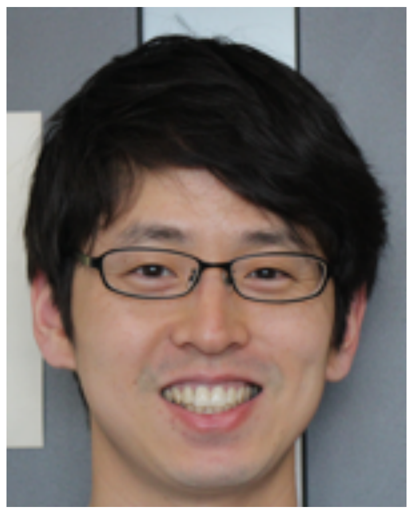
任意の模型におけるQCDワインバーグ演算子(GGG~)の係数と中性子EDM



阿部智広

名古屋大学 高等研究院

素粒子宇宙起源研究機構(KMI)

共同研究者

久野純治

名古屋大, KMI, Kavli IPMU

長井遼

東北大

JHEP 1803 (2018) 175 (arXiv:1712.09503)

中性子EDM への new physics からの寄与を評価するために必要な

Weinberg operator の wilson係数

を計算するのに必要な

模型によらない公式

を導出しました

内容

1. EDM について
2. Weinberg operator について
3. 公式とその使い方、および実例
4. まとめ

EDM (= Electric Dipole Moment)

定義

$$H \supset -d_f \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} \cdot \vec{E}$$

空間反転対称性を破る (Pを破る)

$$\vec{s} \to \vec{s},\ \ \vec{E} \to -\vec{E}$$

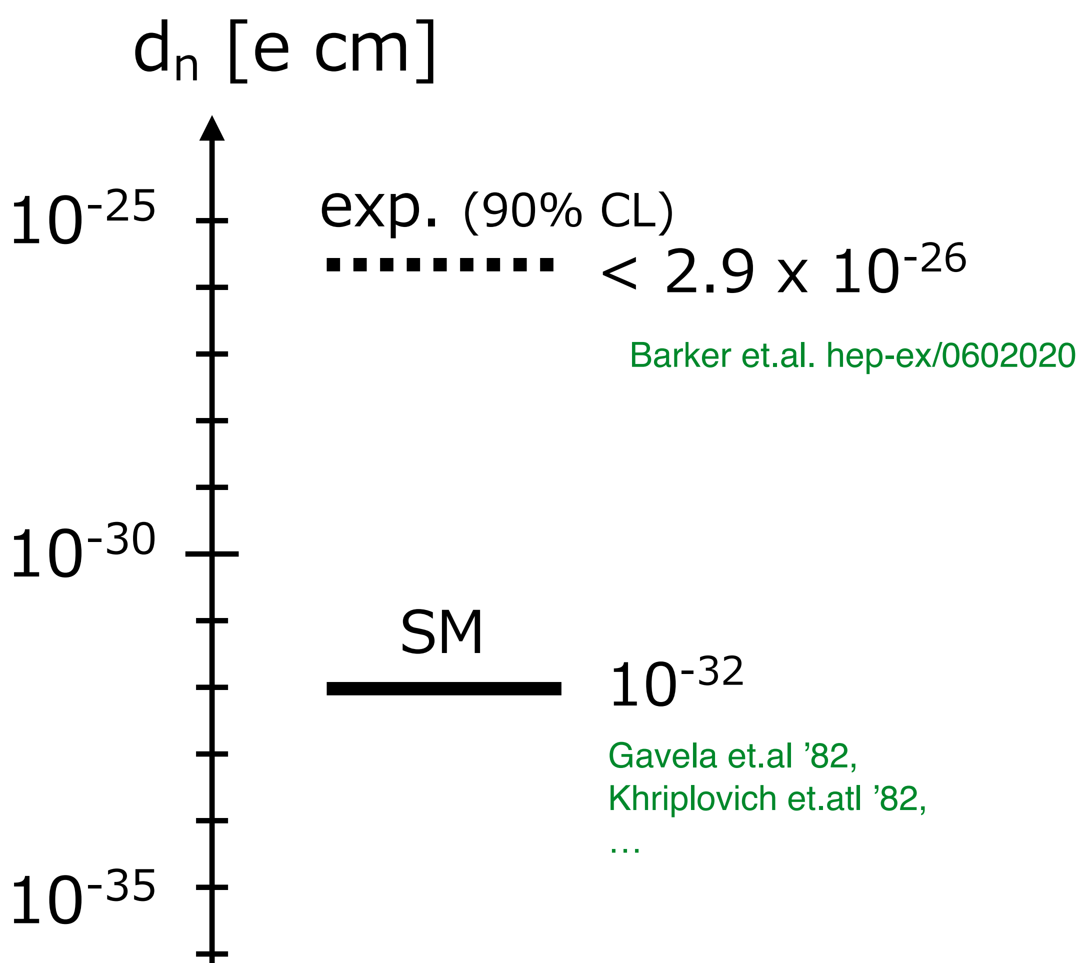
時間反転対称性を破る (CPを破る)

