

電弱相互作用を行う 暗黒物質の検証について

久野 純治 (名古屋大学)

学術変革領域(A)「極稀事象で探る宇宙物質の起源と進化：新たな宇宙
物質観創生のフロンティア」

領域研究会

日時：2025年06月25日(水)～26日(木)

会場：東京大学駒場キャンパス

電弱相互作用を行う暗黒物質

- $SU(2)_L$ 多重項の電気的中性成分。ただし、実スカラー（またはベクター）かマヨラナフェルミオン
- 熱的残存仮説は、暗黒物質粒子の質量はTeVスケールか、それ以上
- 多くの素粒子模型で予言
 - 例）超対称模型におけるウィノ、ヒッグシーノ
 - 余剰次元、スコトジェニック模型、拡張ヒッグス模型など

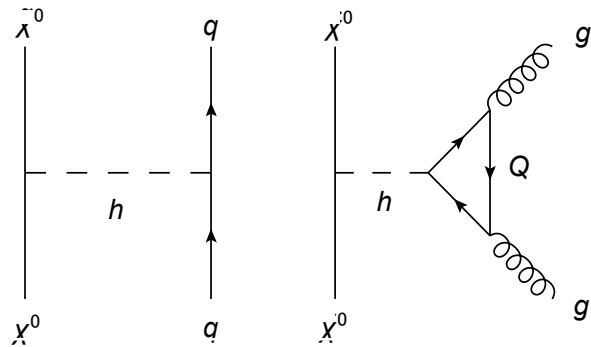
電弱相互作用を行う暗黒物質の検出方法

1. 対消滅起源のガンマ線観測（特に、ラインガンマ線）
2. 原子核弾性散乱観測による直接探索
3. 電子の電気双極子能率

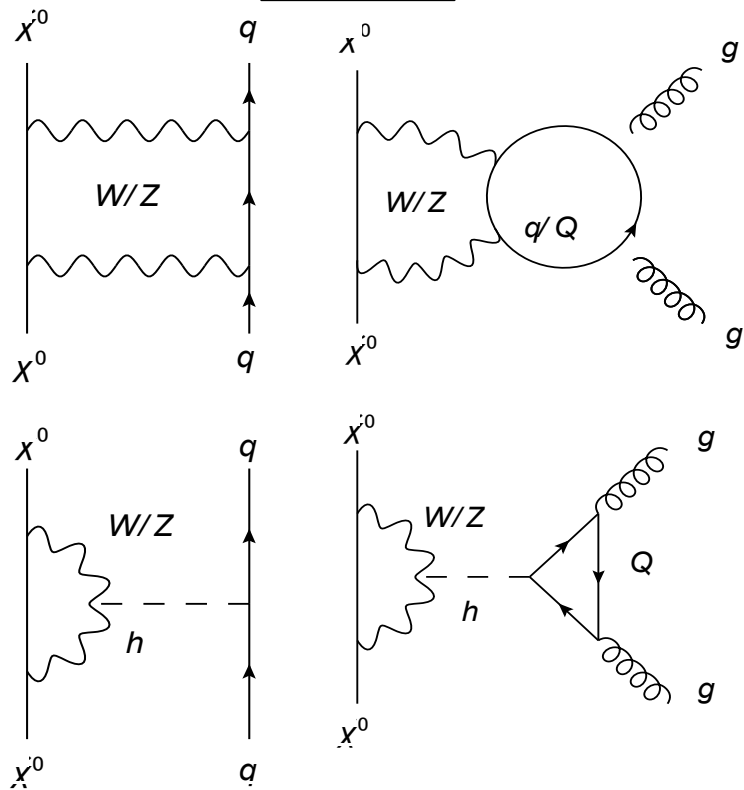
原子核弾性散乱観測による直接探索

スピンに依存しない(SI)核子・暗黒物質弾性散乱断面積
(プロセス)

