PQ機構としてのバリオン数の破れ

津村 浩二 (九州大)

素粒子物理学の進展 2021 [基研研究会] 9月6-10日

Baryon number non-conservation as Peccei-Quinn mechanism

T. Ohata, K. Takeuchi, K. Tsumura

Phys. Rev. D104, 035026 (2021) hep-ph/2104.14139

目次

- 標準模型と偶発的対称性
- 強いCP問題とPQ機構
- PQ機構とレプトン数の破れ
- PQ機構とバリオン数の破れ
- まとめ

標準模型と偶発的対称性

標準模型とグローバル対称性

- くりこみ可能な範囲： $\mathcal{L}_{\rm SM} = \mathcal{L}_{\rm quarks} + \mathcal{L}_{\rm leptons} + \cdots$

  偶発的なグローバル対称性として：B# （バリオン数），**L#** （レプトン数）

$$\begin{cases} Q \to e^{i\theta_B/3} Q \\ u_R \to e^{i\theta_B/3} u_R \\ d_R \to e^{i\theta_B/3} d_R \end{cases} \qquad \begin{cases} L \to e^{i\theta_L} L \\ e_R \to e^{i\theta_L} e_R \end{cases}$$

- 量子論の範囲：“B-L” (量子効果により~~B#~~, ~~L#~~)

$$\partial_\mu j^\mu_B = \partial_\mu j^\mu_L = n_g \left(\frac{g^2}{32\pi^2} W^{a\mu\nu} \tilde{W}^a_{\mu\nu} - \frac{g'^2}{32\pi^2} F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} \right)$$

- 非くりこみ可能な範囲（高次演算子）：**BSMの持つ対称性を反映！**

レプトン数の破れと高次演算子

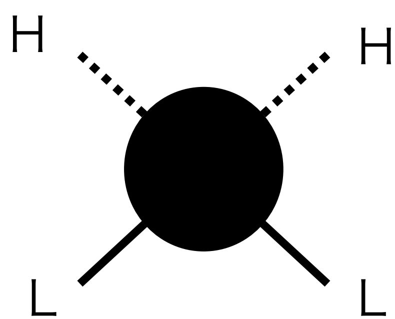
- SMの粒子場で高次演算子を書く。

$$\mathcal{O}_5 = LLHH$$ レプトン数を破る次元５の演算子

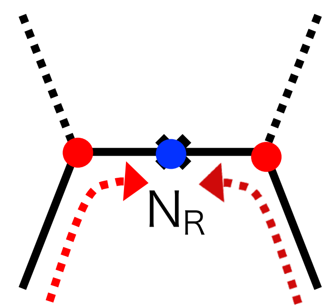
L: $(1,2)_{-1/2}$　　H: $(1,2)_{+1/2}$

→ 重い自由度を積分して非くりこみ可能演算子を得た

UV模型を指定しない記述



UV模型による記述



$$\mathcal{L} = {\color{red}Y_N}\overline{L}\widetilde{H}N_R + \frac{1}{2}{\color{blue}M_N}\overline{N_R^c}N_R + \mathrm{H.c.}$$

レプトン数の定義　　レプトン数の破れ

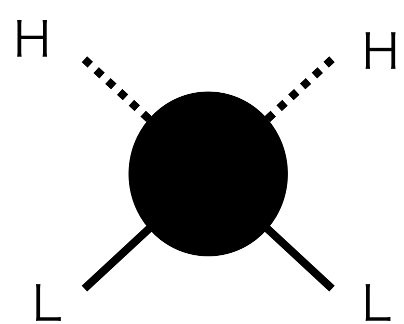
レプトン数の破れとニュートリノ質量

- 未知の新物理が**マヨラナニュートリノ**を予言

$$\mathcal{L}_{\rm eff} = \frac{1}{\Lambda}\mathcal{O}_5 + {\rm H.c.} \;\Rightarrow\; \frac{1}{2} M_\nu \overline{\nu_L^c} \nu_L + {\rm H.c.}$$