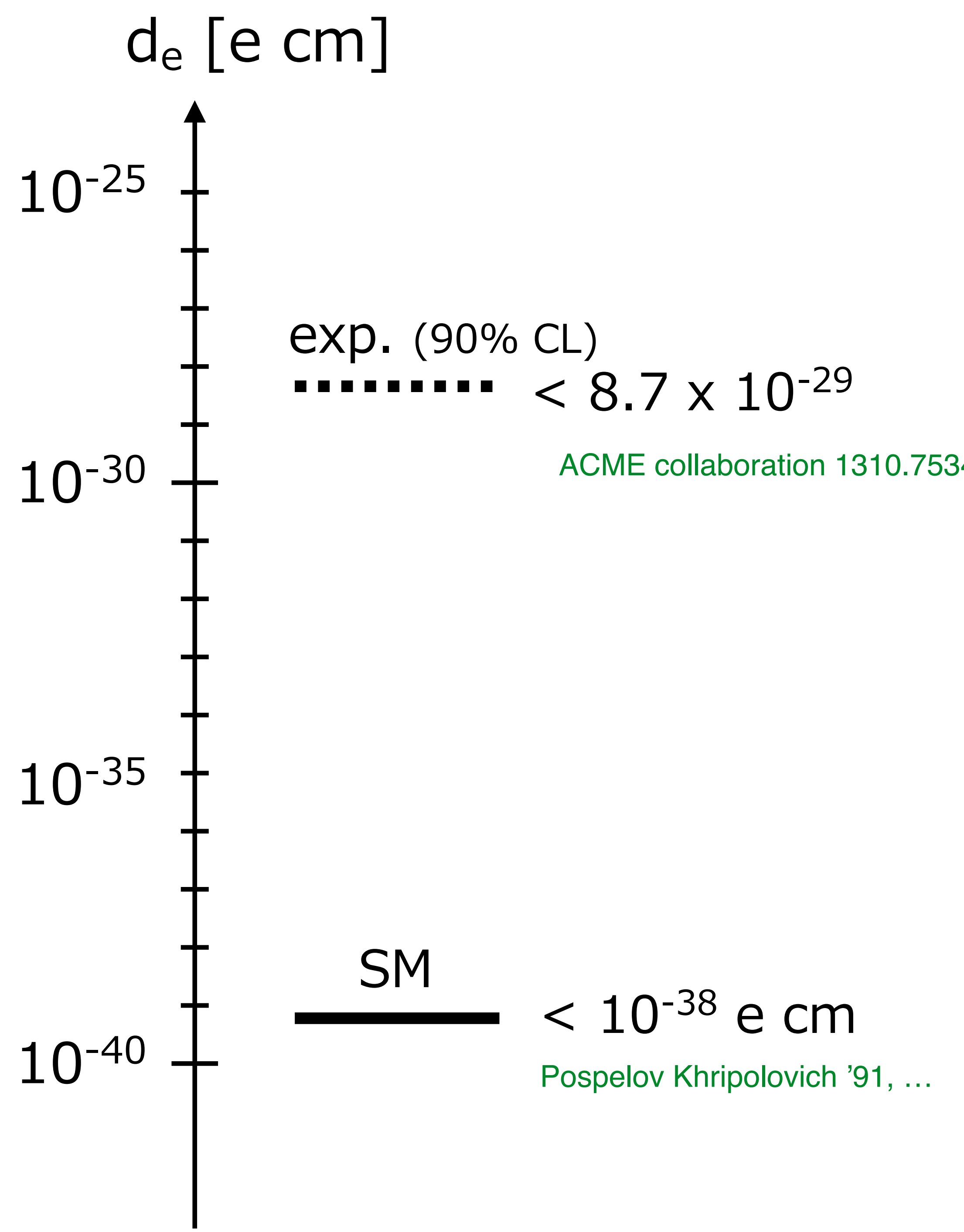
$$\vec{s} \to -\vec{s},\ \ \vec{E} \to \vec{E}$$

