

# Selecting $\mu \rightarrow e$ conversion targets to distinguish lepton flavour-changing operators

山中 真人 (NITEP, 大阪市立大学)



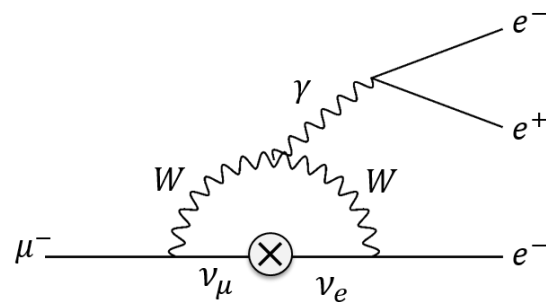
S. Davidson, Y. Kuno and M.Y., PLB 790 (2019) 380

# Charged Lepton Flavor Violation (CLFV) で新物理を探る

SMではCLFVは決して起こらず

ニュートリノ振動を含めても発見できる反応率にはならず

**CLFV発見は標準模型を超える新物理の証拠！**



$$\text{BR} \simeq 7.4 \times 10^{-55}$$

G. Hernandez-Tome, et al, EPJC (2019)

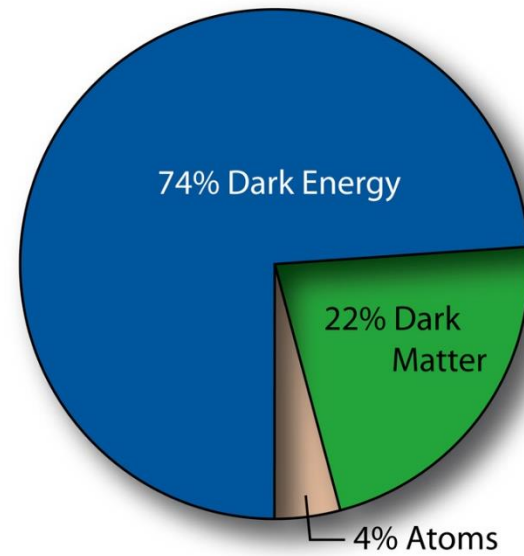
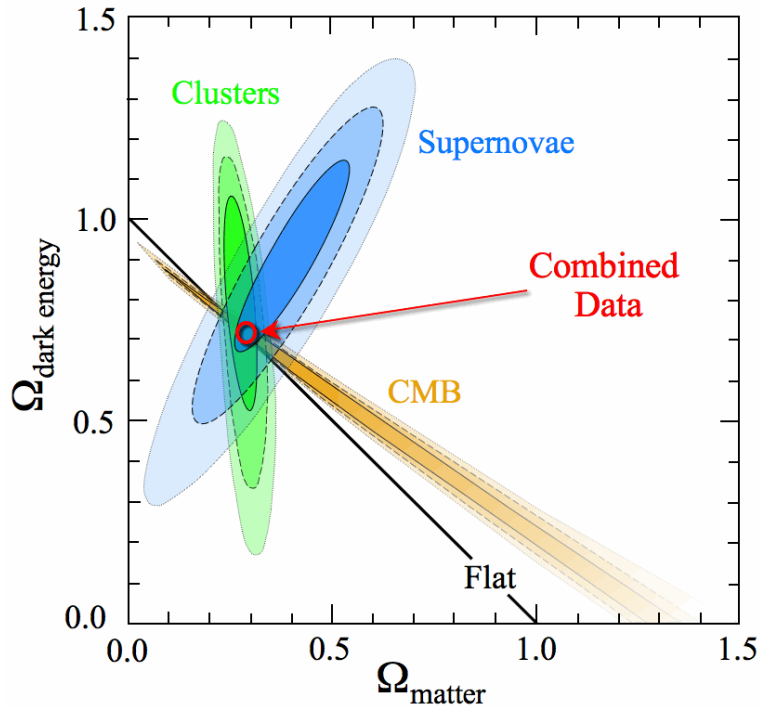
どの反応が優勢？ → 模型のフレーバー構造次第

- ☐  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$
- ☐  $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$
- ☐  $\mu^- - e^-$  conversion in nuclei
- ☐  $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$  in muonic atom

**多くの反応探査を基にフレーバー構造を明らかに！**



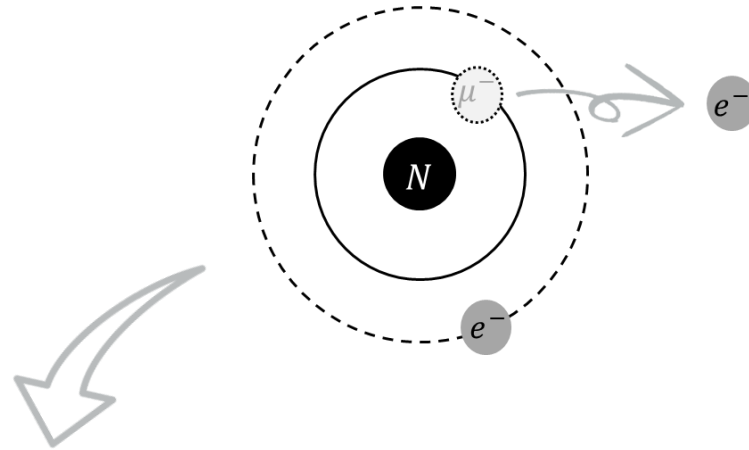
# フレーバー構造を決めるに十分な数の材料はあるのか？



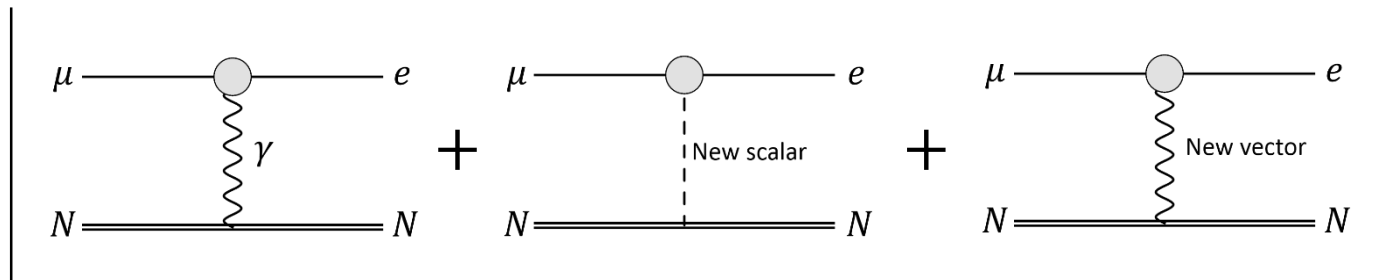
理想的なケースの例：宇宙の密度パラメーター

パラメーターの数以上に実験・観測データを確保可能

# フレーバー構造を決めるに十分な数の材料はあるのか？



反応率  $\propto$



2

各種22個のCLFV演算子がコヒーレントに作用。しかも、理論計算には不定性が付きもの

**実験結果からこれらを特定できるのか？また、そのために必要な条件は？？**

# 研究の狙い、トークの流れ

計算の不定性を含めて、 $\mu^- - e^-$  転換の模型識別力は？

将来注目すべき標的は？

いくつかのCLFV演算子を縛ることが可能？

## トークの流れ

- $\mu - e$  conversion in nuclei
- ターゲットに要求される条件、適切なターゲット
- 実験スケール、新物理スケールそれぞれで残る平坦方向
- まとめ