ツリー



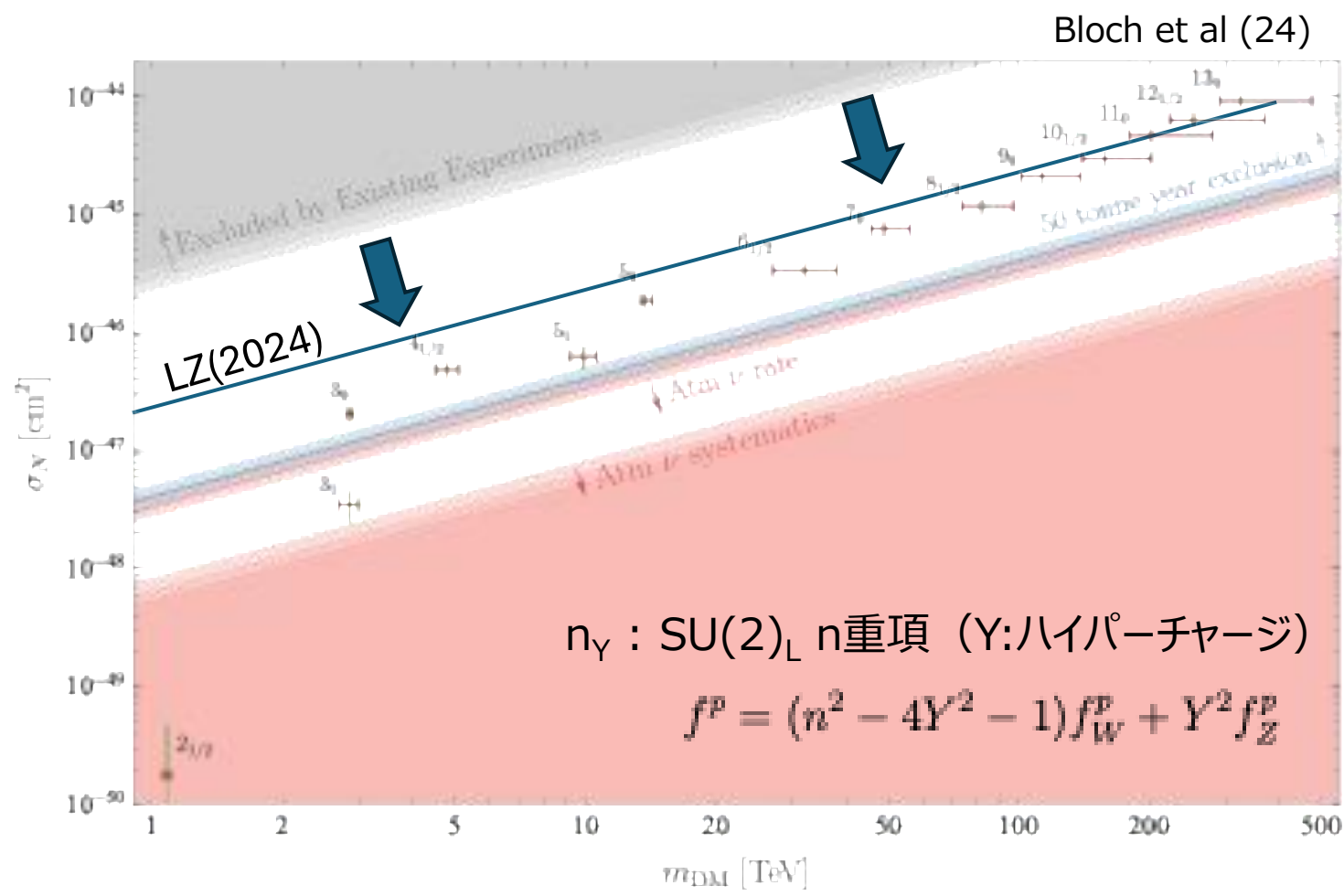
ループ



ツリーの寄与は電弱対称性の破れを拾う。
ループの寄与は $\sim 1/m_Z^2$ の寄与を与える。予言能力が高い。

原子核弾性散乱観測による直接探索

SI核子・暗黒物質弾性散乱断面積



次世代実験は電弱相互作用を行う暗黒物質の決定的なテスト

原子核弾性散乱観測による直接探索

SI核子・暗黒物質弾性散乱のための有効相互作用

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \sum_{i=q,G} C_S^i \mathcal{O}_S^i + \sum_{i=q,G} (C_{T_1}^i \mathcal{O}_{T_1}^i + C_{T_2}^i \mathcal{O}_{T_2}^i) ,$$

スカラー
演算子 $\mathcal{O}_S^q \equiv m_q \bar{\chi}^0 \chi^0 \bar{q} q ,$
 $\mathcal{O}_S^G \equiv \frac{\alpha_s}{\pi} \bar{\chi}^0 \chi^0 G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} ,$