新物理を知らなくても高次演算子から新物理の予言が議論できる

UV模型を指定しない記述



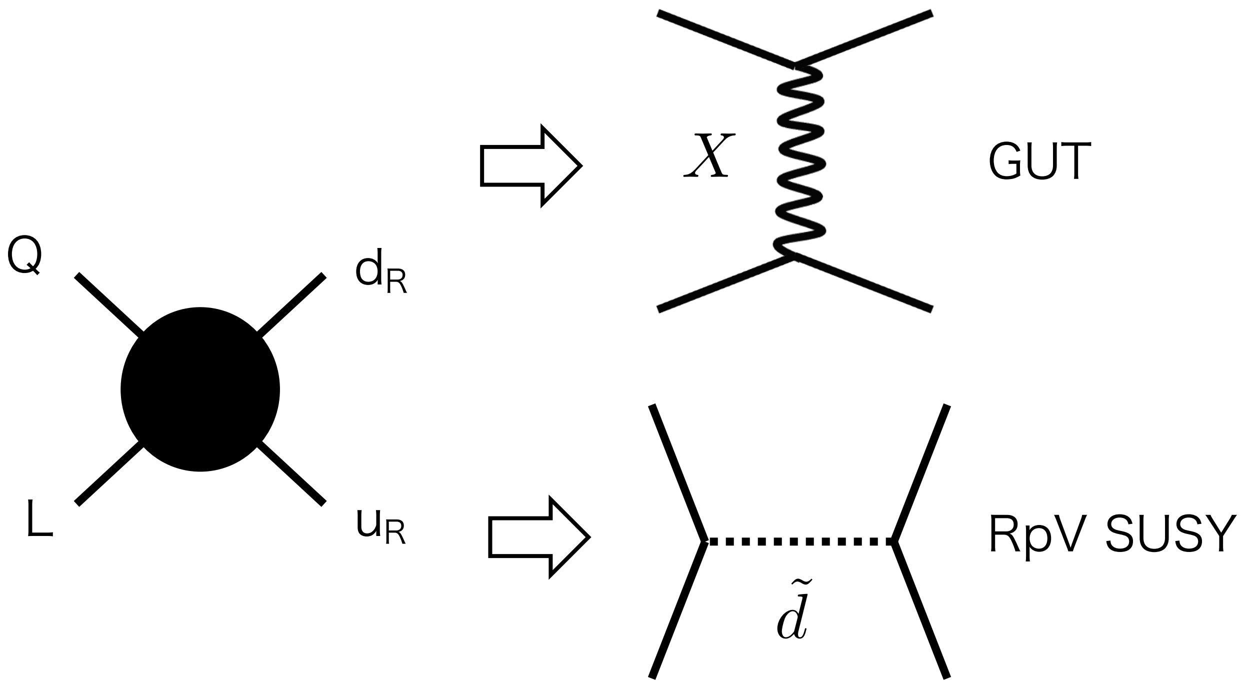
- ✓ UV模型は高次演算子を適切に分解することで得られる。
- ✓ ツリーで分解するシーソーが３タイプ。
- ✓ ループを通じて分解する輻射型シーソーが多数。
- ✓ 輻射型では暗黒物質などと関係する模型もできる。

バリオン数の破れと高次演算子

- SMの粒子場で高次演算子を書く。

$$\mathcal{O}_6 = u_R d_R Q L, \cdots$$ バリオン数を破る次元6の演算子

u_R: $(3,1)_{-2/3}$　d_R: $(3,1)_{+2/3}$　Q: $(3,2)_{+1/6}$



新物理と対称性

- 高次演算子の例

	L#	B#	BSMの対称性
$\mathcal{O}_5 = LLHH$	$\times_2$	○	“B”保存
➔ 0ν2β (M_ν)			
$\mathcal{O}_6 = u_R d_R Q L, \cdots$	$\times_1$	$\times_1$	“B-L”保存
➔ 核子崩壊			
$\mathcal{O}_7 = u_R d_R d_R L^c H^c, \cdots$	$\times_{-1}$	$\times_1$	“B+L”保存