## $\mu - e$ conversion in nuclei

- 反応概要、魅力
- 実験制限、将来実験（ターゲットに注目）
- 反応率

# $\mu - e$ conversion $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$

シグナル エネルギー  $E_e \simeq m_\mu$  (105 MeV) の電子

背景事象

- Decay in orbit  $\mu^- + N \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + N$
- Radiative capture  $\pi + N \rightarrow N^* \rightarrow e^+ + e^- + N$

反応分岐比 
$$\text{BR} \equiv \frac{\Gamma(\mu^- + N \rightarrow e^- + N)}{\Gamma(\mu^- + N \rightarrow \nu_\mu + N')}$$

注意 :  $\text{BR}(\mu^- + X \rightarrow e^- + X) \neq \text{BR}(\mu^- + Y \rightarrow e^- + Y)$

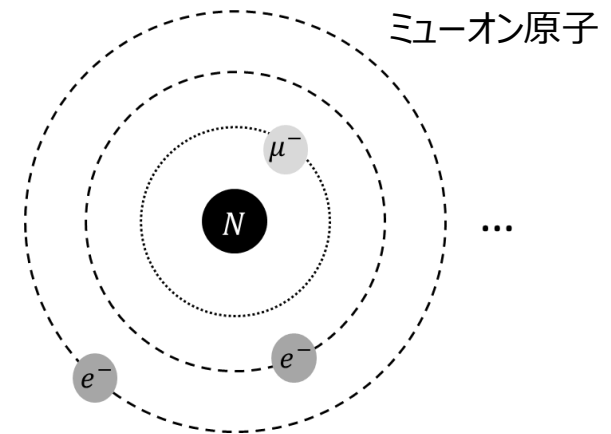
→ 「一桁更新」を鵜呑みにしないように !

制限

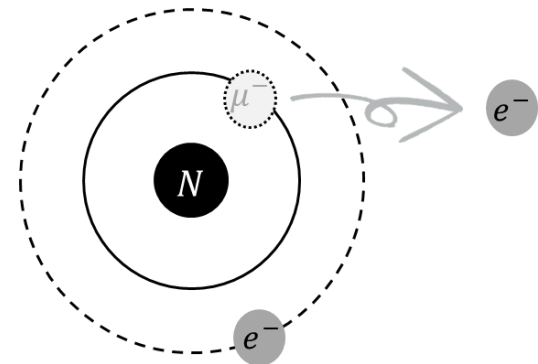
$$\text{BR}(\mu^- + \text{Au} \rightarrow e^- + \text{Au}) < 7 \times 10^{-13}$$

$$\text{BR}(\mu^- + \text{Ti} \rightarrow e^- + \text{Ti}) < 4.3 \times 10^{-12}$$

SINDRUM-II



荷電レプトンフレーバーの破れを伴う相互作用があると...

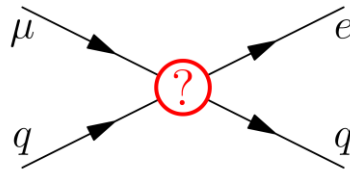
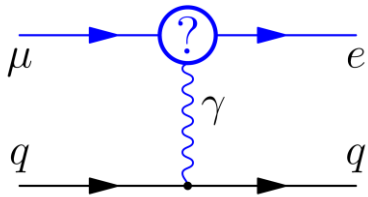




# 魅力1：複数の相互作用型に感度

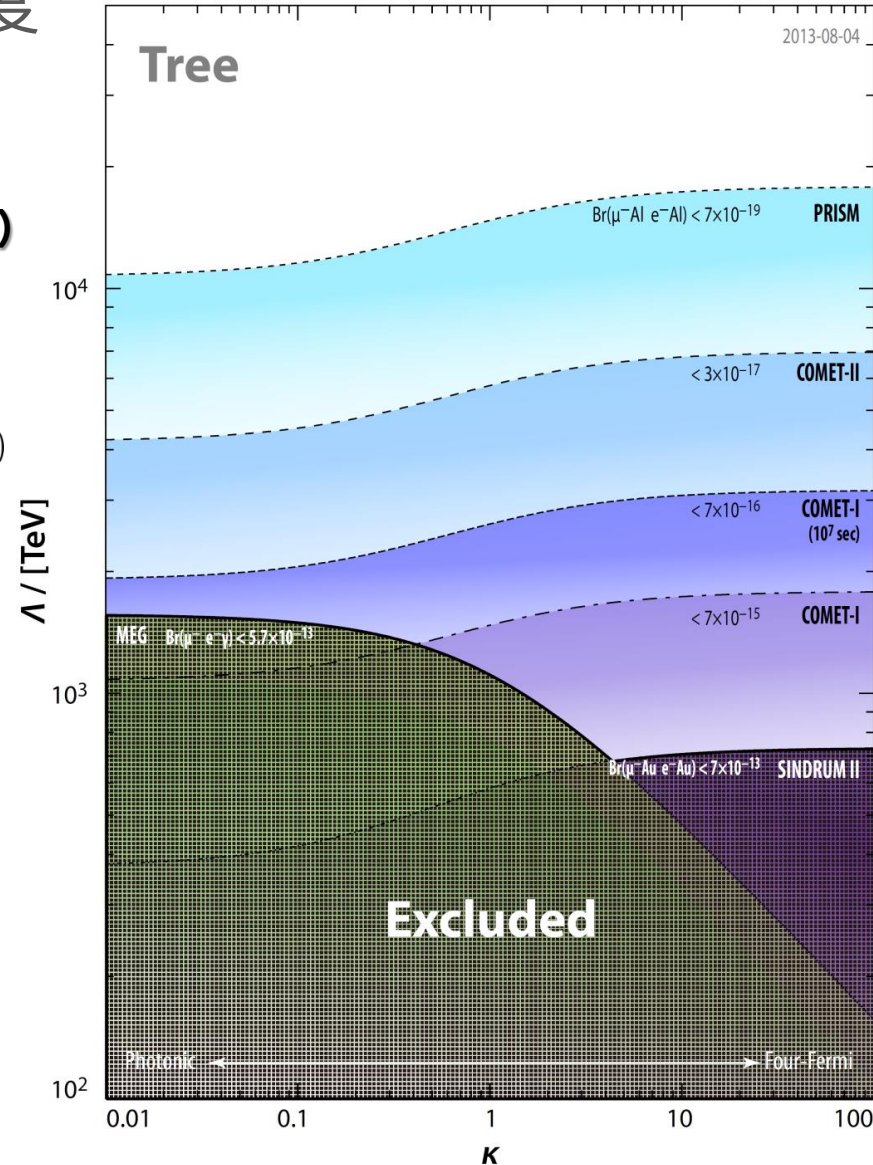
**フォトン媒介型、重粒子媒介型（スカラー型、ベクトル型）**  
**両方に高い感度。干渉効果も模型選別に力を発揮。**

$$\mathcal{L} = \frac{1}{1+\kappa} \frac{m_\mu}{\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma^{\mu\nu} e_L F_{\mu\nu} + \frac{\kappa}{1+\kappa} \frac{1}{\Lambda^2} (\bar{\mu}_L \gamma^\mu e_L) (\bar{q}_L \gamma_\mu q_L)$$



