中性子電気双極子能率とTeVスケールの物理

久野純治（名大理）

特定領域研究「フレーバー物理の新展開」研究会 2012

日程: 2012年7月6日(金)〜8日(日)

場所: 奈良県吉野郡吉野町 芳雲館

主催: 特定領域研究「フレーバー物理の新展開」

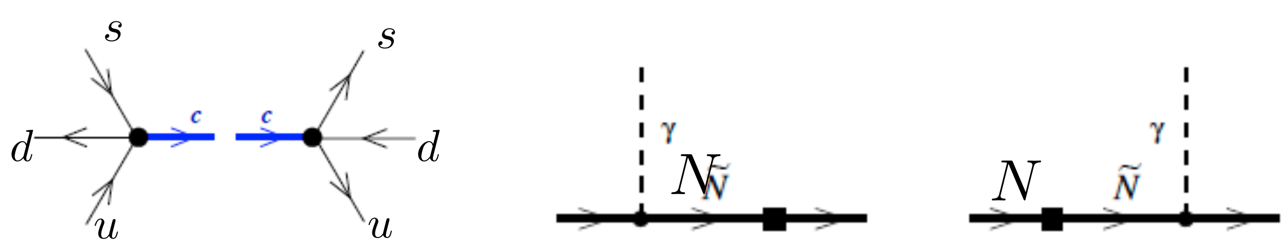
Introduction

- 電気双極子能率(EDM)はT-odd、P-oddなので、CPT対称性の下、CP対称性に感度がある。

$$H = -\mu\ \mathbf{B}\cdot\frac{\mathbf{S}}{S} - d\ \mathbf{E}\cdot\frac{\mathbf{S}}{S}$$

- 小林・益川CP位相は中性子EDMを予言するが現在までの観測からくる上限($|d_n| < 2.9\times 10^{-26} e\mathrm{cm}$)より小さい。

$$|d_n| \sim 10^{-31} e\mathrm{cm}$$ (Mannel and Uraltsev (12))



- TeVスケールの物理におけるCPの破れに対して感度がある。

中性子EDMの評価

CPを破る次元6以下の有効相互作用

$$\mathcal{L}_{\mathrm{CPV}} = \theta\frac{\alpha_s}{8\pi}G^A_{\mu\nu}\widetilde{G}^{A\mu\nu} - \frac{i}{2}\sum_{q=u,d,s} d_q\,\overline{q}(F\cdot\sigma)\gamma_5 q - \frac{i}{2}\sum_{q=u,d,s}\tilde{d}_q\,\overline{q}g_s(G\cdot\sigma)\gamma_5 q + \frac{1}{3}wf_{ABC}G^A_{\mu\nu}\tilde{G}^{B\nu\lambda}G^{C\mu}_{\lambda}.$$

1. TeVスケールの新粒子を積分することでWilson係数の導出
2. Wilson係数に対するQCD補正の評価
3. ハドロンスケールでのWilson係数から中性子EDMの評価
   - Naïve dimensional analysis
   - Chiral lagrangian
   - QCD 和則
   - Lattice QCD

QCD和則による中性子EDMの評価

背景電磁場中での中性子カレントの2点関数

$$\Pi(q) \equiv i \int d^4x \; e^{iq\cdot x} \; \langle \Omega_{\not{C}\not{P}} | T\{\eta_n(x)\bar{\eta}_n(0)\} | \Omega_{\not{C}\not{P}} \rangle_F$$

中性子カレント

$$\eta_n(x) = j_1(x) + \beta j_2(x)$$

$$j_1(x) = 2\epsilon_{abc} \left(d_a^T(x) C\gamma_5 u_b(x) \right) d_c(x)$$

$$j_2(x) = 2\epsilon_{abc} \left(d_a^T(x) C u_b(x) \right) \gamma_5 d_c(x)$$

中性子1粒子状態

$$\langle \Omega_{\not{C}\not{P}} | \eta_n(x) | N_{\not{C}\not{P}}(\boldsymbol{p}, s) \rangle = \lambda_n e^{\frac{i}{2}\alpha_n \gamma_5} \; u_n(\boldsymbol{p}, s) \; e^{-ip\cdot x}$$

現象論-side

背景電磁場中での中性子カレントの2点関数中の双極子項

$$\frac{P}{2(q^2-m_n^2)^2} \equiv \frac{1}{2(q^2-m_n^2)^2}(\not{q}+m_n)(\mu_n F\sigma - d_n \tilde{F}\sigma)(\not{q}+m_n)$$

$U(1)_A$ 変換の下で不変な項によって中性子EDMを求める。

(Pospelov&Ritz)

$$\Pi^{(\mathrm{phen})}(q) = \frac{1}{2} f(q^2)\{\tilde{F}\cdot\sigma, \not{q}\} + \dots$$

$$f(q^2) = \left(\frac{\lambda_n^2 d_n m_n}{(q^2-m_n^2)^2} + \frac{A(q^2)}{q^2-m_n^2} + B(q^2)\right)$$