L#やB#はSMの偶発的対称性に過ぎない

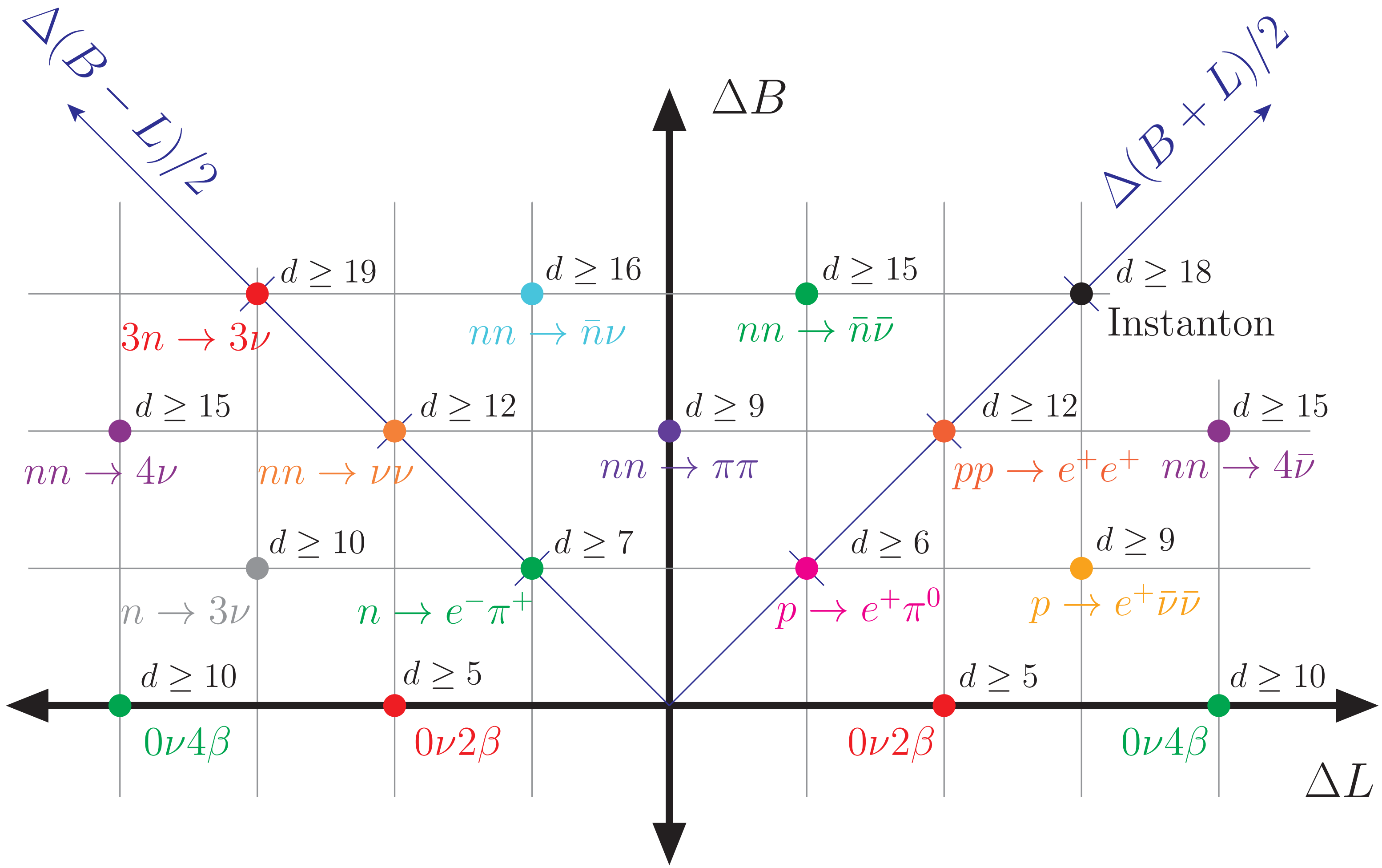
BSMの信号 ➔ 核子崩壊

BSMの対称性で制御できる

レプトン数やバリオン数にもとづく新物理模型は作れないか？

新物理と対称性

Heeck, Takhistov (19)



強いCP問題とPQ機構

強いCP問題

't Hooft (76)

- QCDはCPが破れているのが普通

$$\mathcal{L}_{\rm QCD} = -\frac{1}{4}G_a^{\mu\nu}G^a_{\mu\nu} - \theta\,\frac{\alpha_s}{8\pi}G_a^{\mu\nu}\widetilde{G}^a_{\mu\nu} + \sum_q \bar{q}(i\not{D} - M_q \cancel{e^{i\theta_q}})q$$

左巻き場と右巻き場の位相を再定義(カイラル変換)すると

$$\begin{cases} q_L \to e^{-i\theta_q/2}q_L \\ q_R \to e^{+i\theta_q/2}q_R \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \bar{\theta} = \theta - \sum_q \theta_q$$

✓ カイラル対称性はクォークの質量項で破れているため, カイラル変換で質量項の位相が消せる。

✓ 一方で, カイラル変換をすると θ 項におつりが出る。

✓ クォークの質量行列は一般に複素。KM位相の存在も明らかなのでCPは破れるのが普通。

しかし, 中性子のEDMの測定から $d_n/e \sim 10^{-15}\bar{\theta} < 1.9\times 10^{-26} \quad (\bar{\theta} \lesssim 10^{-11})$

不自然なまでに小さい！背後に物理？

Peccei-Quinn (77)

PQ対称性

- カイラル対称性を新たなスカラー場で回復させる。

$$\mathcal{L}_{\rm PQ} = -\frac{1}{4}G_a^{\mu\nu}G^a_{\mu\nu} - \theta\,\frac{\alpha_s}{8\pi}G_a^{\mu\nu}\widetilde{G}^a_{\mu\nu} + \sum_q \left\{\bar{q}i\not{D}q - \left(y\,\bar{q}_L\phi\,q_R + \text{H.c.}\right)\right\}$$

カイラル変換で θ 項が変えられるので, そのおつりを複素スカラー場に吸収させる

$(q \to e^{-i\gamma_5\theta_q}q)$

場の再定義で消せるので, もはやパラメタ θ は物理的でない

PQ対称性 $\begin{cases} q_L \to e^{-i\theta_q/2}q_L \\ q_R \to e^{+i\theta_q/2}q_R \\ \phi \to e^{-i\theta_q}\phi \end{cases}$

✓ 左巻きと右巻きの変換が異なっていればなんでもよい

✓ Diracラグランジアンはベクトル的なバリオン数も保存するので, 適当な再定義で軸性ベクトル的なカイラル変換ともみなせる

axial

- 有効ラグランジアン

axion (NGB)

$$\phi(x) = (f_a + \sigma(x))\,e^{i\,a(x)/f_a}$$

$$\mathcal{L}_{\rm eff} = \mathcal{L}_{\rm QCD} + \frac{1}{2}(\partial_\mu a)^2 + (\theta - a/f_a)\frac{\alpha_s}{8\pi}G\widetilde{G} + \cdots$$