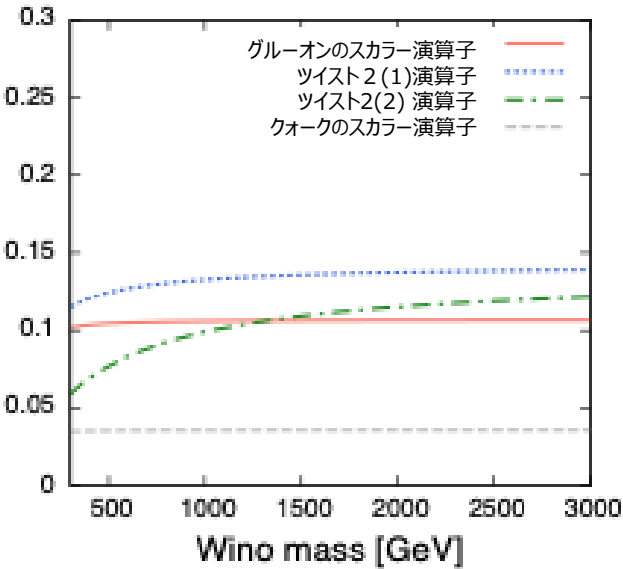
ツイスト2
演算子 $\mathcal{O}_{T_1}^i \equiv \frac{1}{M} \bar{\chi}^0 i \partial^\mu \gamma^\nu \chi^0 \mathcal{O}_{\mu\nu}^i ,$
 $\mathcal{O}_{T_2}^i \equiv \frac{1}{M^2} \bar{\chi}^0 (i \partial^\mu) (i \partial^\nu) \chi^0 \mathcal{O}_{\mu\nu}^i$

取り込まれている寄与

(JH, Ishiwata, Nagata (15))

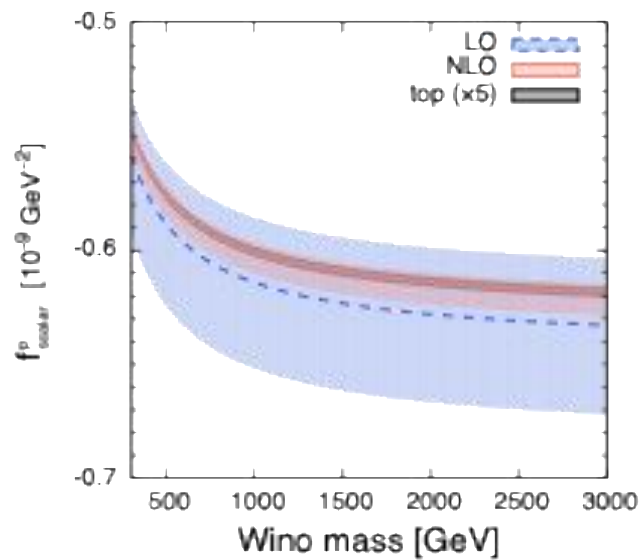
Operators		Higgs		Box	
Parton	Type	LO	NLO	LO	NLO
Quark	Scalar C_S^q	1-loop	2-loop	-	2-loop
(1st&2nd)	Twist-2 $C_{T_{1,2}}^q$	-	-	1-loop	2-loop
Quark	Scalar C_S^b	1-loop	2-loop	1-loop	2-loop (neglected)
(b-quark)	Twist-2 $C_{T_{1,2}}^b$	-	-	1-loop	2-loop (neglected)
Gluon	Scalar C_S^G	2-loop	3-loop	2-loop	3-loop
(1st & 2nd)	Twist-2 $C_{T_{1,2}}^G$	-	-	-	2-loop
Gluon	Scalar C_S^G	2-loop	3-loop	2-loop	3-loop (3rd gen. neglected)
(3rd)	Twist-2 $C_{T_{1,2}}^G$	-	-	-	2-loop (3rd gen. neglected)