励起状態、連続状態の寄与

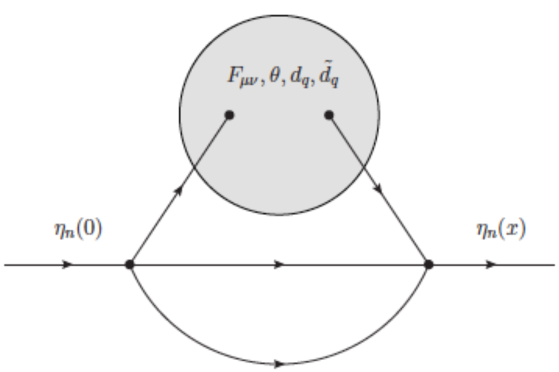
中性子と励起状態混合の寄与

OPE-side

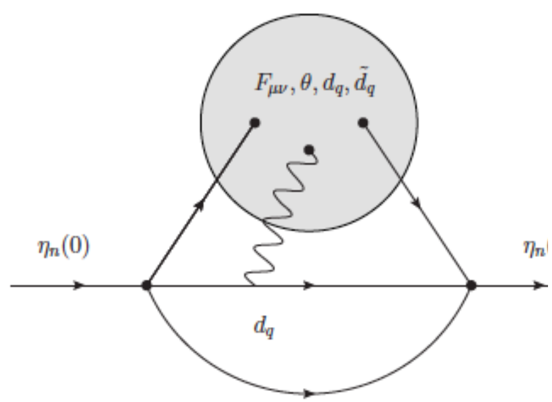
$\beta = +1$ にとってOPEを計算する。

- NLOがゼロになり、計算精度がよくなる。
- η_n と $\gamma_5\eta_n$ の混合を計算する必要がなくなる。

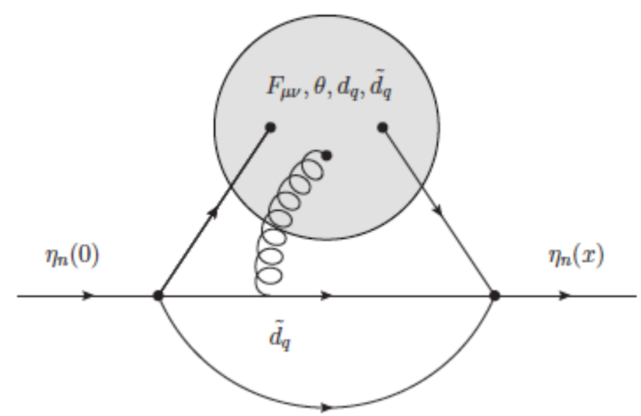
$$
\begin{aligned}
\Pi(q)^{(\mathrm{OPE})} =& \frac{1}{16\pi^2}\langle\bar{q}q\rangle \log\left(\frac{-q^2}{\Lambda^2}\right)\{\tilde{F}\cdot\sigma, \not{q}\}\Big[(4e_d m_d \rho_d - e_u m_u \rho_u)\chi\bar{\theta} \\
&+ (4d_d - d_u) + (\kappa - \frac{1}{2}\xi)(4e_d\tilde{d}_d - e_u\tilde{d}_u)\Big] \ .
\end{aligned}
$$



LO



NLO



NLO

和則の導出

$$\mathcal{B}[C^{(\mathrm{phen})}(Q^2)] = \mathcal{B}[C^{(\mathrm{OPE})}(Q^2)] \quad (Q^2 \equiv -q^2)$$

Borel 変換: $\mathcal{B}[f(Q^2)] \equiv \lim_{\substack{Q^2, n\to\infty \\ Q^2/n = M^2}} \frac{(Q^2)^{n+1}}{n!}\left(\frac{-d}{dQ^2}\right)^n f(Q^2)$

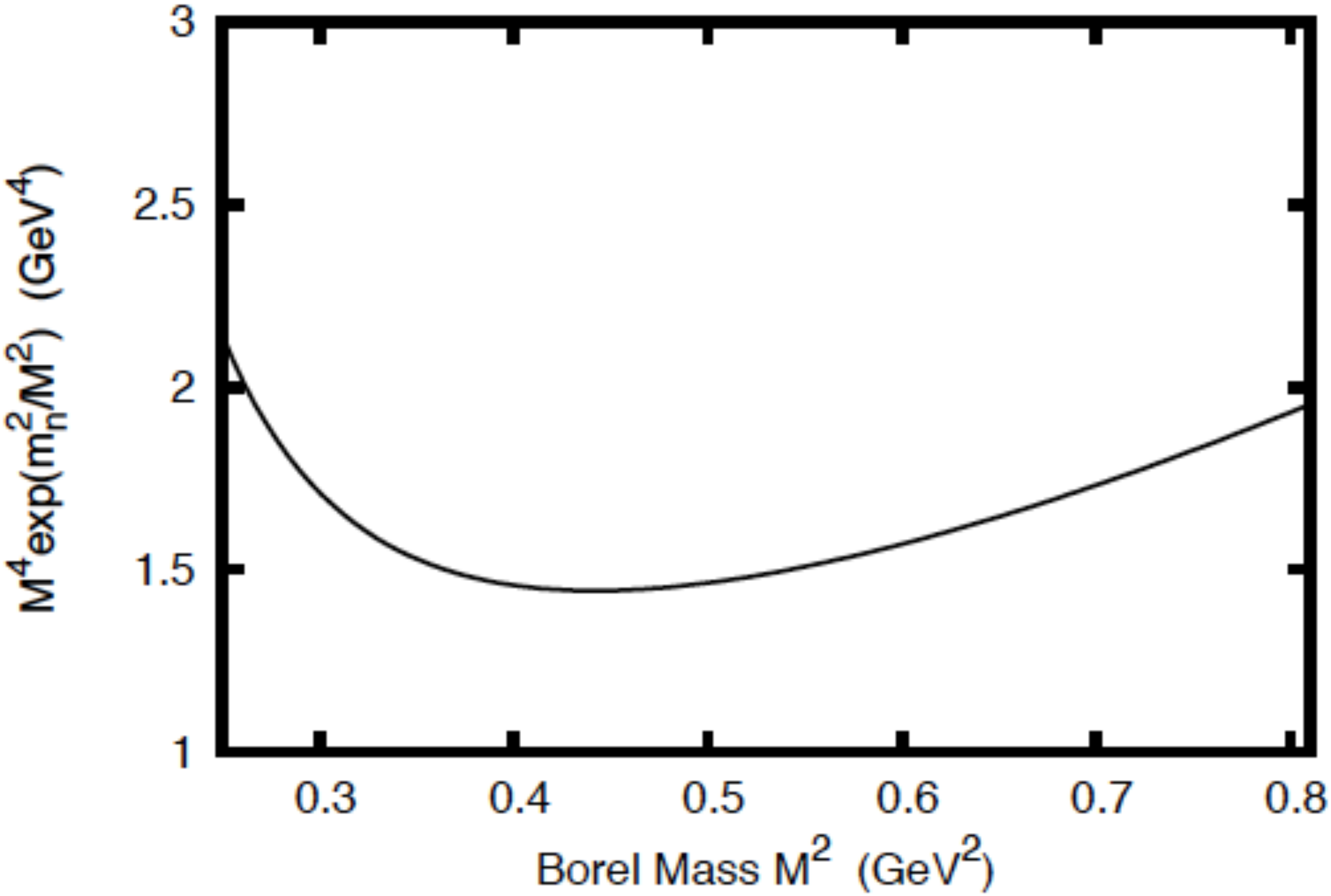
$$C^{(\mathrm{phen})}(Q^2) \equiv \frac{1}{2}\left[\frac{\lambda_n^2 d_n m_n}{(Q^2+m_n^2)^2} - \frac{A}{Q^2+m_n^2}\right]$$

$$C^{(\mathrm{OPE})}(Q^2) \equiv \frac{1}{16\pi^2}\langle\bar{q}q\rangle\Theta\log\left(\frac{Q^2}{\Lambda^2}\right)$$