NGBはポテンシャルを持たない ⇔ NGBはシフト対称性を持つ

Weinberg (78), Wilczek (78)

PQWWアクシオンの棄却

- SMの複素スカラーはヒッグス二重項
  - ✓ 対称性の破れに伴う３つのNGBはW/Zで吸収される。

    → Θ項を消すNGBが残らない。
  - ✓ グローバル対称性を持つ2HDM：axion = CP-odd Higgs

    → Θ項を消せる　PQ対称性の破れがEWスケール！ $f_a = \sqrt{v_u^2 + v_d^2}$

$$\mathcal{L}_{\rm 2HDM} = +\overline{Q} Y_u H_u u_R + \overline{Q} Y_d H_d d_R - V(H_u, H_d) \leftarrow +\cancel{\lambda_5 (H_u^\dagger H_d)}^2$$

- 予言： $\mathcal{B}(K^+ \to \pi^+ a) \approx \dfrac{f_\pi^2}{f_a^2} \times \mathcal{B}(K^+ \to \pi^+ \pi^0) \sim 10^{-5}$　　当時ですら棄却

- (見えない)DFSZアクシオン

$$H_u^T (i\sigma_2) H_d (S^*)^2 \quad \Rightarrow \quad f_a = \sqrt{v_S^2 + v_u^2 v_d^2 / v_S^2}$$　大きな真空期待値で制限を回避

Zhitnitsky (80), Dine-Fischier-Srednicki (81)

Kim (79), Shifman-Vainshtein-Zakharov (80)

KSVZ模型

- 見えないアクシオンの別の例
  - ✓ PQ対称性はSM一重項のみで破る
  - ✓ カラーを持つ新フェルミオンに対するカイラル対称性

$$S = \frac{f_a + \sigma}{\sqrt{2}}\, e^{i\,a(x)/f_a}$$

$$\mathcal{L}_{\rm KSVZ} = Y_\Psi\, S\, \overline{\Psi}_L \Psi_R + \text{H.c.}$$

QCDでやった例を全て新粒子で置き換えただけ

$$\begin{cases} \Psi \to e^{-i\gamma_5 \alpha}\, \Psi \\ S \to e^{-2i\alpha}\, S \end{cases}$$

新粒子のレプトン数やバリオン数はまったくの**未定義**

	S	Ψ_L	Ψ_R
$\mathrm{SU}(3)_C$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$
$\mathrm{SU}(2)_L$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$
$\mathrm{U}(1)_Y$	0	–	–
$\mathrm{U}(1)_{\rm PQ}$	-2	-1	$+1$
$\mathrm{U}(1)_\Psi$	0	$+1$	$+1$
$\mathrm{U}(1)_L$	–	–	–
$\mathrm{U}(1)_B$	–	–	–

新フェルミオンに対するカイラル対称性

新フェルミオンのバリオン数のようなもの

$$\alpha\, Q_{\rm PQ} + \beta\, Q_\Psi$$

線形結合も対称性を保つので, Sのチャージと
Ψ_L or Ψ_Rのチャージが非ゼロであることが重要

PQ機構とレプトン数の破れ

PQ = L#

Shin (87)

● シーソー模型を介してレプトン数を課す方法

$$M_N \to y_N S$$

$$\mathcal{L} = Y_N \overline{L}\widetilde{H} N_R + \frac{1}{2} M_N \overline{N_R^c} N_R + \text{H.c.}$$

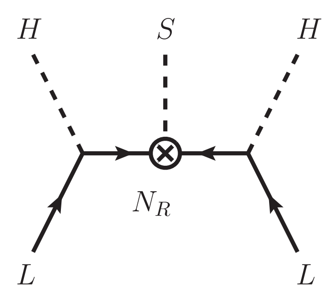
レプトン数の定義　　レプトン数の破れ

→ PQ対称性とレプトン数対称性を同一視：Majoraxion (**Majoron** = Axion)

レプトン数の破れのNGB

あまり本質的でないが, どちらも比較的大きな中間エネルギースケールが必要な物理でそれらを統合できる

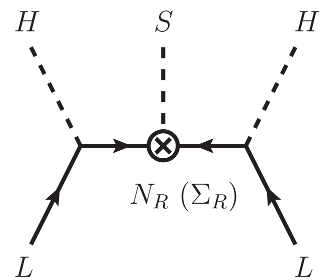
	S	Ψ_L	Ψ_R
$\mathrm{SU}(3)_C$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$
$\mathrm{SU}(2)_L$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$
$\mathrm{U}(1)_Y$	0	$-$	$-$
$\mathrm{U}(1)_{\mathrm{PQ}}$	-2	-1	$+1$
$\mathrm{U}(1)_\Psi$	0	$+1$	$+1$
$\mathrm{U}(1)_L$	-2	$-$	$-$
$\mathrm{U}(1)_B$	$-$	$-$	$-$