CPの破れに感度がある

- ⋆ 標準模型を超える模型の多くは小林益川位相の他にCPを破る項を含む
- ⋆ EDM は新物理探索に有用

EDM 測定の現状

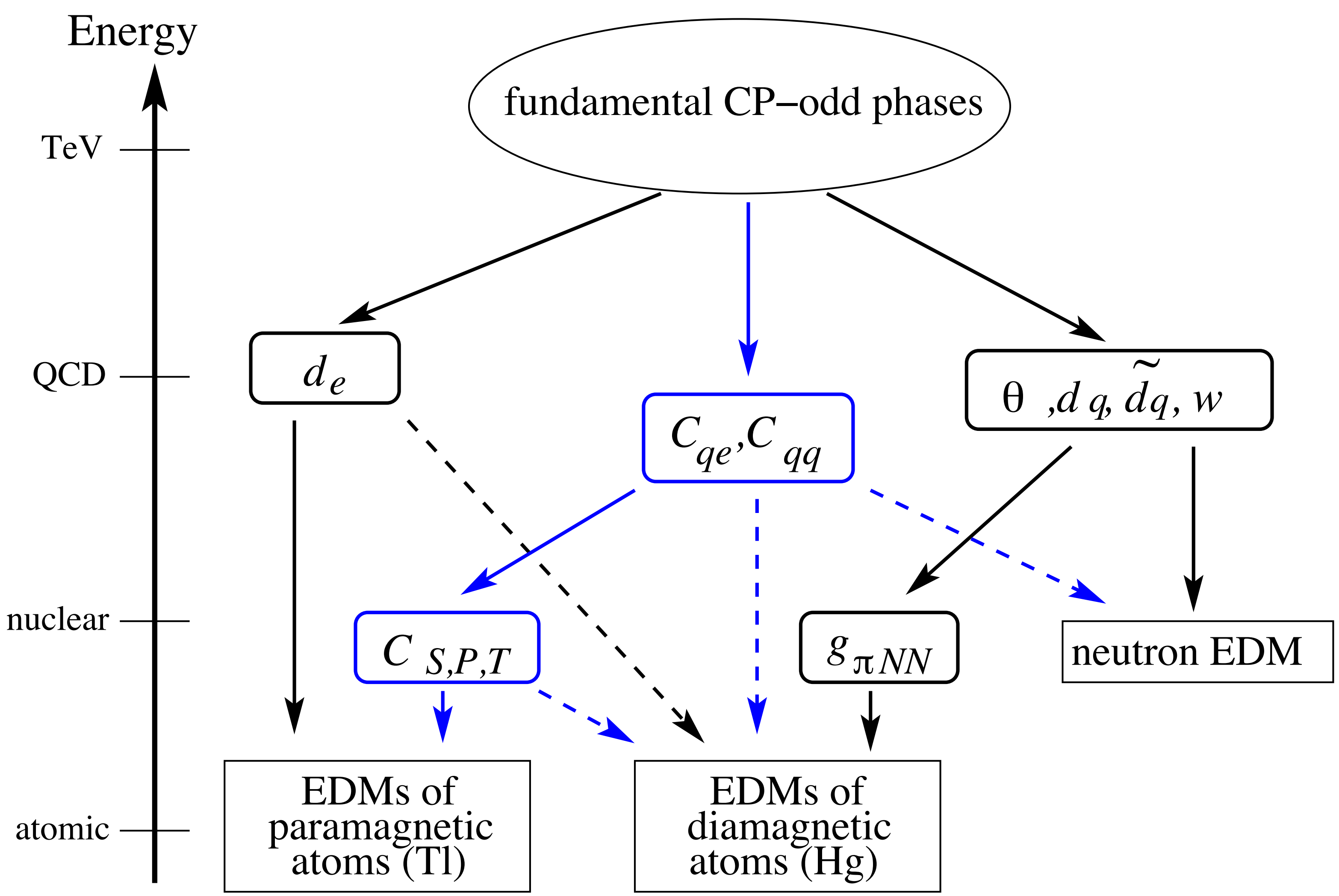




現状

- 有限値は未だ測定されず
- 上限値は SMの予言のずっと上
- もし近い将来に有限の値が測定されたら、それは新物理の発見と同じ

中性子EDM



[Pospelov Ritz, hep-ph/0504231]

θ term

$$\frac{g_s^2}{32\pi^2}\theta G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^{a\mu\nu}$$

EDM and chromo EDM

$$-\frac{d_q}{2}\left(i\bar{q}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5 q F_{\mu\nu}\right)$$