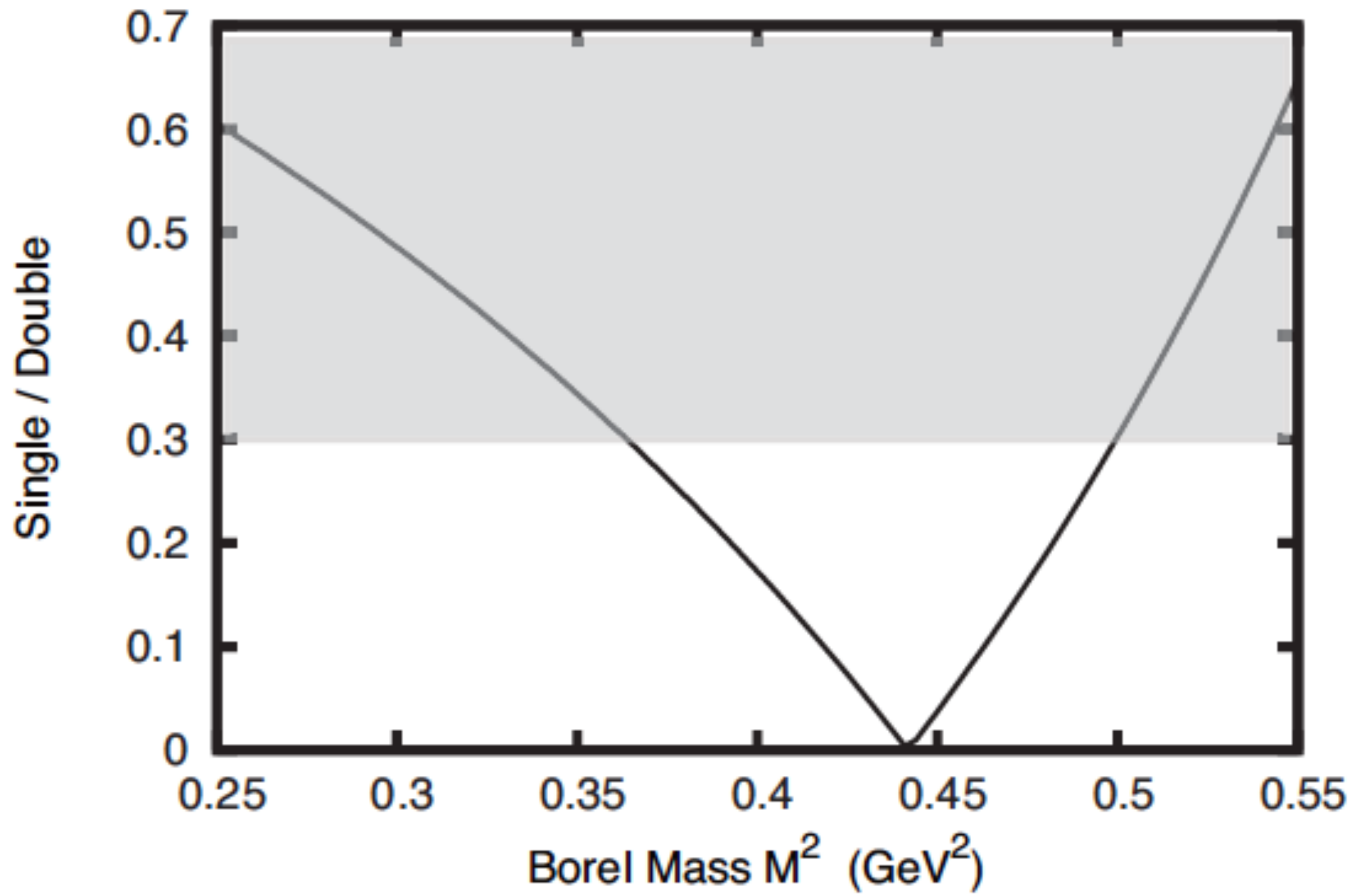
$$\Theta \equiv (4e_d m_d \rho_d - e_u m_u \rho_u)\chi\bar{\theta} + (4d_d - d_u) + (\kappa - \frac{1}{2}\xi)(4e_d\tilde{d}_d - e_u\tilde{d}_u)$$

和則: $\lambda_n^2 d_n m_n - AM^2 = -\Theta\langle\bar{q}q\rangle\frac{M^4}{8\pi^2}e^{\frac{m_n^2}{M^2}}$

$$\lambda_n^2 d_n m_n - AM^2 = -\Theta\langle\bar{q}q\rangle\frac{M^4}{8\pi^2}e^{\frac{m_n^2}{M^2}}$$



$$\lambda_n^2 d_n m_n - AM^2 = -\Theta\langle\bar{q}q\rangle \frac{M^4}{8\pi^2} e^{\frac{m_n^2}{M^2}}$$



中性子EDMの導出

Low-energy constant: $\lambda_n = -0.0480 \pm 0.0052_{\rm (stat)} \pm 0.0092_{\rm (syst)}\ {\rm GeV}^3$

lattice QCD (RBC-UKQCD)

$$d_n = 1.2\ {}^{+0.6}_{-0.3} \pm 0.1\ {}^{+0.7}_{-0.4} \times 10^{-1}\ \Theta$$

（JH, Nagata, Shimizu)

（系統誤差：現象論サイド、OPEサイド、low-energy constantの順番）

中心値をとったとき

$$\begin{aligned} d_n = & \ 4.2 \times 10^{-17}\bar{\theta}\ [e\ {\rm cm}] + 0.47 d_d - 0.12 d_u \\ & + e(-0.18\tilde{d}_u + 0.18\tilde{d}_d - 0.008\tilde{d}_s) \end{aligned}$$

$$d_n^{\rm PQ} = 0.47 d_d - 0.12 d_u + e(0.35\tilde{d}_d + 0.17\tilde{d}_u)$$

中性子EDMの導出

Low-energy constant: $\lambda_n = -0.0436 \pm 0.0047_{(\mathrm{stat})} \pm 0.0084_{(\mathrm{syst})}\ \mathrm{GeV}^3$

lattice QCD (RBC-UKQCD)

$$d_n = 1.2\ ^{+0.6}_{-0.3} \pm 0.1\ ^{+0.7}_{-0.4} \times 10^{-1}\ \Theta$$

中性子運動項係数のQCD和則の結果（β=-1）を使った場合
(Pospelov&Ritz)

$\lambda_n^2 = 1.05/(2\pi)^4\ \mathrm{GeV}^6$ $d_n = 3.3 \times 10^{-1}\ \Theta.$

より現実的な中性子質量のQCD和則の結果

$\lambda_n \simeq 0.022\ \mathrm{GeV}^3$,（Leinweber） $d_n = 4.6 \times 10^{-1}\ \Theta$

中性子EDMの評価

CPを破る次元6以下の有効相互作用

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\rm CPV} = \quad & \theta\frac{\alpha_s}{8\pi}G^A_{\mu\nu}\widetilde{G}^{A\mu\nu} \\
& -\frac{i}{2}\sum_{q=u,d,s} d_q\,\overline{q}(F\cdot\sigma)\gamma_5 q - \frac{i}{2}\sum_{q=u,d,s}\tilde{d}_q\,\overline{q}g_s(G\cdot\sigma)\gamma_5 q \\
& +\frac{1}{3}wf_{ABC}G^A_{\mu\nu}\tilde{G}^{B\nu\lambda}G^{C\mu}_{\lambda}.
\end{aligned}
$$

1. TeVスケールの新粒子を積分することでWilson係数の導出
2. Wilson係数に対するQCD補正の評価
3. ハドロンスケールでのWilson係数から中性子EDMの評価
    - Naïve dimensional analysis
    - Chiral lagrangian
    - QCD 和則
    - Lattice QCD