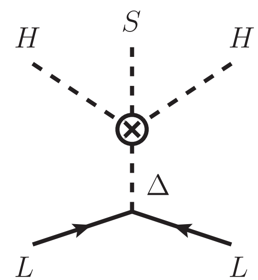
PQチャージと同じにとれる
（異なっても良いが線形結合を取り直せば同じ）

Majoraxion模型の亜種

- 他のタイプのシーソー模型でも Majoraxion 模型化できる

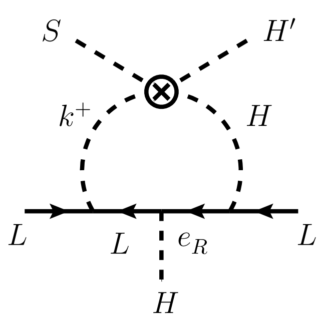


タイプ I (III) 型

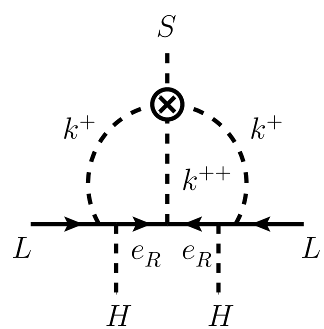


タイプ II 型

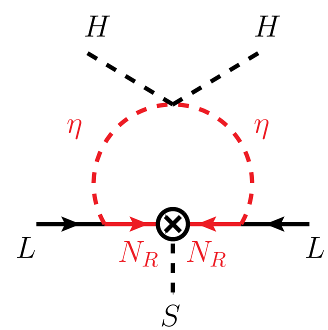
- 輻射シーソーでも同様



Zee 型

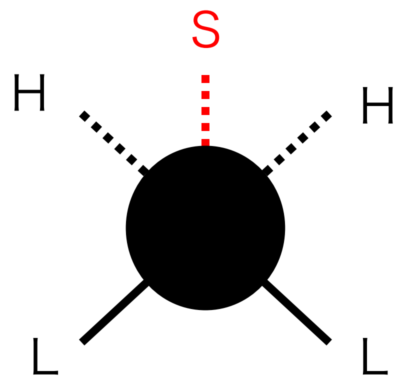


Zee-Babu 型



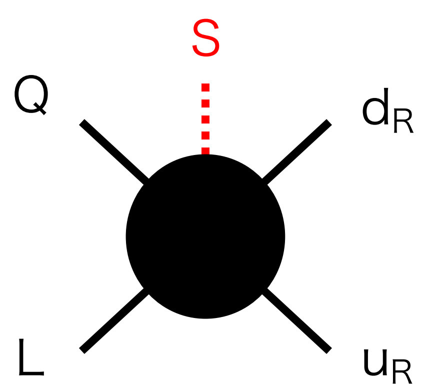
Ma 型

PQ機構とレプトン数の破れ



PQ機構とバリオン数の破れ

PQ機構とバリオン数の破れ



この例ではレプトン数も破る

バリオン数の決定

- SがKSVZクォークと湯川結合を持つことを仮定する

$$\mathcal{L}_{\rm KSVZ} = Y_\Psi \, S \, \overline{\Psi}_L \Psi_R + \text{H.c.}$$

- Sのレプトン数とバリオン数は高次演算子を導入して決定する

$$\mathcal{L}_{\rm eff} = \kappa \, S^* u_R d_R Q L + \text{H.c.}$$

このとき, 理論はB#とL#のそれぞれを保存する

- Sが真空期待値を持つと $U(1)_{\rm B} \times U(1)_{\rm L} \ \rightarrow \ U(1)_{\rm B-L}$

B+Lの破れに伴うNGBが axion になる

	S	Ψ_L	Ψ_R
$\mathrm{SU}(3)_C$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$
$\mathrm{SU}(2)_L$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$
$\mathrm{U}(1)_Y$	0	$-$	$-$
$\mathrm{U}(1)_{\rm PQ}$	-2	-1	$+1$
$\mathrm{U}(1)_\Psi$	0	$+1$	$+1$
$\mathrm{U}(1)_L$	$+1$	$-$	$-$
$\mathrm{U}(1)_B$	$+1$	$-$	$-$

レプトン数は最初から破っておくこともできる

$$\mathcal{L} = Y_N \overline{L}\widetilde{H} N_R + \frac{1}{2} M_N \overline{N_R^c} N_R + \text{H.c.}$$

この場合には, **PQ = B#**

Sakhaxion (Axion = Sakharon)

バリオン数の決定

- KSVZクォークのバリオン数を決定する

$$\mathcal{O}'_{\rm mix} = \{\overline{Q}\widetilde{H}\Psi_R^U, \overline{\Psi_L^U}u_R, \overline{Q}H\Psi_R^D, \overline{\Psi_L^D}d_R\}$$ これらの演算子のどれかを選ぶ

