



素粒子原子核研究所  
Institute of Particle and Nuclear Studies

# Lepton Flavor Violation, Lepton Flavor Universality の基礎

宮林 謙吉

奈良女子大学・自然科学系・物理学領域  
& 高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所

Flavor Physics Workshop 2023

2023 Nov. 24<sup>th</sup>

# 自己紹介

- 宮林 謙吉(みやばやし けんきち)
- 名古屋生まれ・名古屋育ち・名古屋大学卒業
- 博士論文: TRISTANにおけるハドロン生成全断面積の測定とrunning- $\alpha$ の確認
- Belle/Belle IIでは主に以下の項目に従事
  - 電磁カロリメーターの建設・運用・較正・upgrade向けR&D
  - 中性Bメソン崩壊におけるtime-dep. CPV測定
  - charmonium-likeなエキゾチックハドロンの探索

電子やクォークのような素粒子は肉眼で見えないし、手で触れることもできないけれど、本当に存在して、身の回りの物質を形作っているということが不思議で、どうしたらそんなことが確かめられるのか、と気になったのは高校生の頃でした。

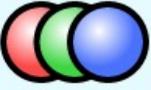
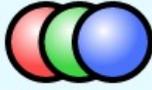
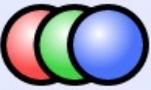
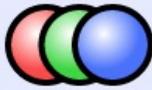
# 科学の進みかた

- 原則を確立するために皆が汗をかく時代
  - 1980年代～1990年代: 電弱理論とQCD＝標準模型
  - PEP, PETRA, TRISTAN, LEP ( $e^+e^-$ ): ゲージ相互作用
  - Sp $\bar{p}$ S, TEVATRON ( $p\bar{p}$ ): W, Zボソン、トップ発見
  - LHC ( $pp$ ): ヒッグス発見
- 原則が確立すると、例外の探索と理解に挑戦
  - クォークのCP非保存: Belle, BaBar→小林・益川理論
  - 小林・益川以外のCP非保存の源はどこに？
  - レプトンフレーバー、バリオン数はなぜ保存する？  
→ 変化する事象は本当にないのか？
  - レプトンユニバーサルティーはどこまで厳密に成立？

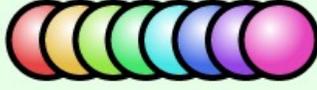
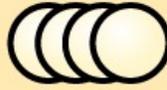
# 素粒子の標準理論

物質粒子 (反粒子あり)  
matter (fermions)

クォーク  
quarks

	I	II	III
クォーク	 <b>u</b> : up	 <b>C</b> : charm $M_c = 1.3 \text{ GeV}$	 <b>t</b> : top $M_t = 175 \text{ GeV}$
クォーク	 <b>d</b> : down	 <b>S</b> : strange	 <b>b</b> : bottom $M_b = 4.2 \text{ GeV}$
レプトン	 <b>e</b> : electron $M_e = 0.511 \text{ MeV}$	 <b><math>\mu</math></b> : muon $M_\mu = 106 \text{ MeV}$	 <b><math>\tau</math></b> : tau $M_\tau = 1.777 \text{ GeV}$
レプトン	 <b><math>\nu_e</math></b> : electron neutrino	 <b><math>\nu_\mu</math></b> : muon neutrino	 <b><math>\nu_\tau</math></b> : tau neutrino

ゲージ粒子  
gauge bosons

電磁気力 electromagnetic	 <b><math>\gamma</math></b> : photon
強い力 strong	 <b>g</b> : gluon
弱い力 weak	 : Z boson  : W <sup>+</sup> boson  : W <sup>-</sup> boson
	$M_Z = 91 \text{ GeV}, M_W = 80 \text{ GeV}$ ヒッグス粒子 Higgs bosons  <b>H<sup>0</sup></b> : Higgs boson  <b>H<sup>+</sup>, H<sup>-</sup>, h, A<sup>0</sup></b> $M_H = 125 \text{ GeV}$

重力は弱すぎるので無視し、それ以外の3つの力是对応するボソンの交換によりはたらく。

ゲージ原理: 粒子の質量はもともとゼロで、対称性の自発的破れに伴い質量が与えられたと考える。

# 素粒子・宇宙物理に残された 4つの大きな謎

## 4つの力の統一

- 重力を含む力の統一と自発的対称性の破れにより力が分化する過程の理解

## 反物質が消えた理由

- 物質と反物質の振る舞いの違いとそれを引き起こす機構の解明

## 宇宙の構成

- 標準理論で説明できる物質の量は5%. 残りを構成する暗黒物質とダークエネルギーの解明

## 宇宙の形成過程

- 宇宙初期のインフレーションやビックバンがどのように起こり、どう発展したか解明

電子・陽電子衝突実験でBメソンやタウレプトンの  
詳細な研究、ダークセクター粒子の探索を行うこと  
により手がかりを得られる可能性がある課題

# 状態遷移の量子力学

- フェルミの黄金律

$$|i\rangle = \psi_i \quad \text{始状態}$$

$$|f\rangle = \psi_f \quad \text{終状態}$$

$$\langle f|\mathcal{H}|i\rangle = \int \psi_f^* \mathcal{H} \psi_i d^3x \quad \text{遷移振幅または Matrix element}$$