Wilson係数のくりこみ群の方程式

CPを破る次元6以下の有効相互作用

$$\mathcal{L}_{\rm CPV} = \sum_{i=1,2,4,5} \sum_{q} C_i^q(\mu) \mathcal{O}_i^q(\mu) + C_3(\mu)\mathcal{O}_3(\mu) + \sum_{i=1,2} \sum_{q' \neq q} \widetilde{C}_i^{q'q}(\mu) \widetilde{\mathcal{O}}_i^{q'q}(\mu) + \frac{1}{2} \sum_{i=3,4} \sum_{q' \neq q} \widetilde{C}_i^{q'q}(\mu) \widetilde{\mathcal{O}}_i^{q'q}(\mu)$$

$$\mathcal{O}_1^q = -\frac{i}{2} m_q \bar{q}\, e Q_q (F \cdot \sigma) \gamma_5 q \,,$$

$$\mathcal{O}_2^q = -\frac{i}{2} m_q \overline{q}\, g_s (G \cdot \sigma) \gamma_5 q \,,$$

$$\mathcal{O}_3 = -\frac{1}{6} g_s f^{ABC} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G^A_{\mu\lambda} G^B{}_{\nu}{}^{\lambda} G^C_{\rho\sigma}$$

$$\mathcal{O}_4^q = \overline{q_\alpha} q_\alpha \overline{q_\beta}\, i\gamma_5 q_\beta \,,$$

$$\mathcal{O}_5^q = \overline{q_\alpha} \sigma^{\mu\nu} q_\alpha \overline{q_\beta}\, i\sigma_{\mu\nu} \gamma_5 q_\beta \,,$$

$$\widetilde{\mathcal{O}}_1^{q'q} = \overline{q'_\alpha} q'_\alpha \overline{q_\beta}\, i\gamma_5 q_\beta \,,$$

$$\widetilde{\mathcal{O}}_2^{q'q} = \overline{q'_\alpha} q'_\beta \overline{q_\beta}\, i\gamma_5 q_\alpha \,,$$

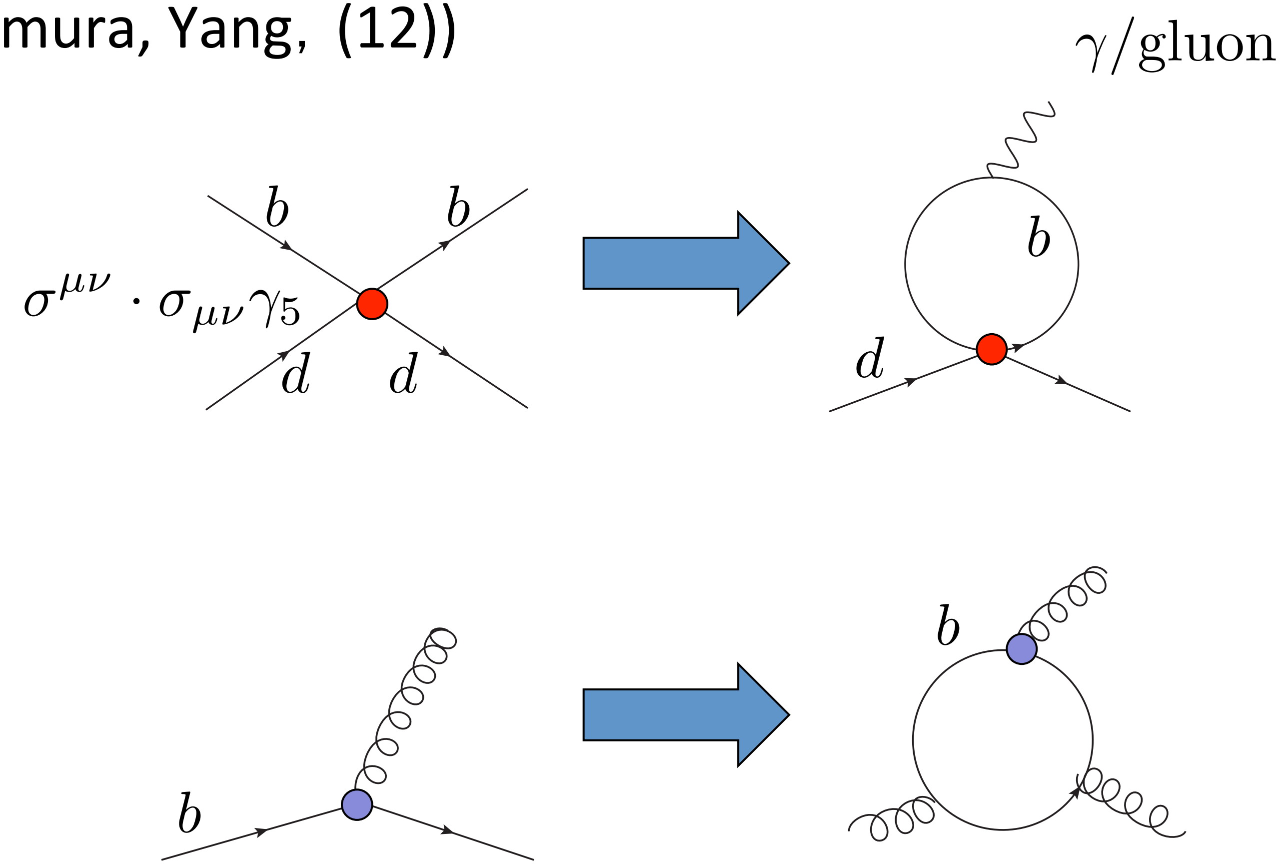
$$\widetilde{\mathcal{O}}_3^{q'q} = \overline{q'_\alpha} \sigma^{\mu\nu} q'_\alpha \overline{q_\beta}\, i\sigma_{\mu\nu} \gamma_5 q_\beta \,,$$

$$\widetilde{\mathcal{O}}_4^{q'q} = \overline{q'_\alpha} \sigma^{\mu\nu} q'_\beta \overline{q_\beta}\, i\sigma_{\mu\nu} \gamma_5 q_\alpha \,.$$

四体フェルミの相互作用も含めた。

CPを破る重いクォークの相互作用

重いクォークを積分することで、軽いクォークのEDM/CEDMおよびWeinberg operator に補正が生じる。次元6までのくりこみ群の方程式および接続条件により評価を行った。
（JH, Tsumura, Yang, (12))



Higgs bosonによるEDM

$$\mathcal{L}_\phi = 2^{1/4} G_F^{1/2} m_q \overline{q_\alpha}(f_S^q + i\, f_P^q \gamma_5) q_\alpha \phi,$$