通常のKSVZ模型： KSVZクォークのSMクォークへの崩壊を許すために,
KSVZクォークとSMクォークの**B#**が同じになるように演算子を導入する

- 今の場合, SのB#が決まっているので, 上の方法で決めたのと異なるカイラリティのKSVZクォークのB#は湯川を通じて決まる

	S	Ψ_L	Ψ_R
$\mathrm{SU}(3)_C$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$	$\mathbf{3}\,(\mathbf{6},\mathbf{8},\cdots)$
$\mathrm{SU}(2)_L$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$	$\mathbf{1}\,(\mathbf{2},\mathbf{3},\cdots)$
$\mathrm{U}(1)_Y$	0	$-$	$-$
$\mathrm{U}(1)_{\rm PQ}$	-2	-1	$+1$
$\mathrm{U}(1)_\Psi$	0	$+1$	$+1$
$\mathrm{U}(1)_L$	$+1$	0	-1
$\mathrm{U}(1)_B$	$+1$	$+1/3$	$-2/3$

具体例：

$\mathbf{B}(\Psi_R^U) = -2/3, \mathbf{L}(\Psi_R^U) = -1$

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = &- y_\Psi\, S\, \overline{\Psi_L^{Ua}}\Psi_R^{Ua} \\ &+ \kappa\, S^* u_R d_R Q L \\ &- \mu_U^i\, \overline{\Psi_L^{Ua}} u_{iR}^a \\ &+ \mathrm{H.c.}\end{aligned}$$

$\mathbf{B}(\Psi_L^U) = +1/3, \mathbf{L}(\Psi_L^U) = 0$

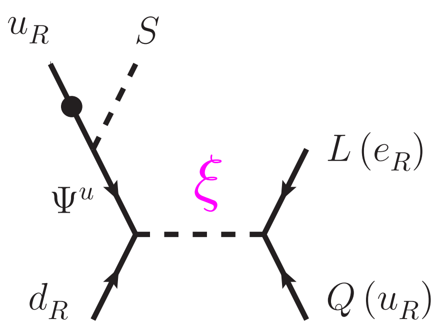
$\mathbf{B}(S) = +1, \mathbf{L}(S) = +1$

くりこみ可能な模型：PQ = B+L

- 有効演算子をくりこみ可能な演算子に分解する

Majoraxion模型の亜種で説明したようにツリー, ループ, 入れる粒子によってたくさんの可能性がある

■ 追加のスカラーを1つだけ導入する例 （チャージは読み取っていけばよい）



$$\mathcal{L} = -\, y_\Psi\, S\, \overline{\Psi_L^{Ua}} \Psi_R^{Ua} - \mu_U^i\, \overline{\Psi_L^{Ua}} u_{iR}^a - y_{\Psi D}^i\, \epsilon_{abc} \xi^a \overline{(\Psi_R^{Ub})^C} d_{iR}^c$$
$$- \left[+ y_{QL}^{ij} \overline{(Q_i^a)^C} (i\sigma_2) L_j + y_{UE}^{ij} \overline{(u_{iR}^a)^C} e_{Rj} \right] (\xi^a)^* + \mathrm{H.c.}$$

レプトクォーク

B-Lを保存する

- 陽子崩壊を予言する $\mathcal{L}_{\rm eff} = \kappa \langle S^* \rangle u_R d_R Q L + \mathrm{H.c}$ $\kappa = -\dfrac{\mu_U y_{\Psi D} y_{QL}}{M_\Psi M_\xi^2}$

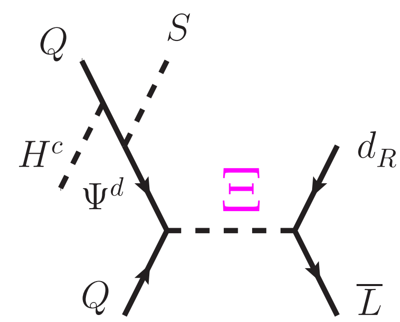
$$\tau_{p\to\pi^0 e^+} \simeq (2.4\times 10^{34}\,\mathrm{yrs}) \times \left(\frac{0.2}{\mu_U/M_\Psi}\right)^2 \left(\frac{1}{|y_{\Psi D}|}\right)^2 \left(\frac{1}{|y_{q\ell}|}\right)^2 \left(\frac{M_\xi}{2.0\times 10^{15}\mathrm{GeV}}\right)^4$$

SKの制限で規格化

✓ 模型のパラメタの不定性は多い

✓ 典型的なレプトクォークの質量は**PQスケールより大きい**

くりこみ可能な模型：PQ = B-L



- 次元７の高次演算子を出発点にとる

$$\mathcal{O}_8 = S^* \mathcal{O}'_7 = S^* (d_R Q Q \overline{L} H^*)$$ 出発点の演算子は B+L を保存している