強くはないが、擬ベクトル型、テンソル型にも感度有り

V. Cirigliano, S. Davidson, Y. Kuno, PLB (2017)





# 魅力2：探り出せる“深さ”も強力

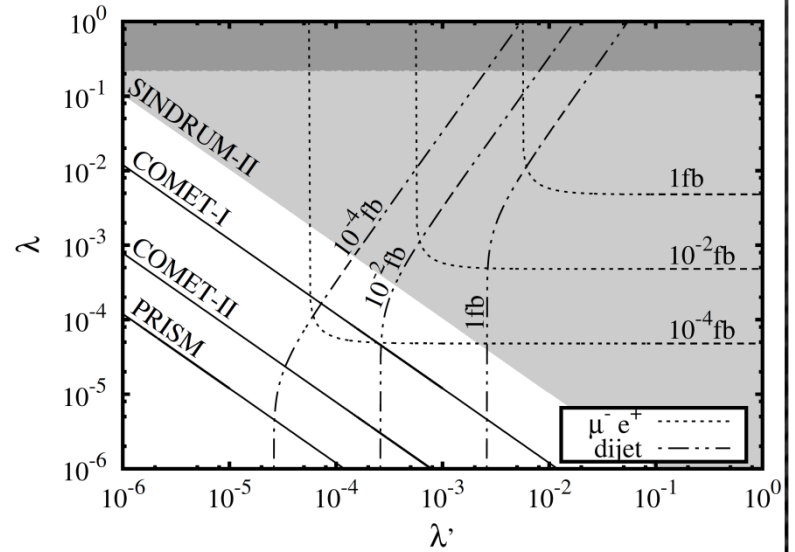
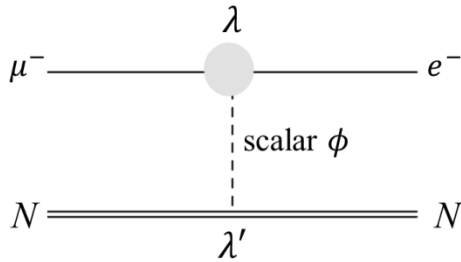


FIG. 1:  $m_\phi = 1 \text{ TeV}$ ,  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

“4-Fermi coupling”に対する $\mu - e$ 転換の感度

$$\lambda\lambda'/m^2 \sim 10^{-8}(\text{TeV})^{-2} \quad (\text{COMET-I})$$

$$\lambda\lambda'/m^2 \sim 10^{-9}(\text{TeV})^{-2} \quad (\text{COMET-II, Mu2e-I})$$

$$\lambda\lambda'/m^2 \sim 10^{-10}(\text{TeV})^{-2} \quad (\text{PRISM, Mu2e-II})$$

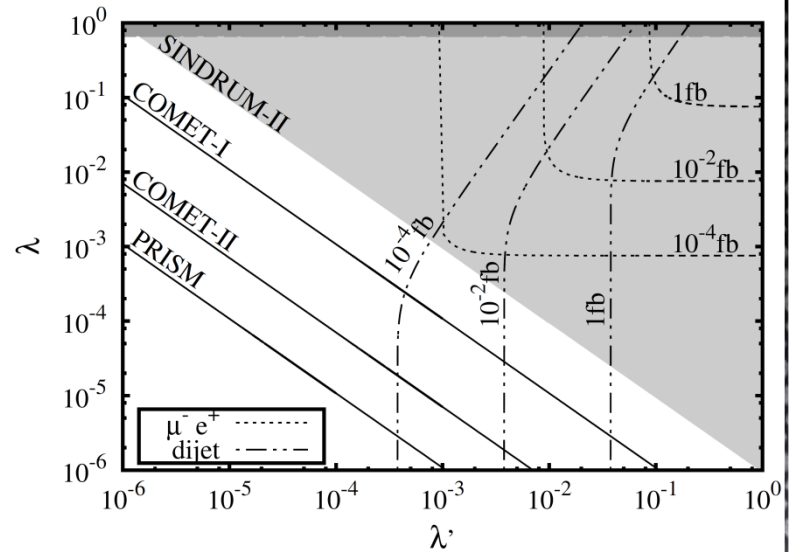
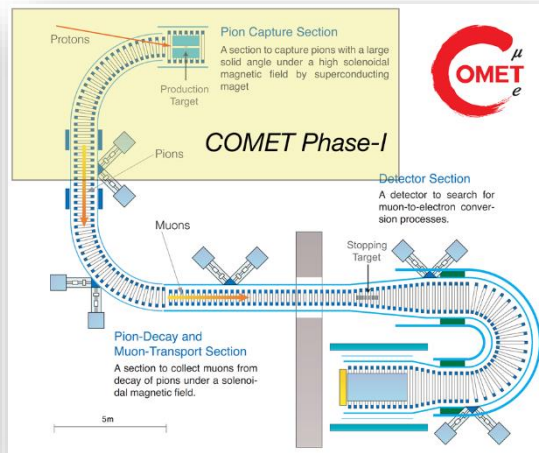
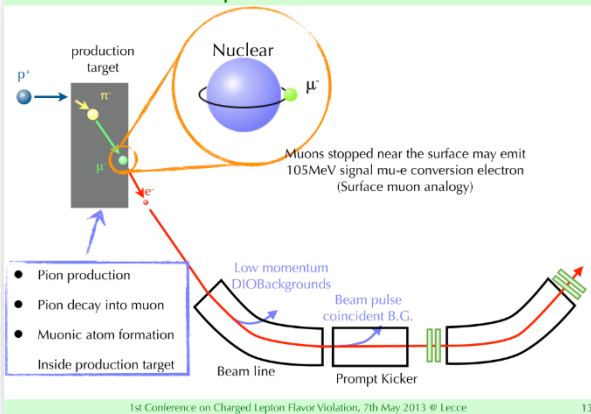
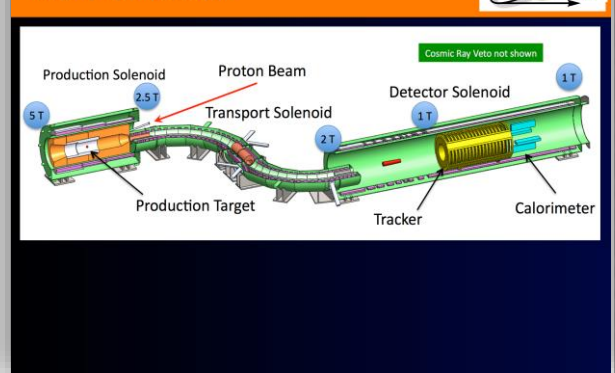


FIG. 2:  $m_\phi = 3 \text{ TeV}$ ,  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