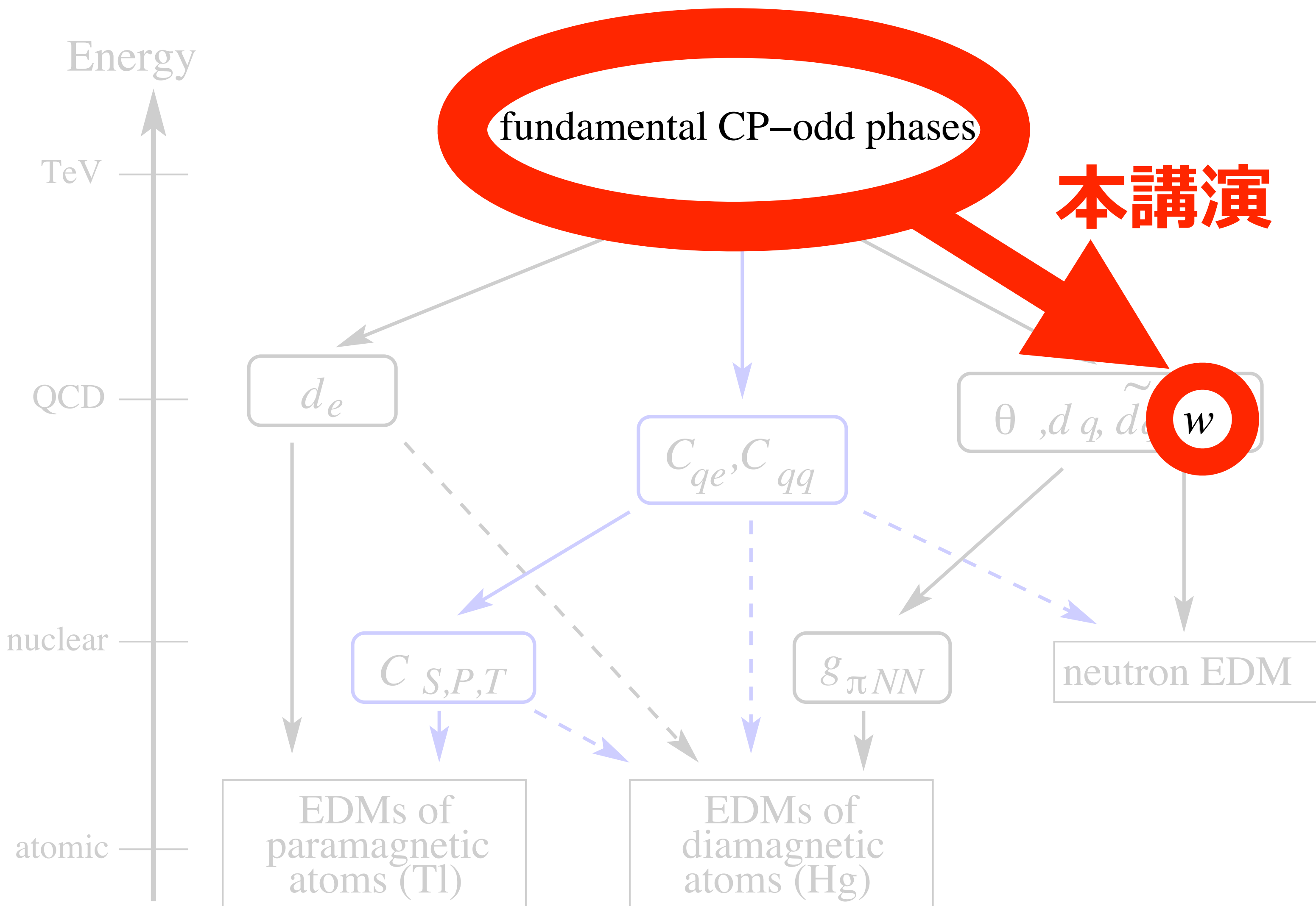
$$-\frac{\tilde{d}_q}{2}\left(i\bar{q}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5 q G_{\mu\nu}\right)$$

the Weinberg operator

$$-\frac{w}{3}f^{abc}G^a_{\mu\nu}G^{b\nu}_{\rho}\tilde{G}^{c\rho\mu}$$

[Weinberg PRL63.2333(1989)]

中性子EDM



[Pospelov Ritz, hep-ph/

θ

$$\frac{g_s^2}{32\pi^2}\theta G^a_{\mu\nu}\tilde{G}^{a\mu\nu}$$

EDM and chromo EDM

$$-\frac{d_q}{2}\left(i\bar{q}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5 q F_{\mu\nu}\right)$$

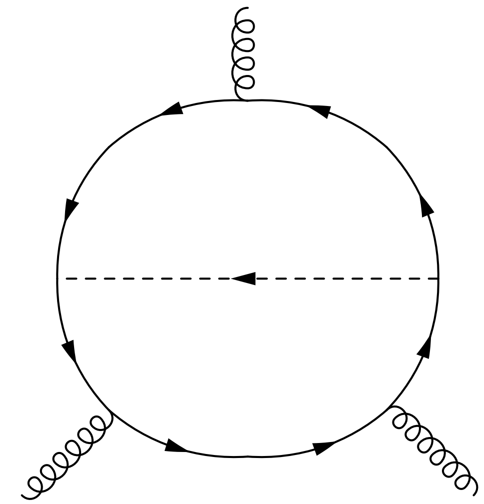
$$-\frac{\tilde{d}_q}{2}\left(i\bar{q}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5 q G_{\mu\nu}\right)$$

the Weinberg operator

$$-\frac{w}{3}f^{abc}G^a_{\mu\nu}G^{b\nu}_{\ \ \rho}\tilde{G}^{c\rho\mu}$$

[Weinberg PRL63.2333(1989)]