■ 追加のスカラーを1つだけ導入する例

$$\mathcal{L} = -\, y_\Psi\, S^* \overline{\Psi^{Da}_L} \Psi^{Da}_R - y'^{i}_{D} \overline{Q^a_i} H \Psi^{Da}_R - y^i_{\Psi Q}\, \epsilon_{abc}\, \Xi^a \overline{(\Psi^{Db}_L)^C} Q^c_i - y^{ij}_{\overline{L}D} (\Xi^a)^* \overline{L_i} d^a_{jR} + \mathrm{H.c.}$$

レプトクォーク

B+Lを保存する

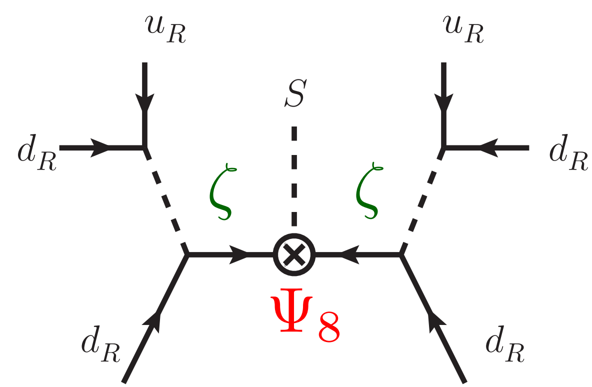
- <u>前の例とは異なる</u>陽子崩壊を予言する

$$\tau_{p\to K^+\nu_i} \simeq (6.6 \times 10^{33}\,\mathrm{yrs}) \times \left(\frac{10^{-9}}{\frac{y'_D v_{\mathrm{EW}}}{\sqrt{2}}/M_\Psi}\right)^2 \left(\frac{1}{|y_{\Psi Q}|}\right)^2 \left(\frac{1}{|y_{\overline{L}D}|}\right)^2 \left(\frac{M_\Xi}{8.5\times 10^{10}\mathrm{GeV}}\right)^4$$

SKの制限で規格化

✓ 荷電レプトンへの崩壊モードはない
✓ π への崩壊ももちろんあるが K の方が制限が強い
✓ ヒッグス真空期待値の挿入により反応率が抑制される
✓ 典型的なレプトクォークの質量は**PQスケールより小さい**

Ohata模型



- 次元９の高次演算子を出発点にとる

  中性子-反中性子振動（ΔB=2）を引き起こす演算子

  - KSVZクォークはカラー８表現を選ぶ

    c.f. Ma 07, gluino-axion

  - 追加のスカラー(ダイクォーク)を１つだけ導入する

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2} y_8 \, S^* \overline{(\Psi_{8L}^A)^C} \, \Psi_{8L}^A - y_\zeta^{ij} \epsilon_{abc} (\zeta_a)^* \overline{(u_{iR}^b)^C} d_{jR}^c - y_{8D}^i \, \zeta_a (T^A)^a{}_b \, \overline{\Psi_{8L}^A} d_{iR}^b + \text{H.c.}$$

- 中性子-反中性子振動を予言する

$$\mathcal{L}_{\text{eff}}^{\Delta\mathbf{B}=2} = \frac{y_\zeta^{ij} y_\zeta^{kl} y_{8D}^m y_{8D}^n}{12 M_\zeta^4 M_8} \overline{(u_{iR}^a)^C} d_{jR}^b \overline{(u_{kR}^c)^C} d_{lR}^d \overline{(d_{mR}^e)^C} d_{nR}^f + \text{H.c.}$$

$$\tau_{n\bar{n}} = {\Gamma_{n\bar{n}}}^{-1} = (7 \times 10^8 \, \text{s}) \times \left(\frac{M_\zeta}{400 \, \text{TeV}} \right)^4 \left(\frac{M_8}{400 \, \text{TeV}} \right) \left(\frac{1}{|y_\zeta^{11}|} \right)^2 \left(\frac{1}{|y_{8d}^1|} \right)^2$$

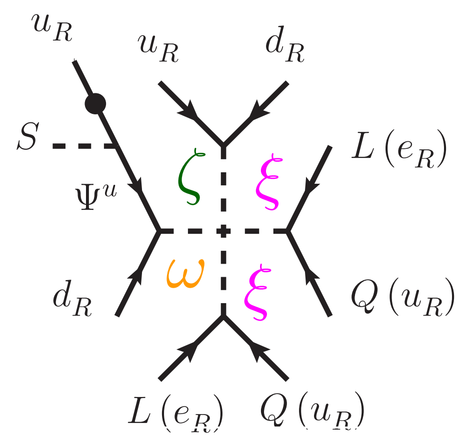
SKの制限： > 4.7 x 10^8 s

✓ 新粒子の典型的な質量は**PQ**スケールよりずっと小さい

✓ が, 加速器で作れるほどでもない

✓ フレーバー実験とはよい勝負なので, 湯川の構造が制限される

Takeuchi模型



- 次元12の高次演算子を出発点にとる

  二重核子崩壊（ΔB=ΔL=2）を引き起こす演算子

  - <S>はこれまでの模型とは異なるB#とL#を破るので, ξ や ζ を導入しても陽子崩壊や中性子反中性子振動は起こらない
  - さらにテトラクォークを導入すれば, くりこみ可能に分解できる