LOでの第3世代の寄与

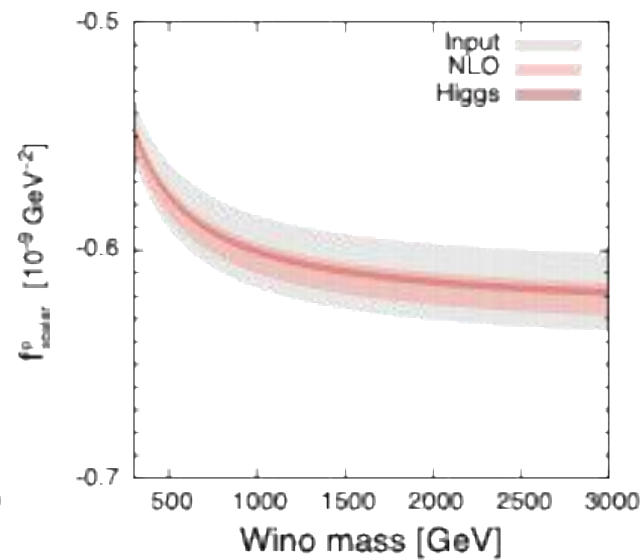


NLOの第3世代の寄与の評価および予言のアップデート進行中

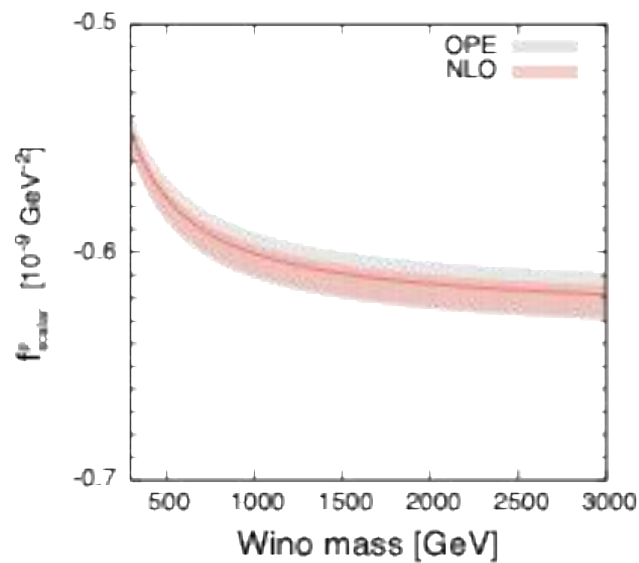
原子核弾性散乱観測による直接探索



(a) Perturbation



(b) Input



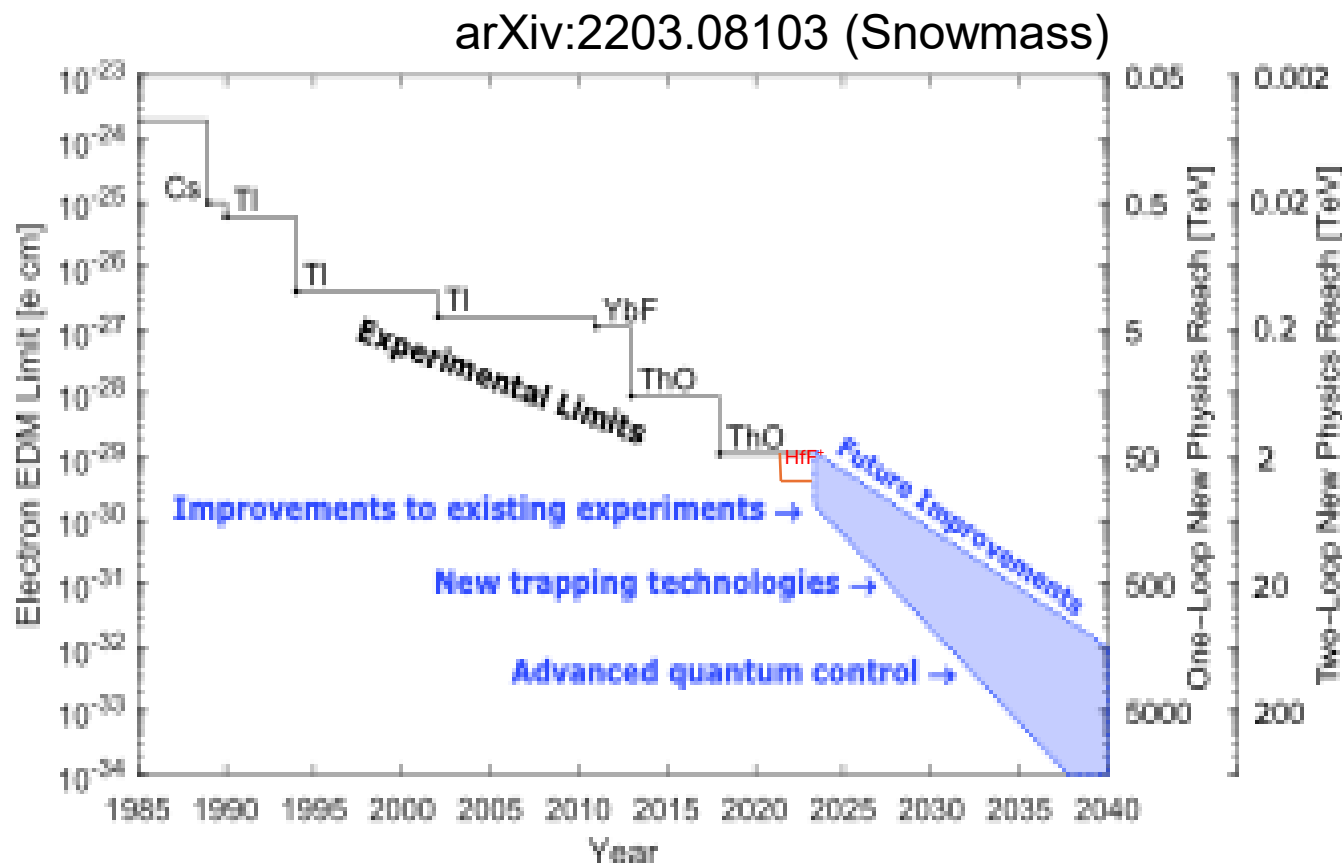
(c) OPE

電子の電気双極子能率(EDM)