Weinberg operator (GGG~)



two-loop で初めて現れる

- ⋆ カラーを持った粒子が必要
- ⋆ P と CP を破る相互作用が必要

計算はやればできるが大変

- ⋆ いくつかの模型でしか計算されていない
  - ✳ THDM [Weinberg '89; Dicus '90]
  - ✳ MSSM (quark-squark-gluino) [Dai et.al '90]
  - ✳ LR model [Chang et.al '90; Rothstein '90]
- ⋆ これ以外の模型では、自分で 2-loop 計算しないといけない
- ⋆ EDM への寄与は無視できない大きさ

我々のやったこと

模型によらない公式を導出した

$$w = -\frac{g_s^3}{(4\pi)^4} 6\mathrm{Im}(sa^*) m_A m_B$$
$$\times \left\{ \left(X T_A T_A X^\dagger\right) f_1(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + \left(X X^\dagger T_B T_B\right) f_1(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right.$$
$$\left. + \left(X T_A X^\dagger T_B\right) \left[f_2(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + f_2(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right] \right\}$$

(When you use the same vertex twice, multiply 1/2)

- ⋆ 模型は特定しない
- ⋆ fermion-fermion-scalar vertex を仮定する
- ⋆ QCD gauge invariance も仮定

公式

方針

相互作用

$$\boxed{\mathcal{L} \supset -\bar{\psi}_B g_{\bar{B}AS} \psi_A S - \bar{\psi}_A g_{\bar{A}B\bar{S}} \psi_B S^*}$$

- ⋆ フェルミオン (*A* と *B*)
- ⋆ スカラー (*S*)
- ⋆ QCD invariance を課す

カップリング

$$\boxed{\begin{aligned} g_{\bar{B}AS} &= X_{\bar{B}AS}(s + \gamma_5 a), \\ g_{\bar{A}B\bar{S}} &= X^\dagger_{\bar{A}B\bar{S}}(s^* - \gamma_5 a^*) \end{aligned}}$$

- ⋆ *"a"* と *"s"* は複素数
- ⋆ X は粒子のカラーの表現で決まる
(例)

(A, B, S)	$\psi_A \ \psi_B \ S$	$X_{\bar{B}AS}$
$(3, 3, 1)$	$(\psi_A)^a \ (\psi_B)^b \ S$	δ_a^b
$(3, \bar{3}, 3)$	$(\psi_A)^i \ (\psi_B)_j \ S^k$	ϵ_{ijk}
$(\bar{3}, 3, 6)$	$(\psi_A)_a \ (\psi_B)^b \ S^{ij}$	$\frac{\delta_i^b \delta_j^a + \delta_j^b \delta_i^a}{2}$

公式にでてくる因子

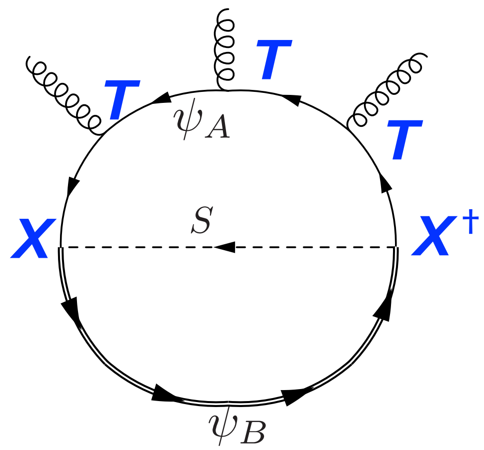
$$w = -\frac{g_s^3}{(4\pi)^4} 6\mathrm{Im}(sa^*) m_A m_B$$
$$\times \left\{ \boxed{\left(X T_A T_A X^\dagger\right)} f_1(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + \boxed{\left(X X^\dagger T_B T_B\right)} f_1(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right.$$
$$\left. + \boxed{\left(X T_A X^\dagger T_B\right)} \left[f_2(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + f_2(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right] \right\}$$

これが何なのか？

ダイアグラム計算を眺めればわかる

group theory factor : XTTTX

(ex.) 粒子A から３つグルーオンのでてくるダイアグラムを評価してみる



$$\propto \left(X_{\bar{B}AS} (T^a T^b T^c)_{AA'} X^\dagger_{\bar{A}'B\bar{S}} \right) \left(G^a_{\mu\nu} G^{b\nu}{}_{\rho} G^c_{\alpha\beta} \epsilon^{\rho\mu\alpha\beta} \right)$$

$$g_{\bar{B}AS} = X_{\bar{B}AS}(s + \gamma_5 a),$$

$$g_{\bar{A}B\bar{S}} = X^\dagger_{\bar{A}B\bar{S}}(s^* - \gamma_5 a^*)$$

(example)

$$(X T_A T_A X^\dagger) = \frac{1}{2} \text{ for } (A, B, S) \sim (3, 3, 1)$$

$$\mathcal{L} \supset (\bar{\psi}_B)_j \delta^j_i (s + \gamma_5 a)(\psi_A)^i S$$

$$X = \delta^j_i$$

$$X_{\bar{B}AS} (T^a)_{AA'} (T^b)_{A'A''} X^\dagger_{\bar{A}''B\bar{S}} = \mathrm{tr}(T^a T^b) = \frac{1}{2}\delta^{ab}$$