$$\mathcal{L} = -\,y_\Psi S\,\overline{\Psi_L^{Ua}}\Psi_R^{Ua} - \mu_U^i\,\overline{\Psi_L^{Ua}}u_{iR}^a - \left[y_{QL}^{ij}\overline{(Q_i^a)^C}(i\sigma_2)L_j + y_{UE}^{ij}\overline{(u_{iR}^a)^C}e_{jR}\right](\xi^a)^*$$
$$-\,\epsilon_{abc}\left[y_{QQ}^{ij}\overline{(Q_i^b)^C}(i\sigma_2)Q_j^c + y_{UD}^{ij}\overline{(u_{iR}^b)^C}d_{jR}^c\right](\zeta_a)^* - y_{\Psi D}^i\epsilon_{abc}\overline{(\Psi_R^{Ua})^C}d_{iR}^b\,\omega^c$$
$$-\,\lambda'\,\xi^a\xi^b\zeta_a(\omega^b)^* + \mathrm{H.c.}$$

- 二重核子崩壊を予言する　**陽子は崩壊しないが, 重陽子は崩壊する**

$$\tau_{pp\to e^+e^+} = \Gamma^{-1}_{pp\to e^+e^+} \simeq (5\times 10^{33}\,\mathrm{yrs}) \times \left(\frac{M_\omega}{2\,\mathrm{TeV}}\right)^4\left(\frac{M_\zeta}{2\,\mathrm{TeV}}\right)^4\left(\frac{M_\xi}{2\,\mathrm{TeV}}\right)^8$$

SKの制限： > 4.2 x 10^{33} s

$$\times\left(\frac{0.2}{\mu_U^1/M_\Psi}\right)^2\left(\frac{1}{|\lambda'|}\right)^2\left(\frac{1}{|y_{UD}^{11}|}\right)^2\left(\frac{1}{|y_{UE}^{11}|}\right)^4\left(\frac{1}{|y_{\Psi D}^1|}\right)^2$$

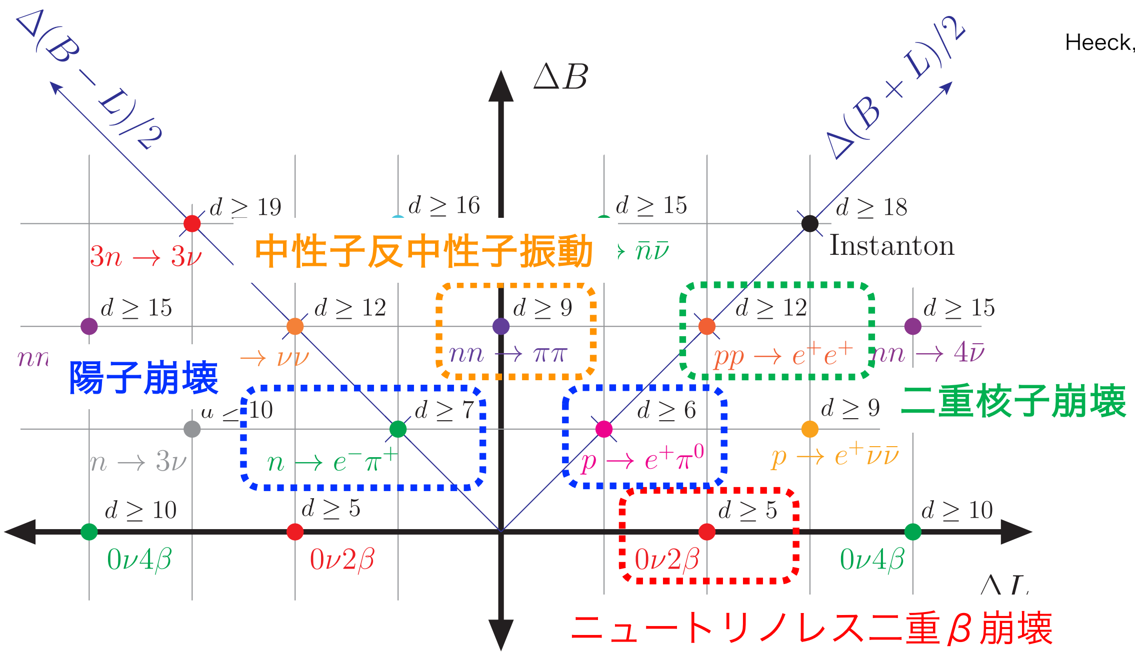
✓ 加速器実験での制限も期待できる

✓ フレーバー実験はとても厳しく湯川の構造を制限する

まとめ

- PQ = αB+βL
- レプトン数やバリオン数を手がかりに新物理を探るのが面白そう

Heeck, Takhistov (19)



- ハイパーカミオカンデ計画は開始した！（ターゲットはたくさん）