電子のEDM測定：偏極分子を用いて格段に改善

$$|d_e| < 1.1 \times 10^{-29} \text{ e cm (ThO(ACME-II), 2018)}$$

$$|d_e| < 4.1 \times 10^{-30} \text{ e cm (HfF}^+\text{(JIRA), 2022)}$$

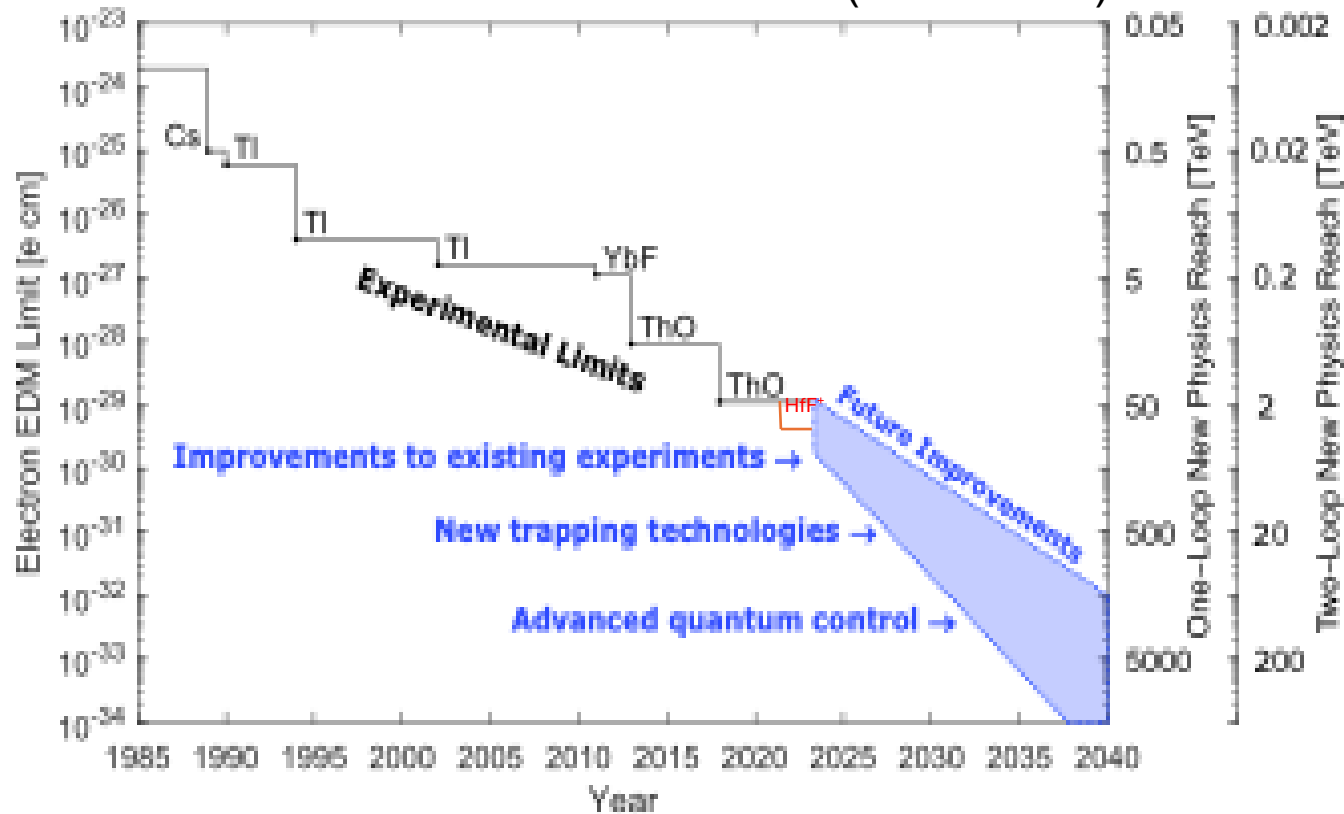


電子のEDM

$$\frac{d_e}{e} \simeq \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^n \frac{m_e}{\Lambda^2} \sin \phi$$

← CP位相
← 新物理のスケール
← ループ因子

arXiv:2203.08103 (Snowmass)