カラーの表現で決まる因子 (1/2)

公式にでてくる因子

$$w = -\frac{g_s^3}{(4\pi)^4} 6\mathrm{Im}(sa^*) m_A m_B$$
$$\times \left\{ \boxed{(X T_A T_A X^\dagger)} f_1(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + \boxed{(X X^\dagger T_B T_B)} f_1(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right.$$
$$\left. + \boxed{(X T_A X^\dagger T_B)} \left[f_2(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + f_2(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right] \right\}$$

その定義

$$\left(X_{\bar{B}AS} (T^a)_{AA'} (T^b)_{A'A''} X^\dagger_{\bar{A}''B\bar{S}}\right) \equiv \boxed{\left(X T_A T_A X^\dagger\right)} \delta^{ab},$$
$$\left(X_{\bar{B}AS} (T^a)_{AA'} X^\dagger_{\bar{A}'B'\bar{S}} (T^b)_{B'B}\right) \equiv \boxed{\left(X T_A X^\dagger T_B\right)} \delta^{ab},$$
$$\left(X_{\bar{B}AS} X^\dagger_{\bar{A}B'\bar{S}} (T^a)_{B'B''} (T^b)_{B''B}\right) \equiv \boxed{\left(X X^\dagger T_B T_B\right)} \delta^{ab}.$$

計算の例 (A, B, S) ~ (3, 3, 1)

$$\mathcal{L} = (\bar{\psi}_B)_j \delta_i^j (s + \gamma_5 a)(\psi_A)^i S$$

$\longrightarrow$ $X_{\bar{B}AS} = \delta_i^j$

$\longrightarrow$ $X_{\bar{B}AS} (T^a)_{AA'} (T^b)_{A'A''} X^\dagger_{\bar{A}''B\bar{S}} = \mathrm{tr}(T^a T^b) = \frac{1}{2}\delta^{ab}$

$\longrightarrow$ (A, B, S) ~ (3, 3, 1) のとき

$$(X T_A T_A X^\dagger) = \frac{1}{2}$$

カラーの表現で決まる因子 (2/2)

いろいろな表現における因子

(A,B,S)	$\psi_A\ \psi_B\ S$	$X_{\bar{B}AS}$	$XT_AT_AX^\dagger$	$XT_AX^\dagger T_B$	$XX^\dagger T_BT_B$
$(3,3,1)$	$(\psi_A)^a\ (\psi_B)^b\ S$	δ^b_a	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
$(3,1,\bar{3})$	$(\psi_A)^a\ (\psi_B)\ S_i$	δ^i_a	$\frac{1}{2}$	0	0
$(1,3,3)$	$(\psi_A)\ (\psi_B)^b\ S^i$	δ^b_i	0	0	$\frac{1}{2}$
$(\bar{6},1,6)$	$(\psi_A)_{ab}\ (\psi_B)\ S^{ij}$	$\frac{\delta^a_i\delta^b_j+\delta^a_j\delta^b_i}{2}$	$\frac{5}{2}$	0	0
$(6,6,1)$	$(\psi_A)^{ij}\ (\psi_B)^{kl}\ S$	$\frac{\delta^k_i\delta^l_j+\delta^k_j\delta^l_i}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$	$\frac{5}{2}$
$(3,\bar{3},3)$	$(\psi_A)^i\ (\psi_B)_j\ S^k$	ϵ_{ijk}	1	$\frac{1}{2}$	1
$(\bar{3},3,6)$	$(\psi_A)_a\ (\psi_B)^b\ S^{ij}$	$\frac{\delta^b_i\delta^a_j+\delta^b_j\delta^a_i}{2}$	1	$-\frac{1}{4}$	1
$(3,3,8)$	$(\psi_A)^i\ (\psi_B)^j\ (S^aT^a)$	$(T^a)^j{}_i$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{12}$	$\frac{2}{3}$

結果

$$w = -\frac{g_s^3}{(4\pi)^4} 6\mathrm{Im}(sa^*) m_A m_B$$
$$\times \left\{ \left(X T_A T_A X^\dagger\right) f_1(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + \left(X X^\dagger T_B T_B\right) f_1(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right.$$
$$\left. + \left(X T_A X^\dagger T_B\right) \left[f_2(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + f_2(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right] \right\}$$

