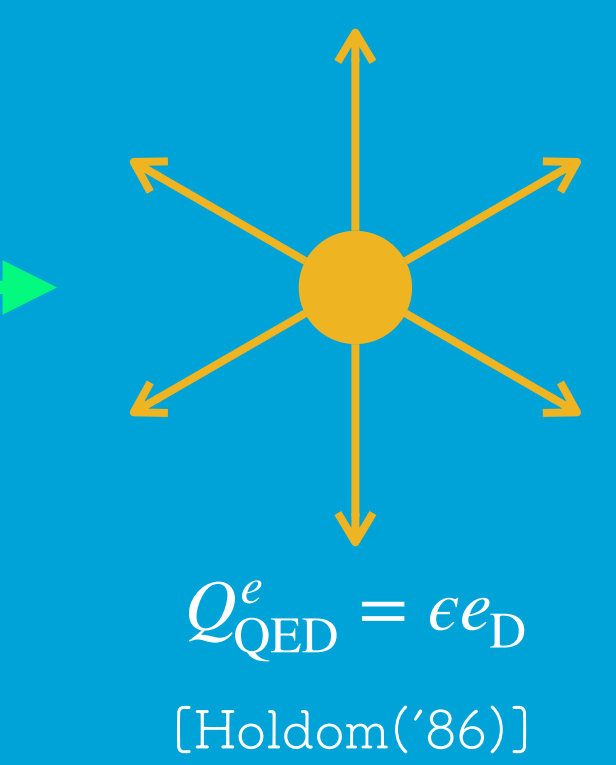
$$\rightarrow N_{\text{QED}} = \frac{1}{e} Q_{\text{QED}}^e - \frac{\epsilon}{e} Q_D^e + \frac{\theta_{\text{mix}}}{8\pi^2} Q_D^m$$

(Q : 場の強さの積分で定義された電荷/磁荷)

暗黒セクター



QEDセクター

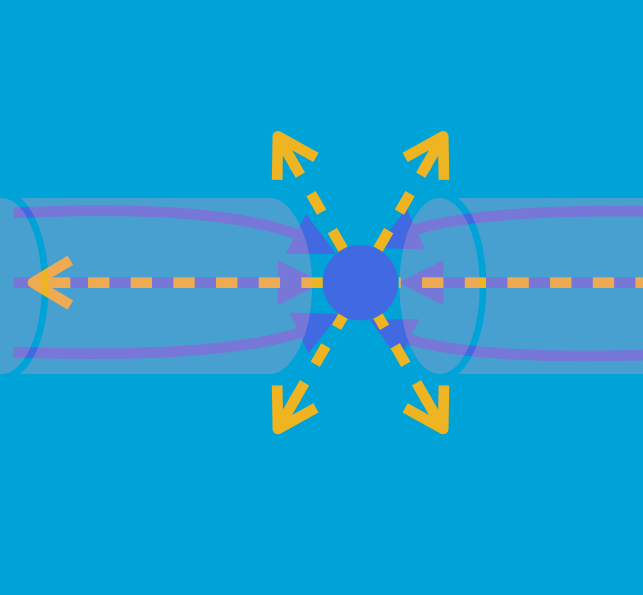
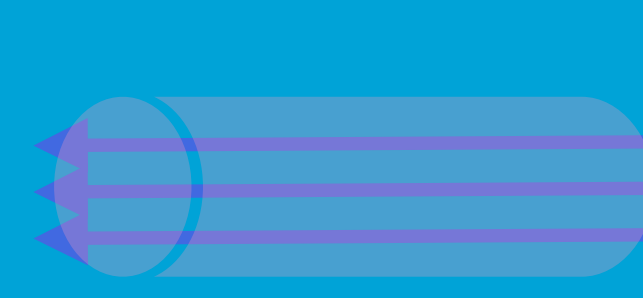
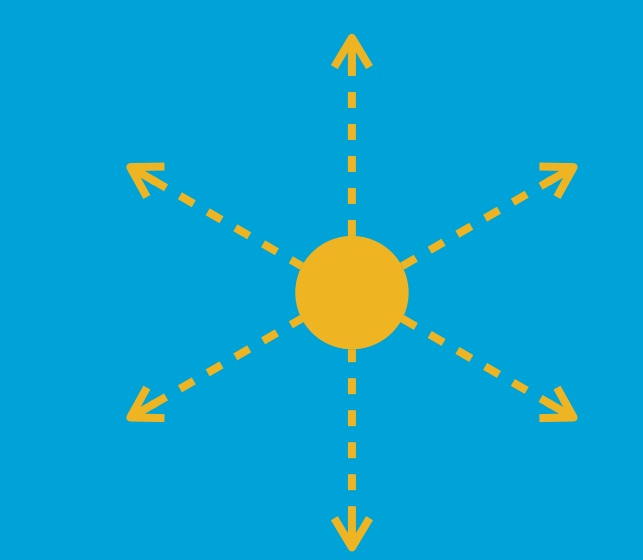