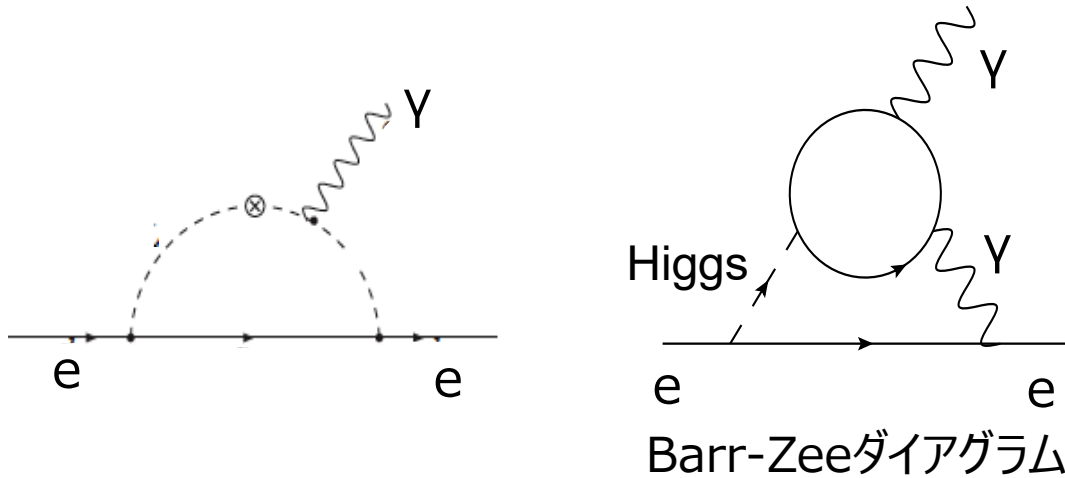
3ループ
の寄与への
感度



電子のEDM

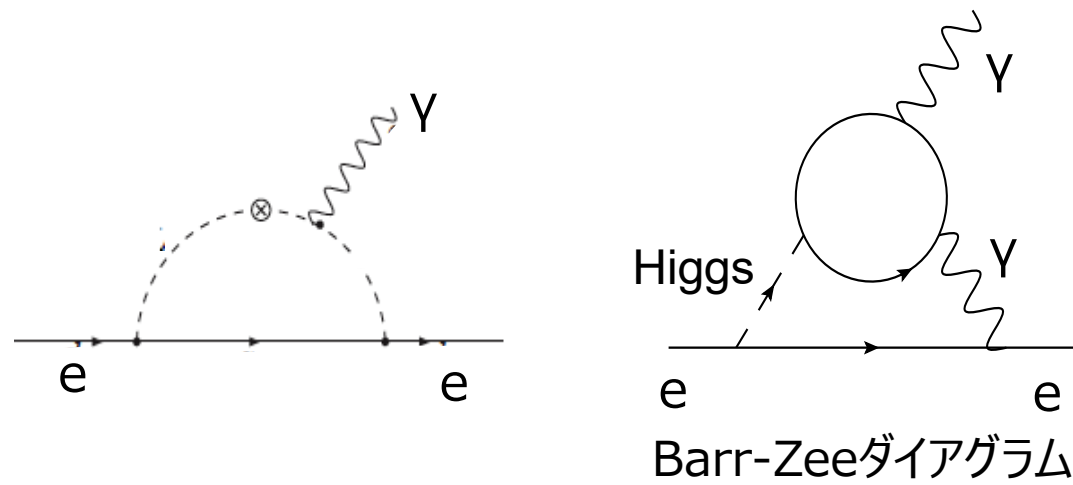
1 ループレベル：直接電子と結合する新物理

2 ループレベル：ヒッグス場を通して結合する新物理



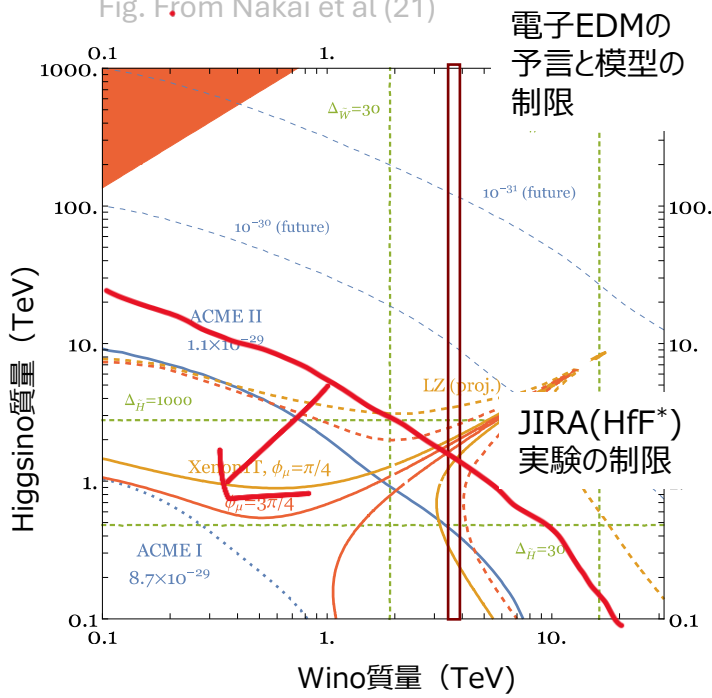
電子のEDM

- 1 ループレベル：直接電子と結合する新物理
- 2 ループレベル：ヒッグス場を通して結合する新物理



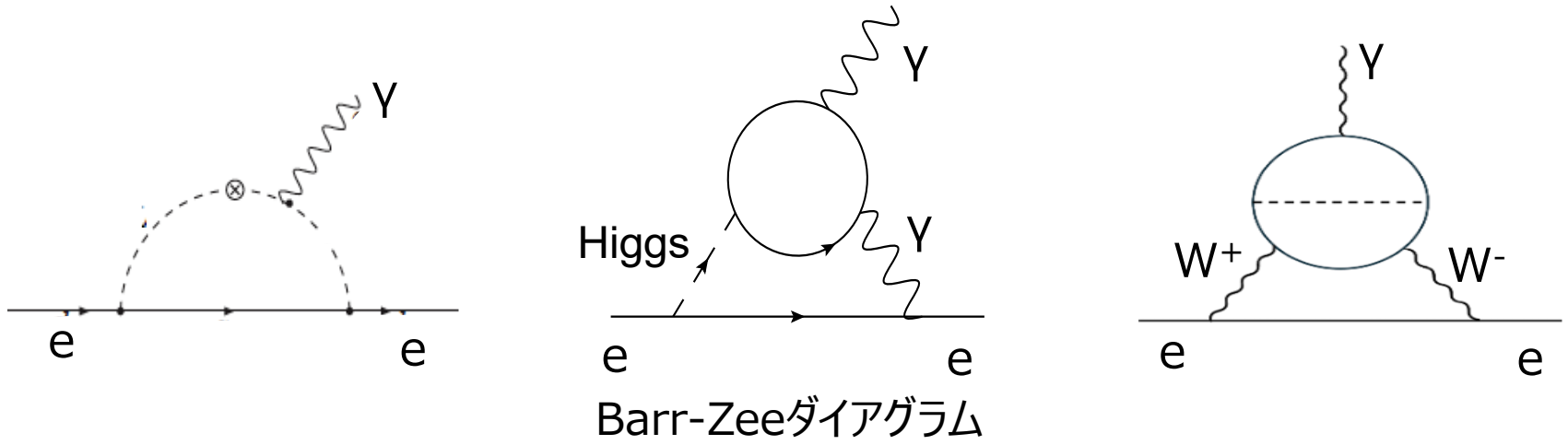
2重項F-3重項F-ヒッグス結合

Fig. From Nakai et al (21)



電子のEDM

- 1 ループレベル：直接電子と結合する新物理
- 2 ループレベル：ヒッグス場を通して結合する新物理
- 3 ループレベル：ゲージ場を通して結合する新物理



(T-odd, P-odd)電弱ワインバーグ演算子