# DeeMe concept

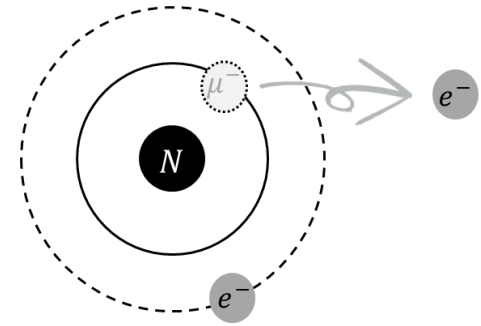


# Mu2e at Fermilab



実験	DeeMe (J-PARC)	COMET (J-PARC)	Mu2e (Fermi Lab.)
標的	C ( $\rightarrow$ SiC)	Al ( $\rightarrow$ Ti ?)	Al ( $\rightarrow$ Ti ?)
感度	BR(C) $\lesssim 1 \times 10^{-13}$ BR(SiC) $\lesssim 2 \times 10^{-14}$	BR(Al) $\lesssim 6 \times 10^{-15}$ (I) BR(Al) $\lesssim 2 \times 10^{-17}$ (II)	BR(Al) $\lesssim 3 \times 10^{-17}$ (I) BR(Al) $\lesssim 3 \times 10^{-18}$ (II)
開始	2020年 ?	2021年 (I) 2025年? (II)	2022年 (I) 2030年? (II)
特長	$\mu$ 生成と $\mu$ 原子形成を同じ標的 で。これにより安く早く実験開始	extinction、 $\mu$ 輸送、シグナル $e^-$ 輸 送により、背景事象を極めて少数に	extinction、 $\mu$ 輸送により、背景事 象を少数に
検出	$E_e \sim m_\mu$ の電子だけ検出 $e^+$ や $E_e \ll m_\mu$ の $e^-$ は検出困難	(I) 標的を囲む検出器。 $\mu^- - e^+$ 転 換や $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ も探索可 (II) $E_e \sim m_\mu$ の電子だけ検出	応用の利く検出器。 $\mu^- - e^+$ 転換 や $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ も探索可

# 反応率



## 相互作用@実験スケール

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\mu A \rightarrow e A}(\Lambda_{\text{expt}}) = & -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{N=p,n} \left[ m_\mu (C_{DL} \bar{e}_R \sigma^{\alpha\beta} \mu_L F_{\alpha\beta} + C_{DR} \bar{e}_L \sigma^{\alpha\beta} \mu_R F_{\alpha\beta}) \right. \\ & + \left( \tilde{C}_{SL}^{(NN)} \bar{e} P_L \mu + \tilde{C}_{SR}^{(NN)} \bar{e} P_R \mu \right) \bar{N} N \\ & \left. + \left( \tilde{C}_{VL}^{(NN)} \bar{e} \gamma^\alpha P_L \mu + \tilde{C}_{VR}^{(NN)} \bar{e} \gamma^\alpha P_R \mu \right) \bar{N} \gamma_\alpha N + h.c. \right]\end{aligned}$$

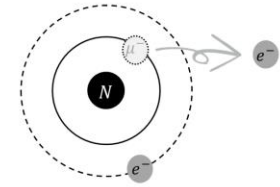
$C_{SL}^{(NN)}, C_{VL}^{(NN)}, C_{DL}, \dots$  : 背後の模型で決まるCLFVパラメーター

spin-dependentな $\mu - e$ 転換は割愛

(independentなものに比べ反応率が小さいため)

# 反応率

## 反応率



### 相互作用@実験スケール

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\mu A \rightarrow e A}(\Lambda_{\text{expt}}) = & -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{N=p,n} \left[ m_\mu (C_{DL} \bar{e}_R \sigma^{\alpha\beta} \mu_L F_{\alpha\beta} + C_{DR} \bar{e}_L \sigma^{\alpha\beta} \mu_R F_{\alpha\beta}) \right. \\ & + \left( \tilde{C}_{SL}^{(NN)} \bar{e} P_L \mu + \tilde{C}_{SR}^{(NN)} \bar{e} P_R \mu \right) \bar{N} N \\ & \left. + \left( \tilde{C}_{VL}^{(NN)} \bar{e} \gamma^\alpha P_L \mu + \tilde{C}_{VR}^{(NN)} \bar{e} \gamma^\alpha P_R \mu \right) \bar{N} \gamma_\alpha N + h.c. \right]\end{aligned}$$

$C_{SL}^{(NN)}, C_{VL}^{(NN)}, C_{DL}, \dots$  : 背後の模型で決まるCLFVパラメーター

## 反応分岐比

$$\text{BR}_{SI} = \frac{32G_F^2 m_\mu^5}{\Gamma_{\text{cap}}} \left[ \left| \tilde{C}_{V,R}^{pp} V^{(p)} + \tilde{C}_{S,L}^{pp'} S^{(p)} + \tilde{C}_{V,R}^{nn} V^{(n)} + \tilde{C}_{S,L}^{nn'} S^{(n)} + C_{D,L} \frac{D}{4} \right|^2 + \{L \leftrightarrow R\} \right]$$

**各型のCLFV演算子がコヒーレントに寄与**

**実験結果から各演算子の情報をどれだけ掴めるか？**

$V, S, D$  : 原子核クーロン場中のレプトン波動関数と核子密度の積を空間積分したモノ

**原子核ごとに異なる**

# 幾何学的、かつ、直感的理解に向けた定式化

## 反応分岐比

$$\text{BR}_{SI} = \frac{32G_F^2 m_\mu^5}{\Gamma_{cap}} \left[ \left| \tilde{C}_{V,R}^{pp} V^{(p)} + \tilde{C}_{S,L}^{pp'} S^{(p)} + \tilde{C}_{V,R}^{nn} V^{(n)} + \tilde{C}_{S,L}^{nn'} S^{(n)} + C_{D,L} \frac{D}{4} \right|^2 + \{L \leftrightarrow R\} \right]$$

各波動関数積分を成分に持つベクトル

$$\vec{v}_Z = \left( \frac{D_Z}{4}, V_Z^{(p)}, S_Z^{(p)}, V_Z^{(n)}, S_Z^{(n)} \right)$$

各CLFV演算子の係数を成分に持つベクトル

$$\vec{C}_L = (\tilde{C}_{D,R}, \tilde{C}_{V,L}^{pp}, \tilde{C}_{S,R}^{pp}, \tilde{C}_{V,L}^{nn}, \tilde{C}_{S,R}^{nn})$$

$$\text{BR}_{SI} = B_Z \left[ \left| \hat{v}_Z \cdot \vec{C}_L \right|^2 + \{L \leftrightarrow R\} \right] \quad \left( B_Z = \frac{32G_F^2 m_\mu^5 |\vec{v}_Z|^2}{\Gamma_{cap}(Z)} \right)$$

**係数ベクトル  $\vec{C}_L$  決定のため、積分ベクトル  $\vec{v}$ 、つまり、ターゲットに要求される条件を調べる**

# 係数ベクトル決定のため必要な独立ベクトルの数

以降、光子双極子の寄与は無視

$BR(\mu \rightarrow e\gamma) < 6 \times 10^{-14}$ 、 $BR(\mu \rightarrow 3e) < 10^{-16}$  には近未来の  $\mu - e$  転換では勝てないため