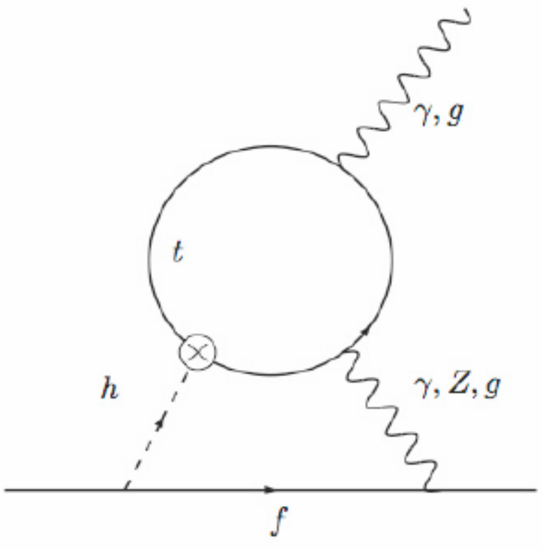
スカラータイプの4クォーク演算子から、軽いクォークのCEDMは2ループにより、EDMは2また3ループのダイアグラムにより生じる。

O(α_s)の2 ループレベルで

$$C_2^q = \frac{\alpha_s}{8\pi^3}\frac{m_{q'}}{m_q}\left(\ln\frac{m_\phi}{m_{q'}}\right)^2\left[\widetilde{C}_1^{q'q} + \widetilde{C}_1^{qq'}\right].$$