U(1)_D broken phase

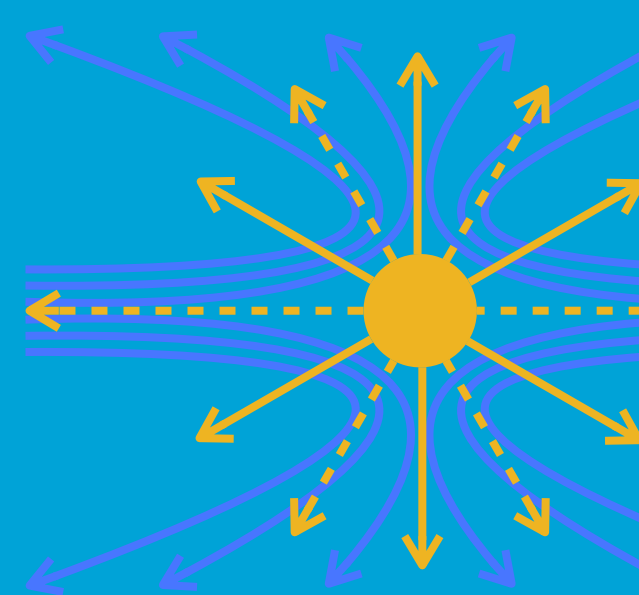
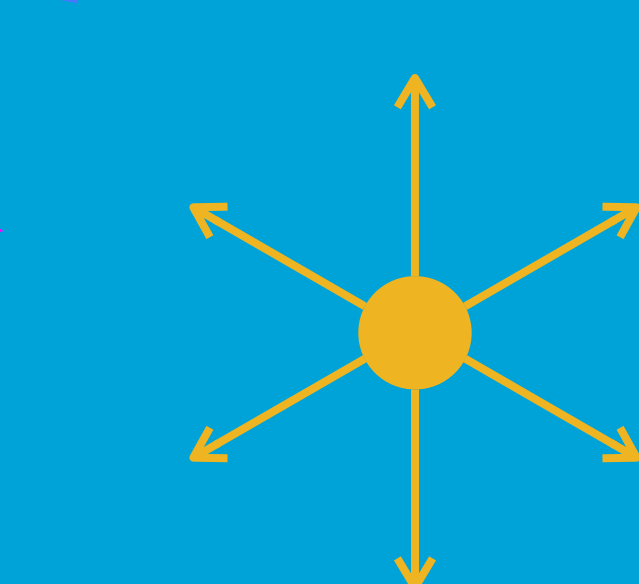
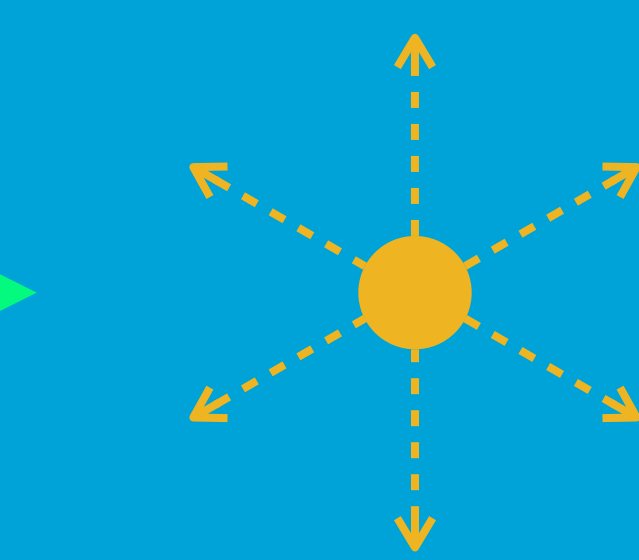
Decoupled basis

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{\epsilon}{1-\epsilon^2} \\ 0 & \frac{1}{1-\epsilon^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A' \\ A_D \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} A \\ A_D \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} \partial_\mu F'^{\mu\nu} = e J_{\text{QED}}^\nu & \leftarrow A' \text{のみ} \\ \partial_\mu F_D^{\mu\nu} - m_D^2 A_D^\nu = \frac{e_D}{\sqrt{1-\epsilon^2}} J_D^\nu + \frac{e\epsilon}{\sqrt{1-\epsilon^2}} J_{\text{QED}}^\nu & \leftarrow A_D \text{のみ} \end{cases}$$

暗黒セクター



QEDセクター



$\langle \phi^a \rangle$: trivial → $F_{\mu\nu} = \epsilon F_{D\mu\nu}$

[Alford, Wilczek ('89)]
 [Vachaspati ('09)]

宇宙ひも部分から磁場が流入、
 中央から漏れ出す
 → 「擬似モノポール」
 [Hiramatsu, Ibe, Suzuki, Yamaguchi (2021)]

EoM: $\partial_i E^i = \frac{\theta_{\text{mix}}}{8\pi^2} \partial_i B_D^i$
 → 「擬似Dyon」

全ての重ね合わせ