また、 $e_R$  終状態の寄与も無視

将来の  $\mu - e$  転換実験で偏極ミューオンを用いて LR の判別はしてくれると期待

幾何学的、かつ、直感的理解に向けた定式化

反応分岐比

$$BR_{SI} = \frac{32G_F^2 m_\mu^5}{\Gamma_{cap}} \left[ \left| \tilde{C}_{V,R}^{pp} V^{(p)} + \tilde{C}_{S,L}^{pp'} S^{(p)} + \tilde{C}_{V,R}^{nn} V^{(n)} + \tilde{C}_{S,L}^{nn'} S^{(n)} + C_{D,L} \frac{D}{4} \right|^2 + \{L \leftrightarrow R\} \right]$$



各波動関数積分を成分に持つベクトル  $\vec{v}_Z = \left( \frac{D_Z}{4}, V_Z^{(p)}, S_Z^{(p)}, V_Z^{(n)}, S_Z^{(n)} \right)$

各CLFV演算子の係数を成分に持つベクトル  $\vec{C}_L = (\tilde{C}_{D,R}, \tilde{C}_{V,L}^{pp}, \tilde{C}_{S,R}^{pp}, \tilde{C}_{V,L}^{nn}, \tilde{C}_{S,R}^{nn})$

$$BR_{SI} = B_Z \left[ |\hat{v}_Z \cdot \vec{C}_L|^2 + \{L \leftrightarrow R\} \right] \quad \left( B_Z = \frac{32G_F^2 m_\mu^5 |\vec{v}_Z|^2}{\Gamma_{cap}(Z)} \right)$$

係数ベクトル  $\vec{C}_L$  決定のため、積分ベクトル  $\vec{v}$ 、つまり、ターゲットに要求される条件を調べる

決めるべき係数の数は 4 つ @ 実験スケール

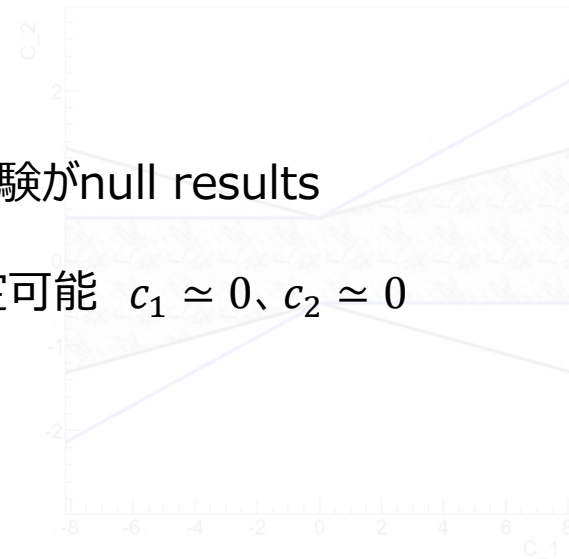
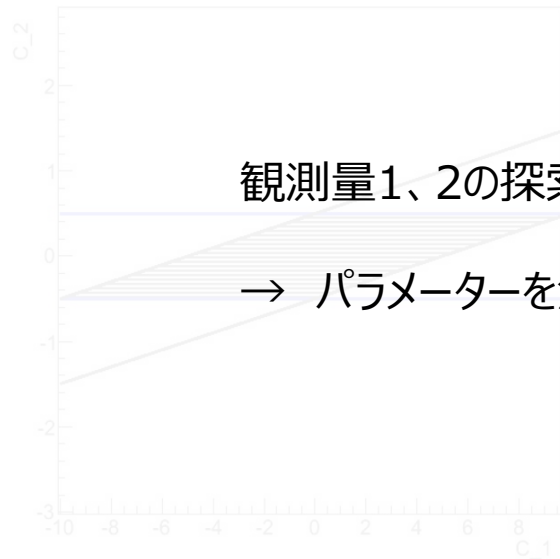
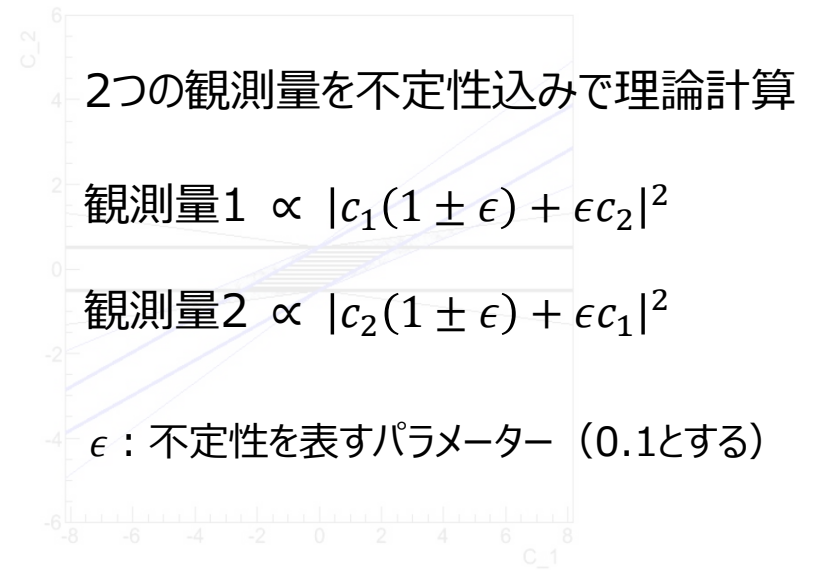
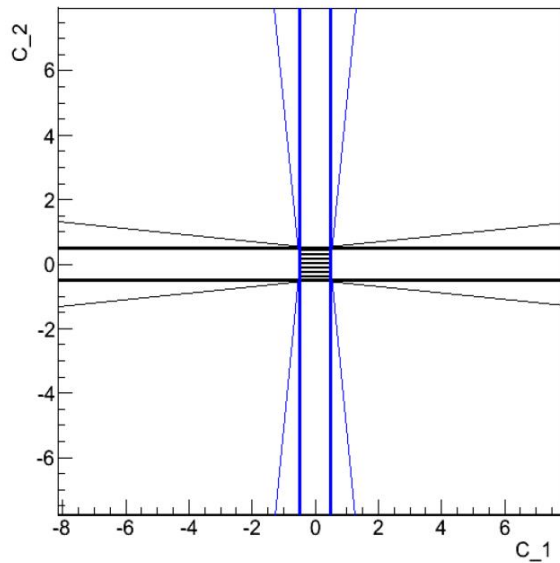
**最低でも 4 つの独立な積分ベクトル、つまり、“独立”ターゲットが必要**