$$\mathcal{L}_W = -\frac{g^3}{3}C_W f^{abc}W_{\mu\nu}^a W_{\rho}^{b\mu} \tilde{W}^{c\rho\nu} = -\frac{2ieg^2}{3}C_W \left[\bar{W}_{\mu\nu}^- \bar{W}^{+\nu}_\lambda \tilde{F}^{\lambda\mu} + \bar{F}_{\mu\nu} \left(\bar{W}^{-\nu}_\lambda \tilde{W}^{+\lambda\mu} - \bar{W}^{+\nu}_\lambda \tilde{W}^{-\lambda\mu} \right) \right]$$

電子のEDM

電弱ワインバーグ演算子の電子EDMへの寄与の評価

1, $SU(2)_L$ 多重項フェルミオン ψ_A, ψ_B 、スカラー S からなる湯川結合

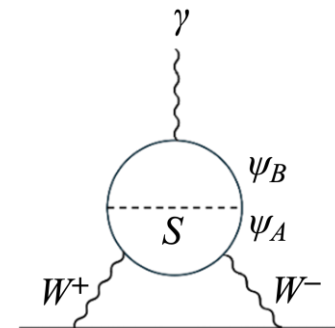
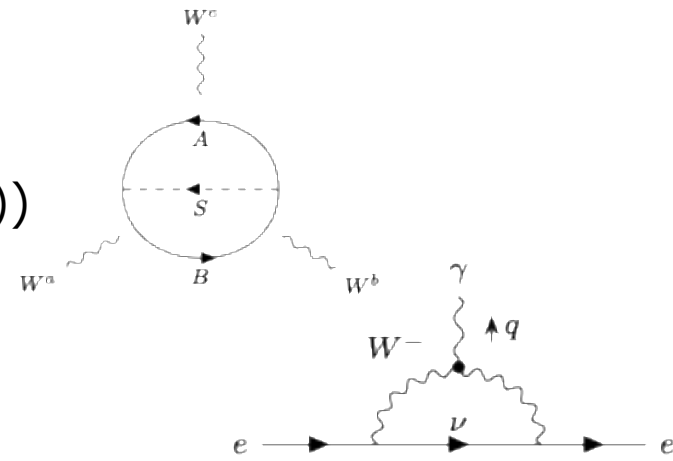
$$\mathcal{L} \supset -\bar{\psi}_B g_{\bar{B}AS} \psi_A S - \bar{\psi}_A g_{\bar{A}B\bar{S}} \psi_B S^*$$