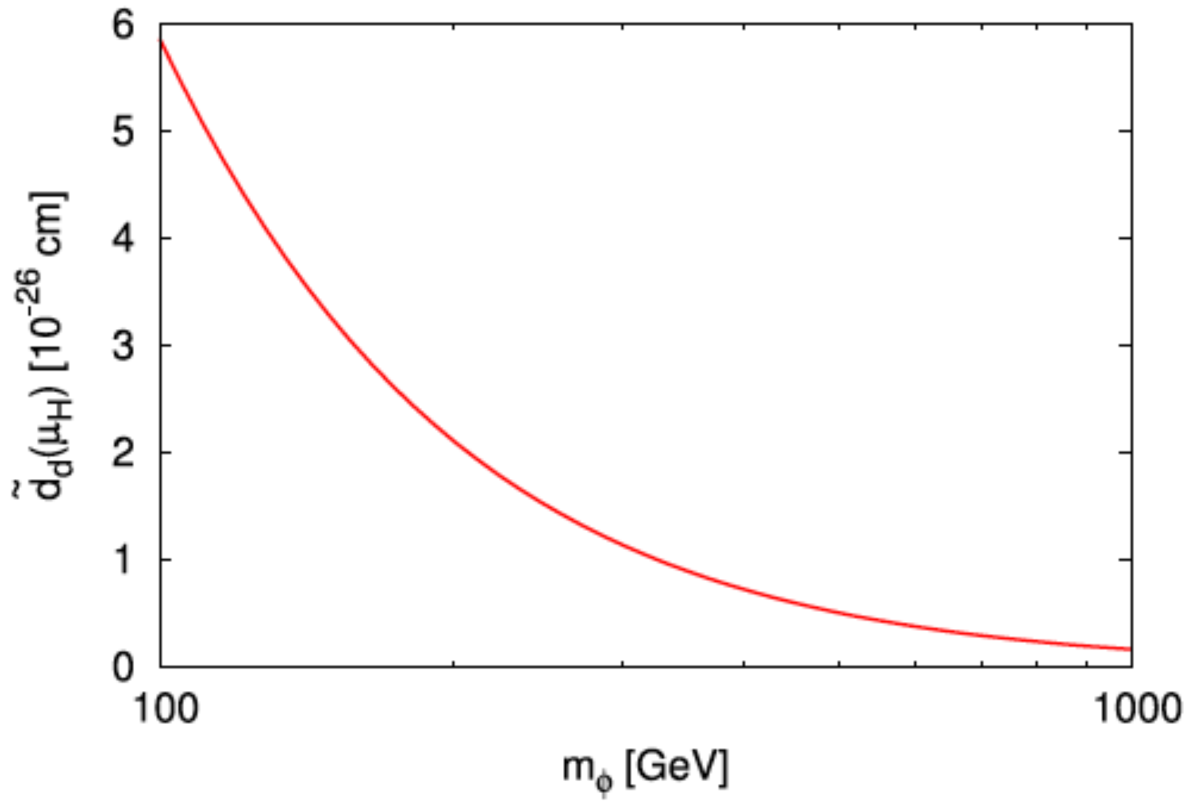
$$C_1^q = 0$$

Barr-Zee diagrams



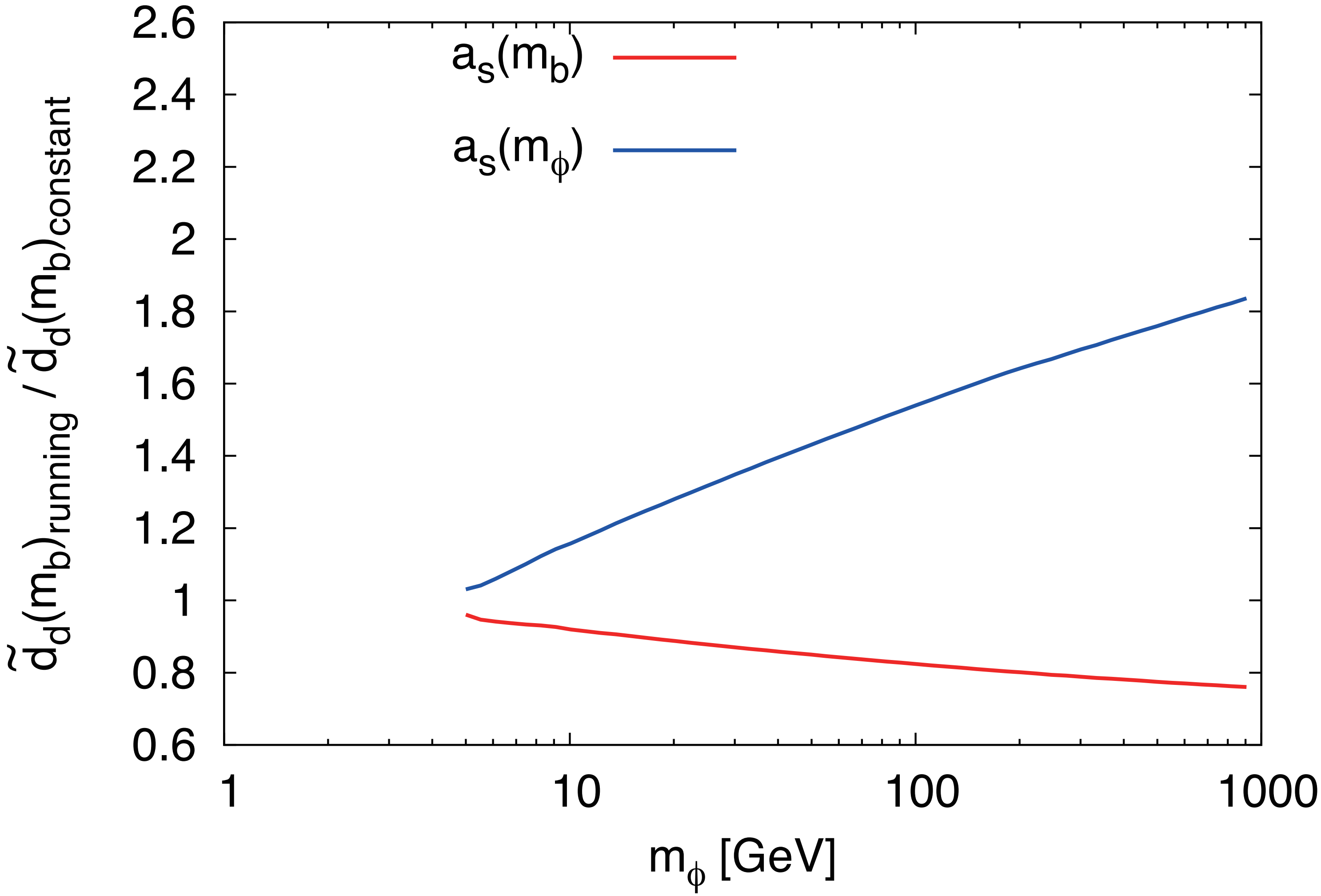
Higgs bosonによるEDM

$$f_S^d = f_P^d = 1 \qquad f_S^b = f_P^b = 1.$$



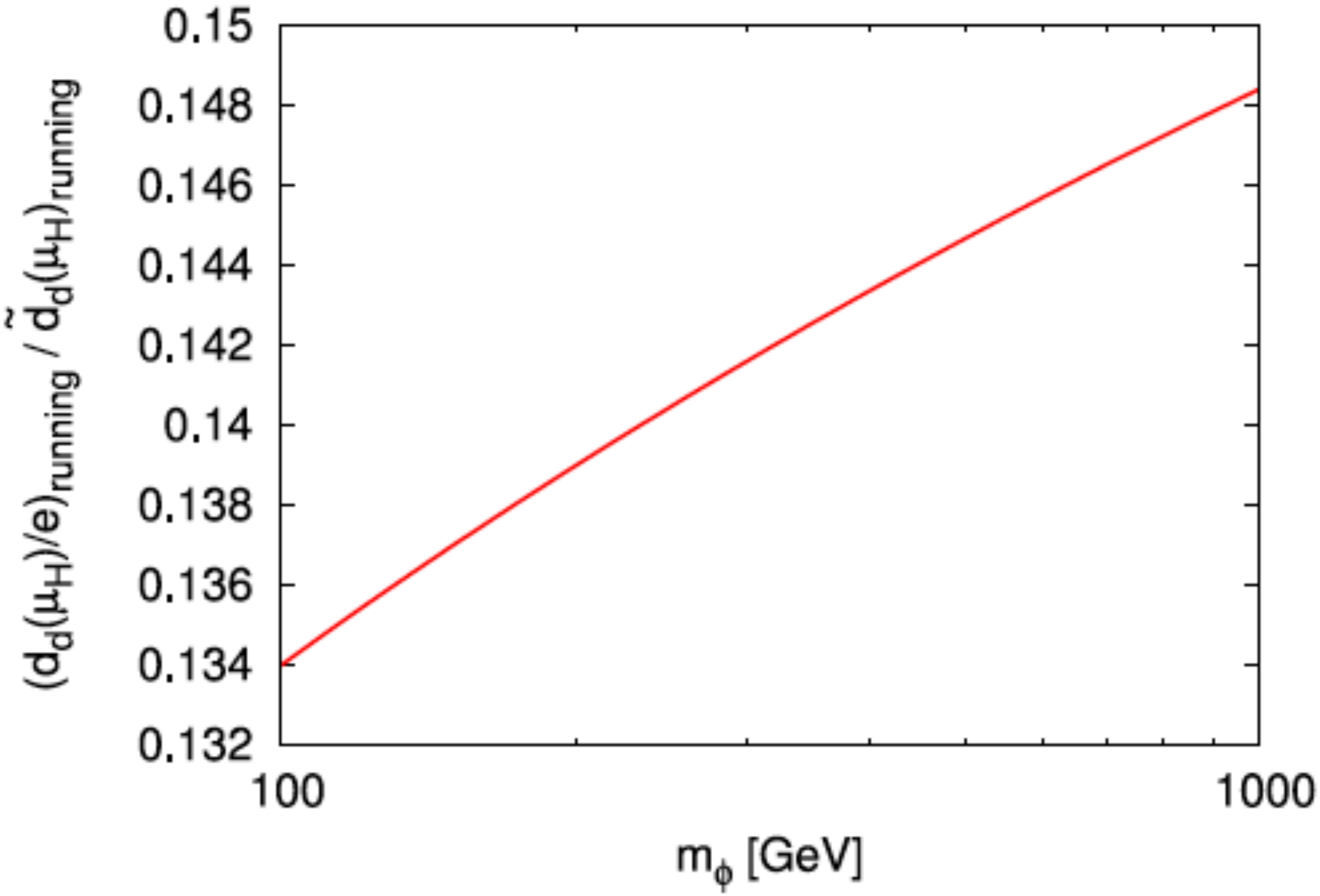
Higgs bosonによるEDM

$$f_S^d = f_P^d = 1 \qquad f_S^b = f_P^b = 1.$$



Higgs bosonによるEDM

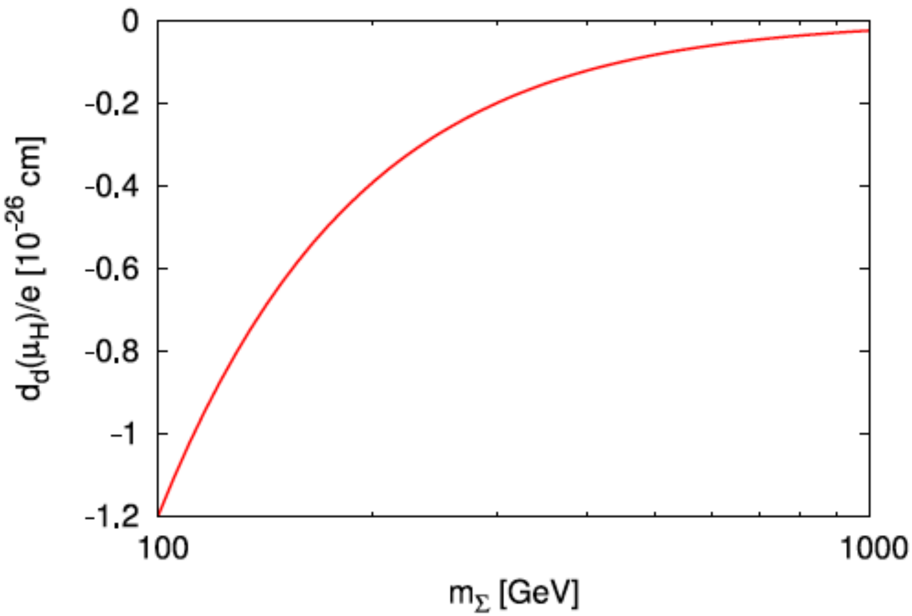
$$f_S^d = f_P^d = 1 \qquad f_S^b = f_P^b = 1.$$