# ターゲットに要求される条件、適切なターゲット

- ・ 観測量、パラメーター、計算不定性の関係
- ・ 適切なターゲット



# 観測量、パラメーター、計算不定性の関係



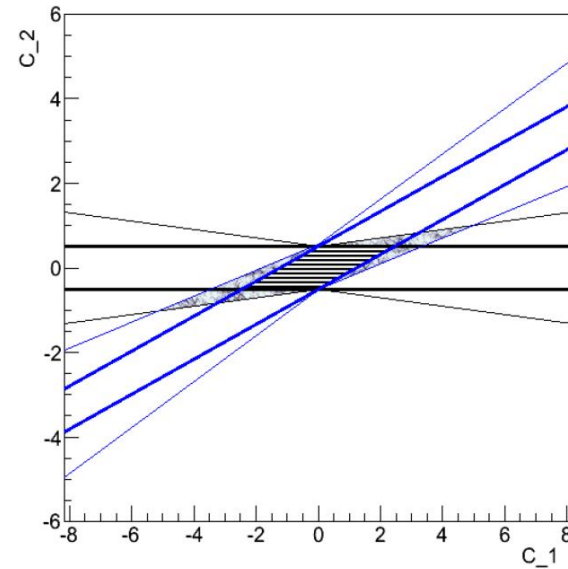
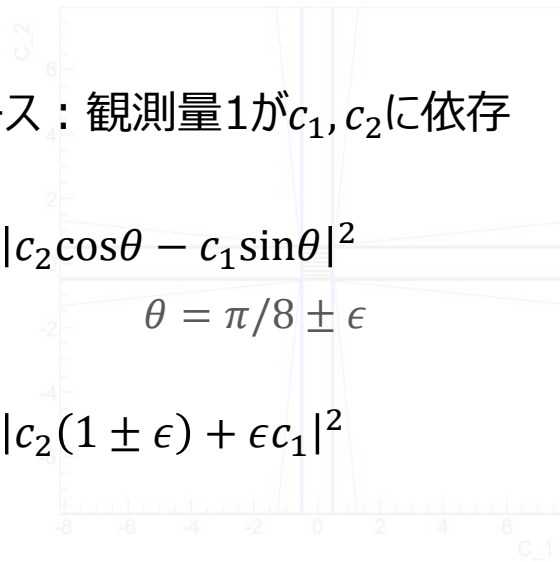
# 観測量、パラメーター、計算不定性の関係

現実的なケース：観測量1が $c_1, c_2$ に依存

$$\text{観測量1} \propto |c_2 \cos\theta - c_1 \sin\theta|^2$$

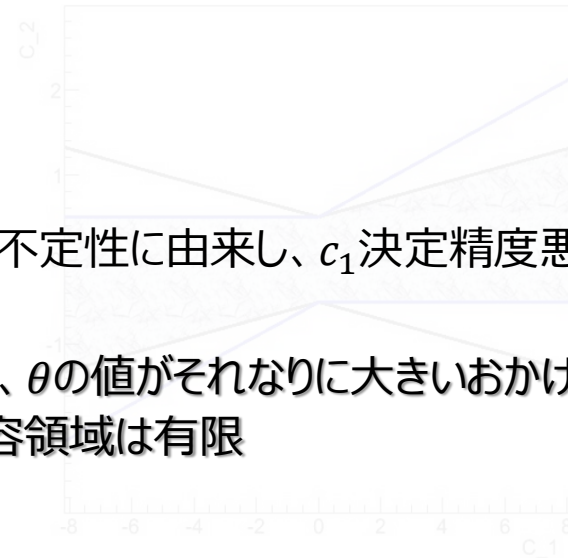
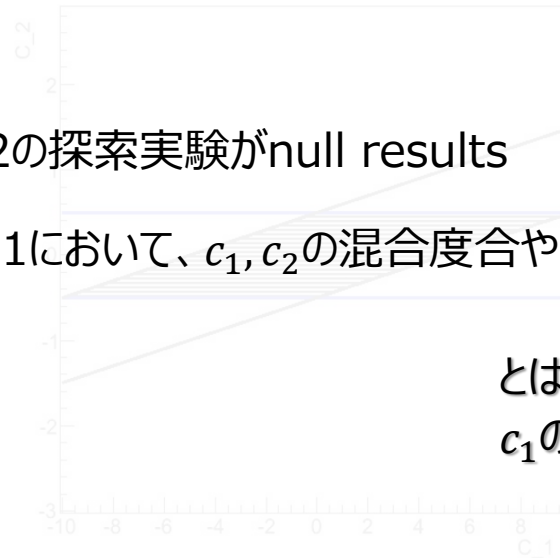
$$\theta = \pi/8 \pm \epsilon$$

$$\text{観測量2} \propto |c_2(1 \pm \epsilon) + \epsilon c_1|^2$$



観測量1、2の探索実験がnull results

→ 観測量1において、 $c_1, c_2$ の混合度合や $c_2$ の不定性に由来し、 $c_1$ 決定精度悪化



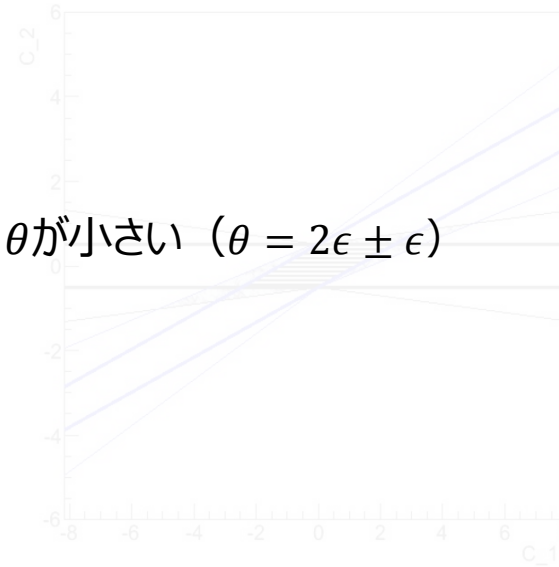
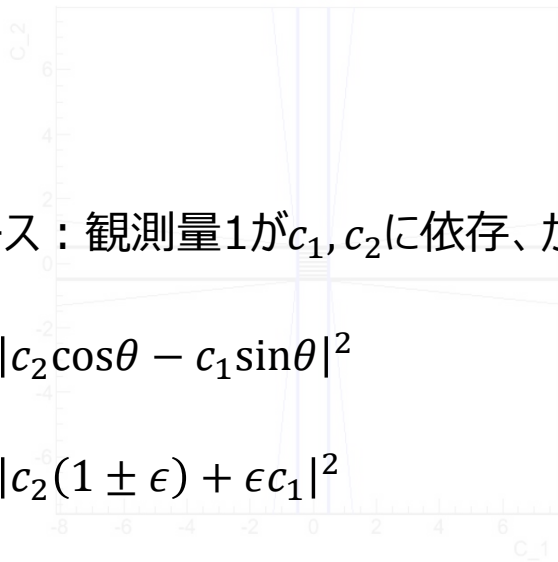
とはいえ、 $\theta$ の値がそれなりに大きいおかげで、 $c_1$ の許容領域は有限