(When you use the same vertex twice, multiply 1/2)

$$\mathcal{L} \supset -\frac{w}{3} f^{abc} G^a_{\mu\nu} G^{b\nu}_{\ \ \rho} \tilde{G}^{c\rho\mu}$$

$$g_{\bar{B}AS} = X_{\bar{B}AS}(s + \gamma_5 a),$$
$$g_{\bar{A}B\bar{S}} = X^\dagger_{\bar{A}B\bar{S}}(s^* - \gamma_5 a^*)$$

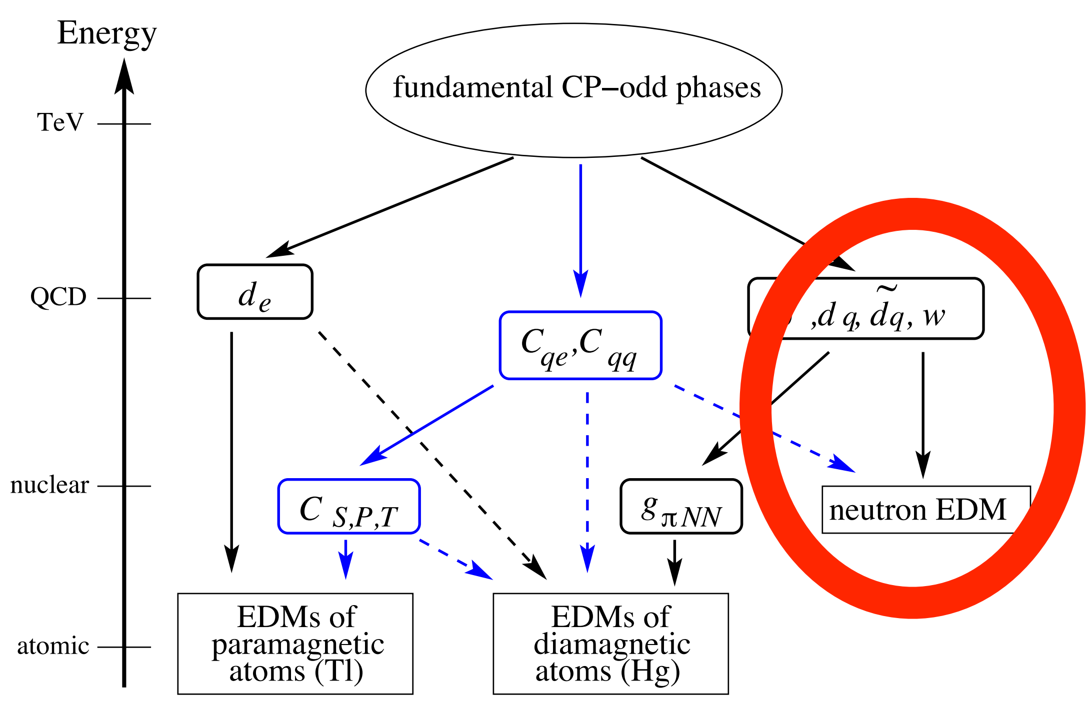
$$f_1(m_A^2, m_B^2, m_S^2) \equiv \int_0^\infty d\ell_E^2 \int_0^1 dz \frac{-\ell_E^4 z(1-z)}{\left(m_S^2 z + m_B^2(1-z) + \ell_E^2 z(1-z)\right)\left(\ell_E^2 + m_A^2\right)^4}$$

$$f_2(m_A^2, m_B^2, m_S^2) \equiv \int_0^\infty d\ell_E^2 \int_0^1 dz \frac{\ell_E^4 (1-z)}{\left(m_S^2 z + m_B^2(1-z) + \ell_E^2 z(1-z)\right)\left(\ell_E^2 + m_A^2\right)^4}$$

公式の使用例

適用例

中性子EDM と Weinberg operator の関係



$$d_N(w) = \pm e\, \Lambda_{\mathrm{nEDM}}\, w(1\ \mathrm{GeV}), \qquad (N = n, p),$$