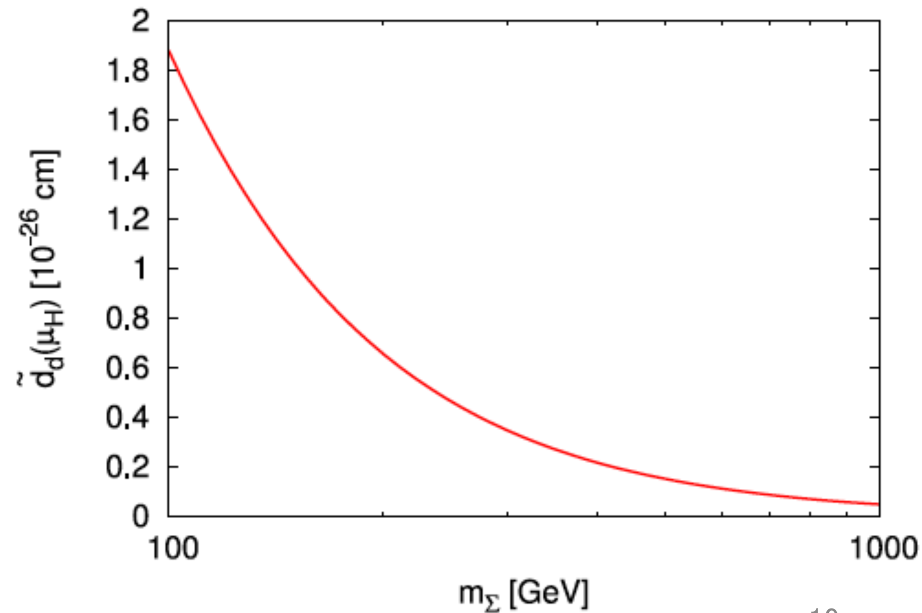


Color octet bosonによるEDM

$$\mathcal{L}_\Sigma = 2^{1/4} G_F^{1/2} m_q \overline{q_\alpha} (f_S^q + i\, f_P^q \gamma_5) q_\beta \Sigma_{\alpha\beta}$$

$$f_S^d = f_P^d = 1 \qquad f_S^b = f_P^b = 1.$$





中性子EDMの評価

CPを破る次元6以下の有効相互作用

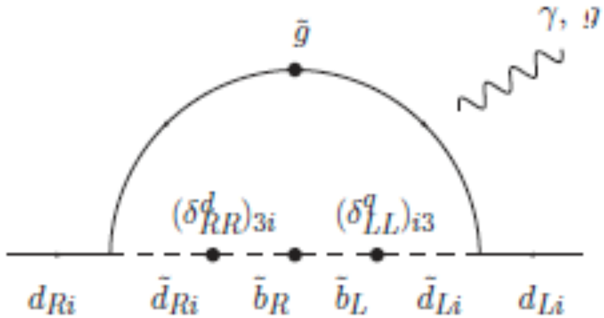
$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\mathrm{CPV}} = \quad & \theta\frac{\alpha_s}{8\pi}G^A_{\mu\nu}\widetilde{G}^{A\mu\nu} \\ & -\frac{i}{2}\sum_{q=u,d,s} d_q\,\overline{q}(F\cdot\sigma)\gamma_5 q - \frac{i}{2}\sum_{q=u,d,s}\tilde{d}_q\,\overline{q}g_s(G\cdot\sigma)\gamma_5 q \\ & + \frac{1}{3}w f_{ABC}G^A_{\mu\nu}\tilde{G}^{B\nu\lambda}G^{C\mu}_{\lambda}.\end{aligned}$$

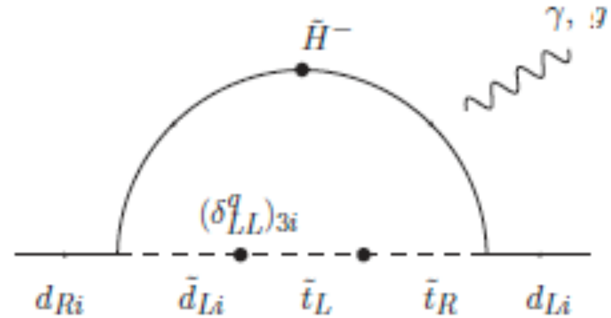
1. TeVスケールの新粒子を積分することでWilson係数の導出
2. Wilson係数に対するQCD補正の評価
3. ハドロンスケールでのWilson係数から中性子EDMの評価
   - Naïve dimensional analysis
   - Chiral lagrangian
   - QCD 和則
   - Lattice QCD

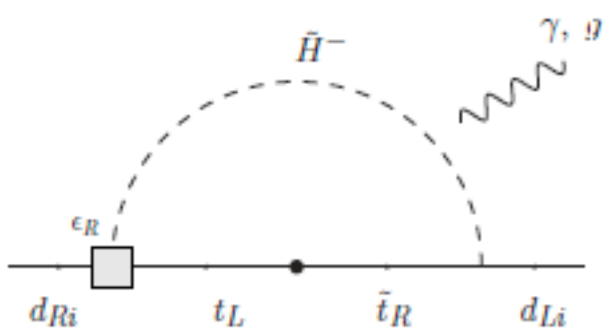
超対称模型における
フレーバーの破れ起源のEDM

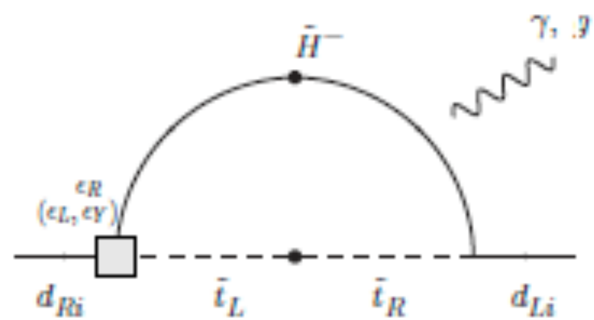
2種類のフレーバー混合があると大きなEDMが期待できる。

$$(\delta^q_{LL})_{ij} \equiv \frac{(m^2_{\tilde{q}})_{ij}}{m^2_{\tilde{q}}}, \quad (\delta^d_{RR})_{ij} \equiv \frac{(m^2_{\tilde{d}})_{ij}}{m^2_{\tilde{d}}}, \quad (\delta^u_{RR})_{ij} \equiv \frac{(m^2_{\tilde{u}})_{ij}}{m^2_{\tilde{u}}},$$