# 観測量、パラメーター、計算不定性の関係

より苦しいケース：観測量1が $c_1, c_2$ に依存、かつ、 $\theta$ が小さい ( $\theta = 2\epsilon \pm \epsilon$ )

$$\text{観測量1} \propto |c_2 \cos\theta - c_1 \sin\theta|^2$$

$$\text{観測量2} \propto |c_2(1 \pm \epsilon) + \epsilon c_1|^2$$

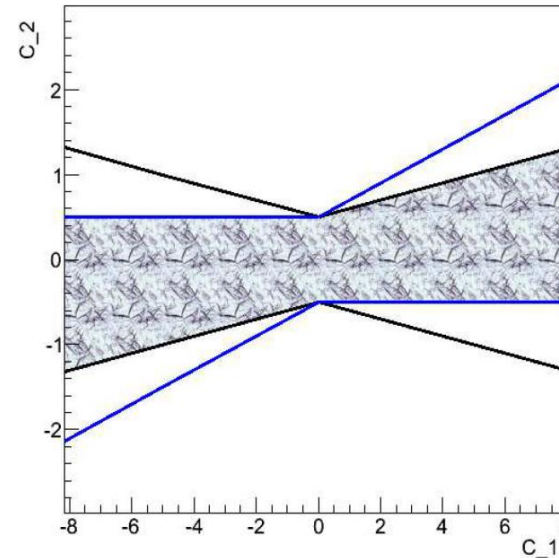
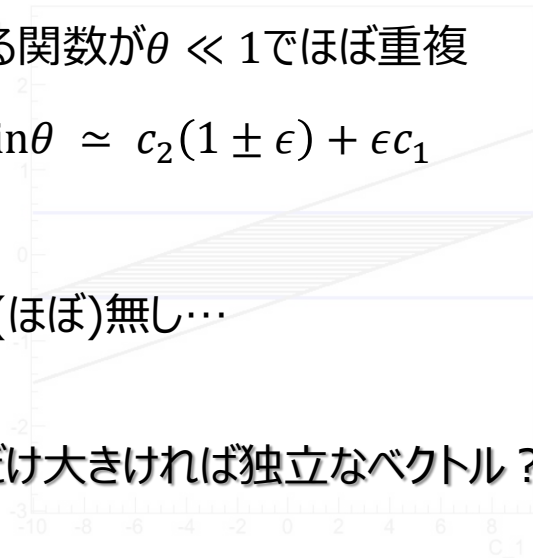


観測量を定める関数が $\theta \ll 1$ でほぼ重複

$$c_2 \cos\theta - c_1 \sin\theta \simeq c_2(1 \pm \epsilon) + \epsilon c_1$$

$c_1$ の決定精度(ほぼ)無し...

$\theta$ がどれだけ大きければ独立なベクトル？



# 観測量、パラメーター、計算不定性の関係

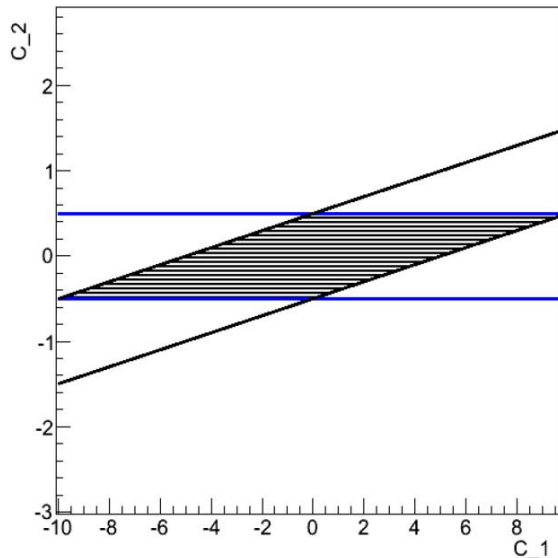
## 結論

$\theta$ は不定性の倍以上であるべし： $\theta > 2\epsilon$

原子核由来の計算不定性は  
～ 10% (重原子核)  $\rightarrow \epsilon = 0.1$   
～ 5% (軽原子核)  $\rightarrow \epsilon = 0.05$

R. Kitano, M. Koike, Y. Okada, PRD (2002)

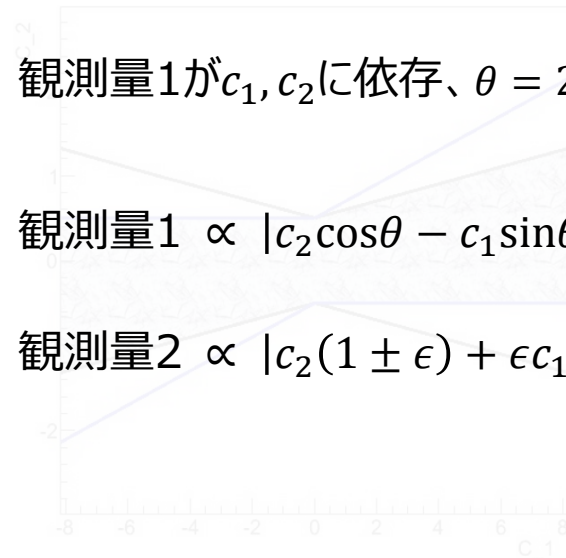
“独立な”ターゲット  $\rightarrow$  各々の積分ベクトル $\vec{v}$ の角度が0.2(0.1)以上



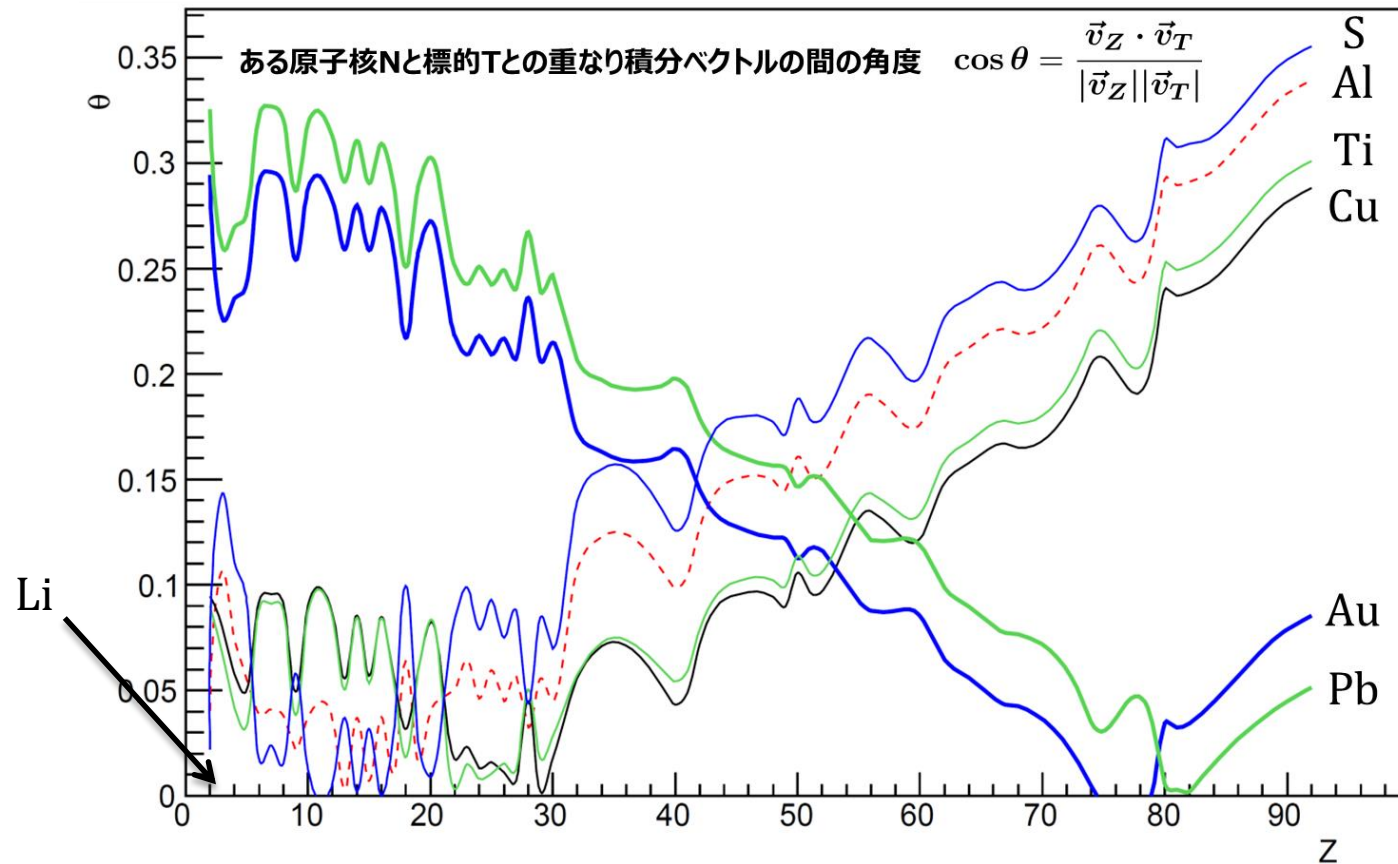
観測量1が $c_1, c_2$ に依存、 $\theta = 2\epsilon$