2, 2ループで導かれる電弱ワイン
バーグ演算子の評価(QCD:Abe, JH, Nagai(18))

3, 電弱ワインバーグ演算子の電子
EDMへの寄与の評価

問題点：

- 課題3はUV正則化に依存
- 電弱ワインバーグ演算子を経由
しない寄与も同じレベルで寄与



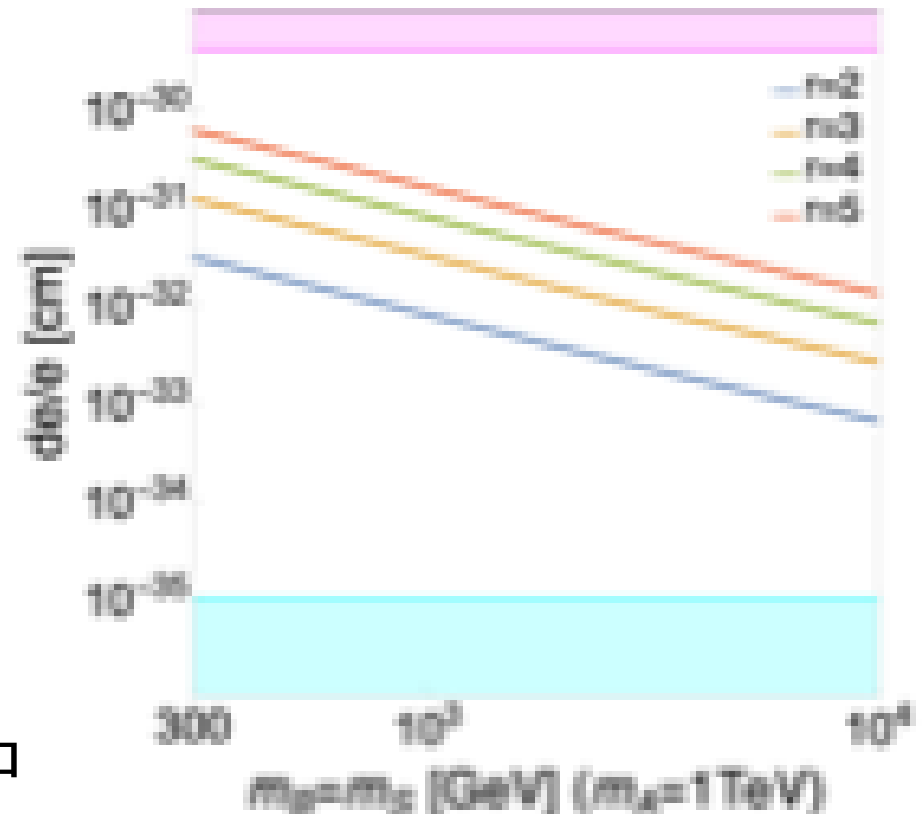
電子のEDM

正則化はBMHVスキームを採用し、電弱ワインバーグ演算子の寄与だけを評価($O(1)$ の不定性)

(A, B, S) = ($r, r, 1$)の場合

- EDMは r^3 に比例
- ヒッグス交換からくる標準模型からの極性分子EDMの寄与 (水色, $d_e/e = 10^{-35}\text{cm}$) より大きい。

現在、より正確な予言を評価中



まとめ

- 電弱相互作用を行う暗黒物質は、熱的残存仮説のもとTeVスケールの質量が预言される。
- 次世代暗黒物質直接探索実験において、多くの可能性が検証される。（例外はハイパーチャージを持つ二重項、三重項）
- 電弱相互作用を行う新粒子がCPを破る湯川結合を持つ場合、電子の電気双極子能率が、ヒッグス場により2ループのBarr-Zeeダイアグラム、もしくは電弱ワインバーグ演算子を含む3ループダイアグラムにより、導かれ、将来検証される可能性がある。
- 本科研費を使って、電弱相互作用を行う暗黒物質のSI核子暗黒物質弾性散乱断面積、電子の電気双極子能率の预言の信頼度を上げる研究を行う。