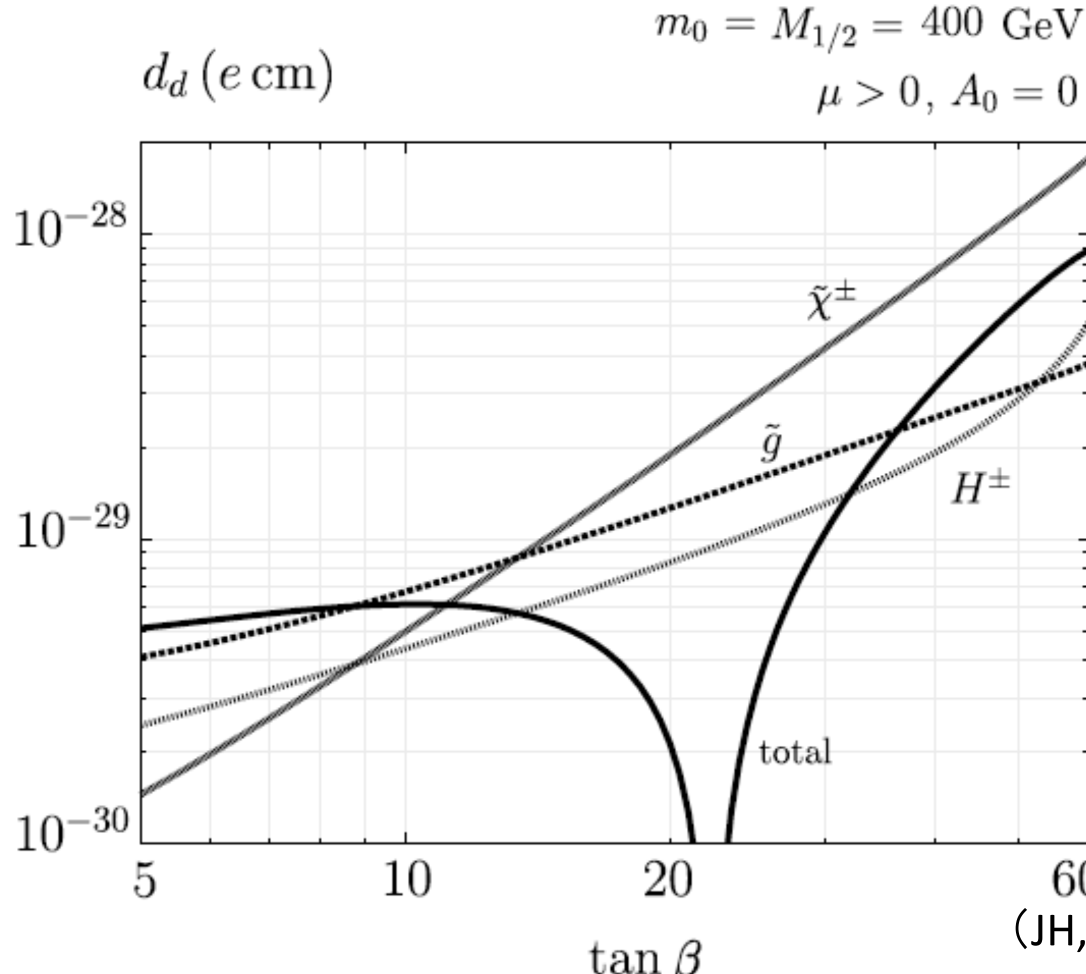






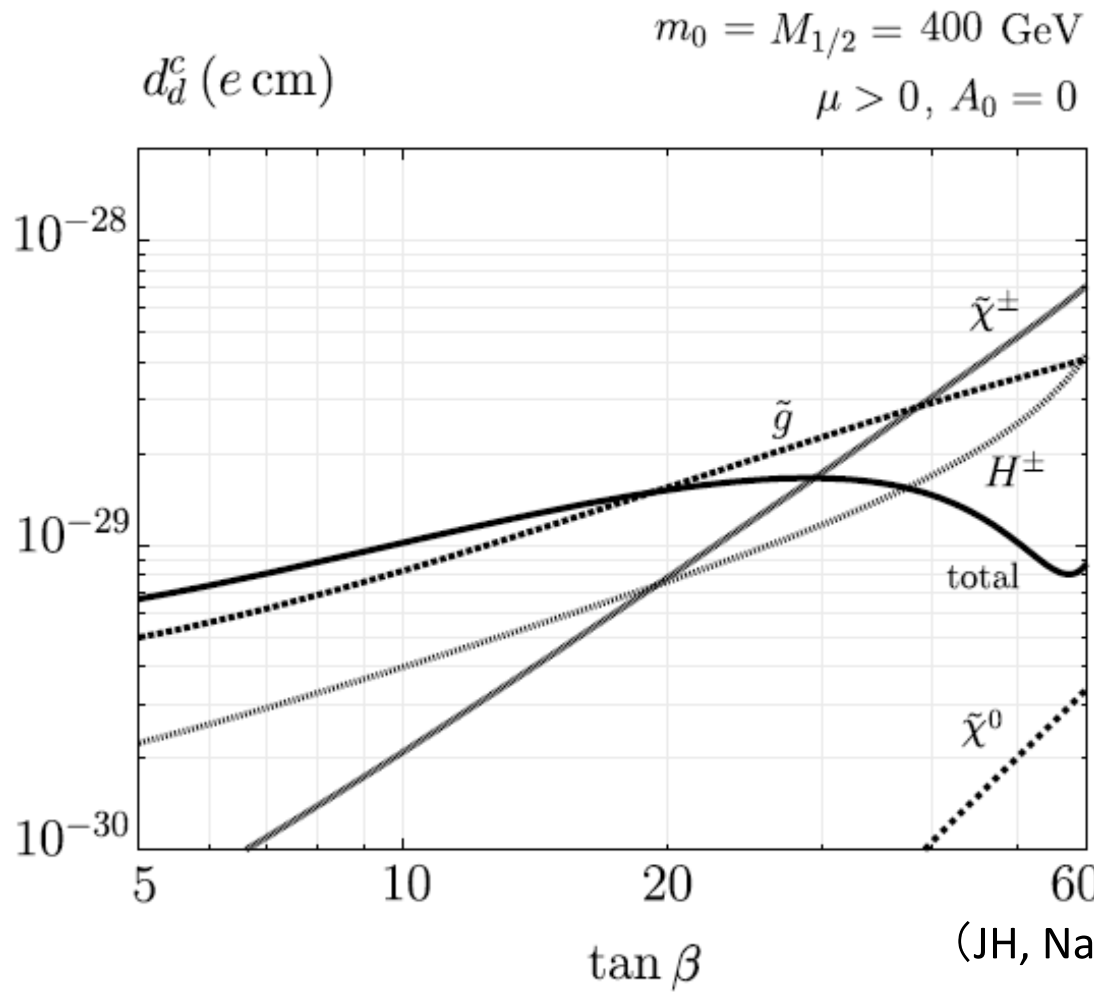


右巻きニュートリノをもつ超対称大統一模型



(JH, Nagai, Paradisi)

右巻きニュートリノをもつ超対称大統一模型



(JH, Nagai, Paradisi)

中性子EDMの評価

1，TeVスケールの新粒子を積分することでWilson係数の導出
超対称模型におけるフレーバーの破れ起源のEDM

２，Wilson係数に対するQCD補正の評価
次元６までの演算子すべてをいれて導出。4体フェルミの効果を評価

3，ハドロンスケールでのWilson係数から中性子EDMの評価
QCD 和則による導出