観測量1  $\propto |c_2 \cos\theta - c_1 \sin\theta|^2$

観測量2  $\propto |c_2(1 \pm \epsilon) + \epsilon c_1|^2$



# “定量的”には新物理をどれだけ多角的に探れる？



実験制限値を持つ標的はS, Ti, Cu, Au, Pbだが、(Au,Pb)と(S,Ti,Cu)の組は従属ベクトル

近未来、Al標的で探索がなされるが、SやTiとは独立とは呼べず

AlとLi、または、SとLiが  $\theta > 0.1$  となり、模型選別として優れた標的

定量的に検討予定

新物理のスケールで残る平坦方向の数

# 高いスケールでCLFV演算子はどこまで縛れる？

$$\tilde{C}_{O,X}^{NN} = \sum_q G_O^{Nq} C_{O,X}^{qq} \quad \text{クォークレベルで独立な演算子は全部で82個}$$

係数@実験スケール

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{BR_{Al}^{exp}}{33}} &\gtrsim \left| 3C_{V,L}^{uu} + 3C_{V,L}^{dd} + 11C_{S,R}^{uu} + 11C_{S,R}^{dd} + 0.84C_{S,R}^{ss} + \frac{4m_N}{27m_c}C_{S,R}^{cc} + \frac{4m_N}{27m_b}C_{S,R}^{bb} \right| \\ &\gtrsim \left| 3C_{V,L}^{uu} + 3C_{V,L}^{dd} + \frac{\alpha}{\pi} \left[ 3C_{A,L}^{dd} - 6C_{A,L}^{uu} \right] \log + \frac{\alpha}{3\pi} [C_{V,L}^{ee} + C_{V,L}^{\mu\mu}] \log - \frac{\alpha}{3\pi} [C_{A,L}^{ee} + C_{A,L}^{\mu\mu}] \log \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\alpha}{3\pi} \left[ 2(C_{V,L}^{uu} + C_{V,L}^{cc}) - (C_{V,L}^{dd} + C_{V,L}^{ss} + C_{V,L}^{bb}) - (C_{V,L}^{ee} + C_{V,L}^{\mu\mu} + C_{V,L}^{\tau\tau}) \right] \log \right. \\ &\quad \left. + \lambda^{-as} \left( 11C_{S,R}^{uu} + 11C_{S,R}^{dd} + 0.84C_{S,R}^{ss} + \frac{4m_N}{27m_c}C_{S,R}^{cc} + \frac{4m_N}{27m_b}C_{S,R}^{bb} \right) \right. \\ &\quad \left. + \lambda^{-as} \frac{\alpha}{\pi} \left[ \frac{13}{6} \left( 11C_{S,R}^{uu} + \frac{4m_N}{27m_c}C_{S,R}^{cc} \right) + \frac{5}{3} \left( 11C_{S,R}^{dd} + 0.84C_{S,R}^{ss} + \frac{4m_N}{27m_b}C_{S,R}^{bb} \right) \right] \log \right. \\ &\quad \left. - \lambda^{aT} f_{TS} \frac{8\alpha}{\pi} \left[ 22C_{T,R}^{uu} + \frac{8m_N}{27m_c}C_{T,R}^{cc} - 11C_{T,R}^{dd} - 0.84C_{T,R}^{ss} - \frac{4m_N}{27m_b}C_{T,R}^{bb} \right] \log \right| \end{aligned}$$

$\mu \rightarrow e\gamma$ 、 $\mu \rightarrow 3e$ の実験結果との合わせ技で  
22個まで縛れる。まだまだ平坦方向が残る。。。

係数@ $\Lambda \sim m_W$

積極的に他のCLFV過程も探るべき！



まとめ

# まとめ

- ☑  $\mu^- - e^-$  転換はSMを超える新物理を探る優れたプローブの1つ
- ☑ 近い将来、DeeMe、COMET、Mu2eにより  $\mu^- - e^-$  転換探索は大きく感度向上。  
見つかるか否かは置いといて、計算不定性込みでどこまで新物理を探れる力を持つか調べるべき
- ☑ CLFV相互作用の型を特定するためには、少なくとも、4つの独立な原子核ターゲットが必要
- ☑ **独立なターゲットして働くのは、{Au or Pb}、{S or Ti or Cu}、Al、Li**
- ☑ **高いスケール(例： $\Lambda \sim m_W$ )で縛れるfundamental CLFV演算子の数は、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 、 $\mu \rightarrow 3e$ との合わせ技で、22個/88個。他のCLFV過程も積極的に探査するべし。**

南部陽一郎物理学研究所

# 素粒子現象論研究会 2019

日程： 11月23日（土）～25日（月）

会場： 大阪市立大学

主題： 場の理論、現象論に関わる物理全般（理論、実験問わず）

非摂動計算による現象論、有限温度の場の理論、模型構築、  
素粒子論的宇宙論、天文学、加速器現象論、フレーバー現象論、などなど

招待講演： 理論・実験の専門家を招待

北口 雅暁さん（名大、中性子精密探査）

村瀬 孔大さん（ペンシルバニア大、高エネルギー宇宙線）

尾田 欣也さん（阪大、波束効果を含めた場の理論） 他にも数名と交渉中

近々アナウンス予定。旅費補助、ゲストハウス有り。 質問は主催者（糸山、丸、山中）まで