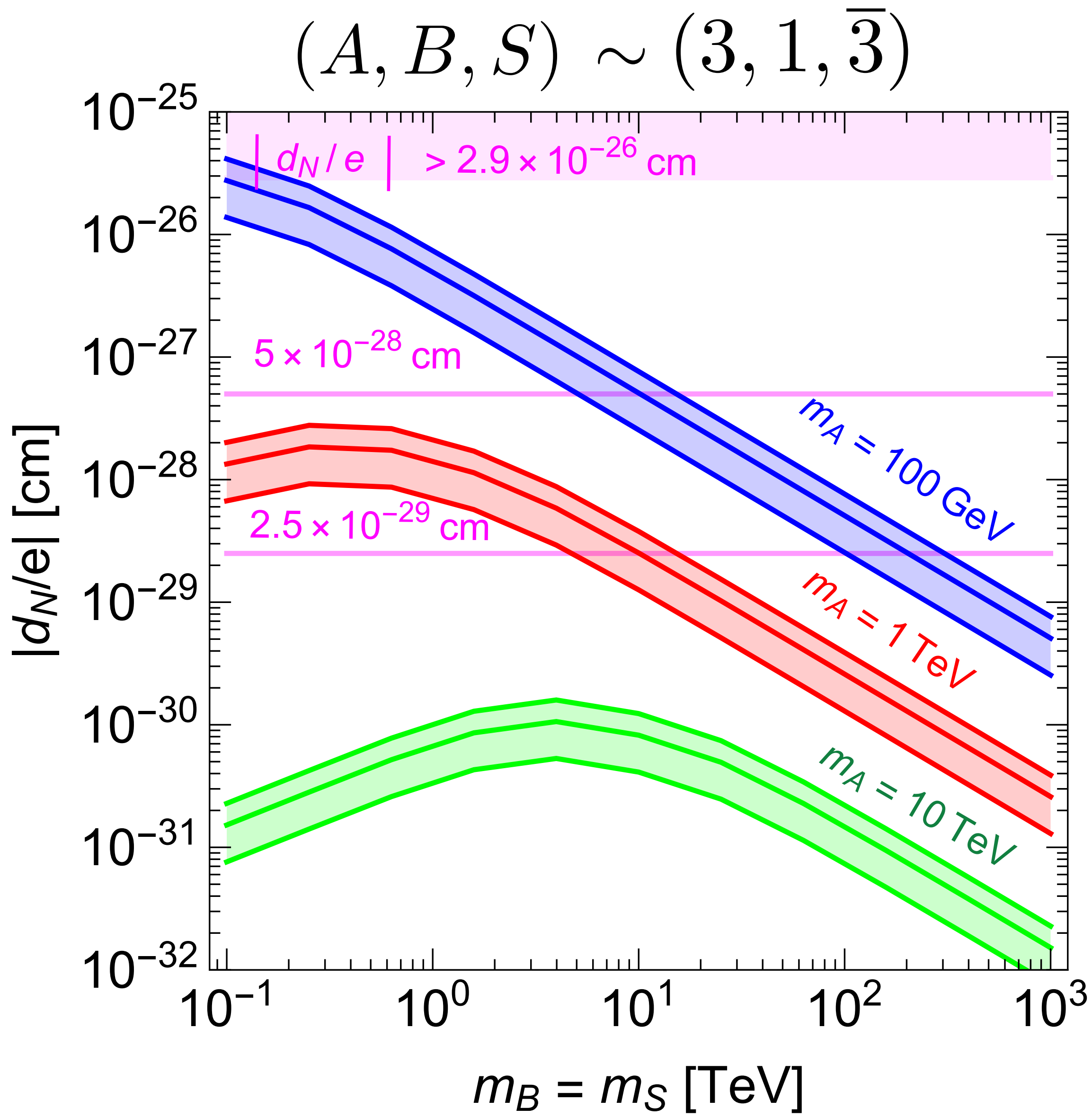
$$\Lambda_{\mathrm{nEDM}} = 10 - 30\ \mathrm{MeV}$$

[Demir-Pospelov-Ritz ’03, ⋯]

w のくりこみ群 [Degrassi-Franco-Marchetti-Silvestrini ’05]

$$\frac{d}{d\ln\mu} w(\mu) = \frac{g_s^2(\mu)}{16\pi^2}(N_C + 2N_f) w(\mu)$$

適用例



Im(sa*) = 0.25

current bound
[Barker et.al. hep-ex/0602020]

prospect 1
[Altarev et al. Nucl. Instrum. Meth. A 611, 133 (2009)]

prospect 2
[Lehrach et al. 1201.5773]

まとめ

まとめ

EDM

- ⋆ P と CP の破れに感度がある
- ⋆ 見つかったら標準模型を超える物理の存在が確定
- ⋆ 中性子EDMの計算に Weinberg operator (GGG~) の係数が必要

我々のしたこと

- ⋆ GGG~ の係数を求める公式を導出
- ⋆ 皆さん是非お使いください

$$
\begin{aligned}
w = &-\frac{g_s^3}{(4\pi)^4} 6\mathrm{Im}(sa^*) m_A m_B \\
&\times \Bigg\{ \left(X T_A T_A X^\dagger\right) f_1(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + \left(X X^\dagger T_B T_B\right) f_1(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \\
&\quad + \left(X T_A X^\dagger T_B\right) \left[f_2(m_A^2, m_B^2, m_S^2) + f_2(m_B^2, m_A^2, m_S^2) \right] \Bigg\}
\end{aligned}
$$

(When you use the same vertex twice, multiply 1/2)