反応断面積  
崩壊レート等

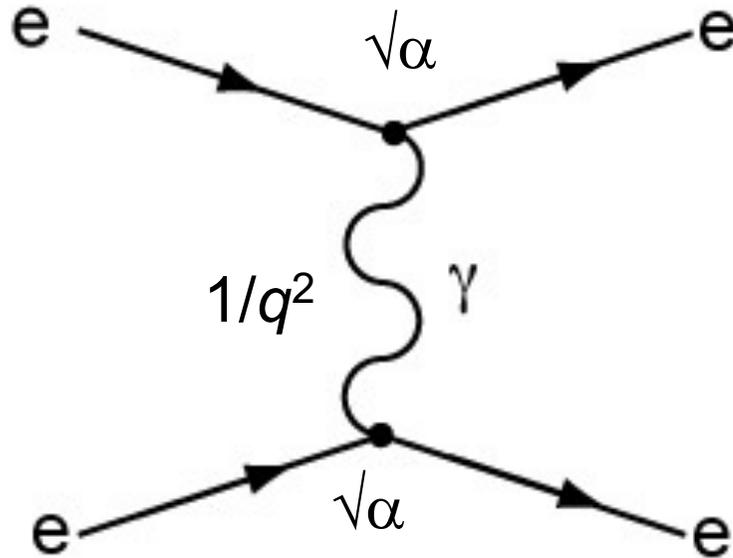
$$R(i \rightarrow f) = \int d\rho_f |\langle f|\mathcal{H}|i\rangle|^2$$

終状態の状態数 = Phase space: 運動量空間の中で占める領域の大きさ

適切な始状態  $|i\rangle$  と終状態  $|f\rangle$  を選び、理論の枠組みを決めると相互作用ハミルトニアンを書くことができる。

測定値から関係するパラメーター(相互作用の結合、粒子の質量・スピンなど)を決定する。

# 力=相互作用の量子化



$q^2$  : momentum transfer

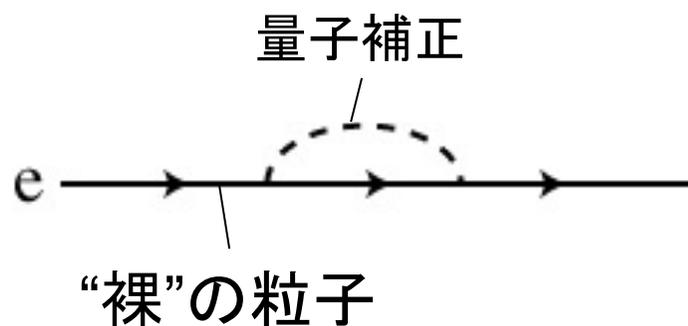
力を媒介するボソンを交換

- 電磁気力: 光子 ( $\gamma$ )
  - 電荷に結合
- 弱い相互作用: ウィークボソン
  - $Z^0$  (中性カレント)
  - $W^+$  または  $W^-$  (荷電カレント)
- 強い相互作用: グルーオン
  - カラー荷 ( $r, g, b$ )
- 相互作用ハミルトニア:  $\mathcal{H}$  は、ボソンのプロパゲーターと結合定数の積。

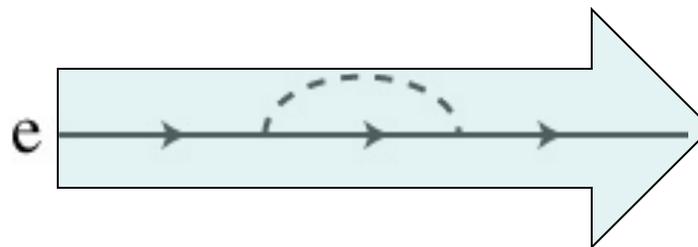
$$\frac{g_1 g_2}{(q^2 - M_X^2) + i\Gamma_X M_X}$$

# くりこみ可能な場の量子論

- 相互作用による量子補正の寄与は無量大
- 粒子の観測量(質量や電荷)は“裸の量” + 量子補正
- 無量大(正則化変数の関数) - 無量大(同) = 有限量
- くりこんだ量は、実験で測定値の入力が必須。

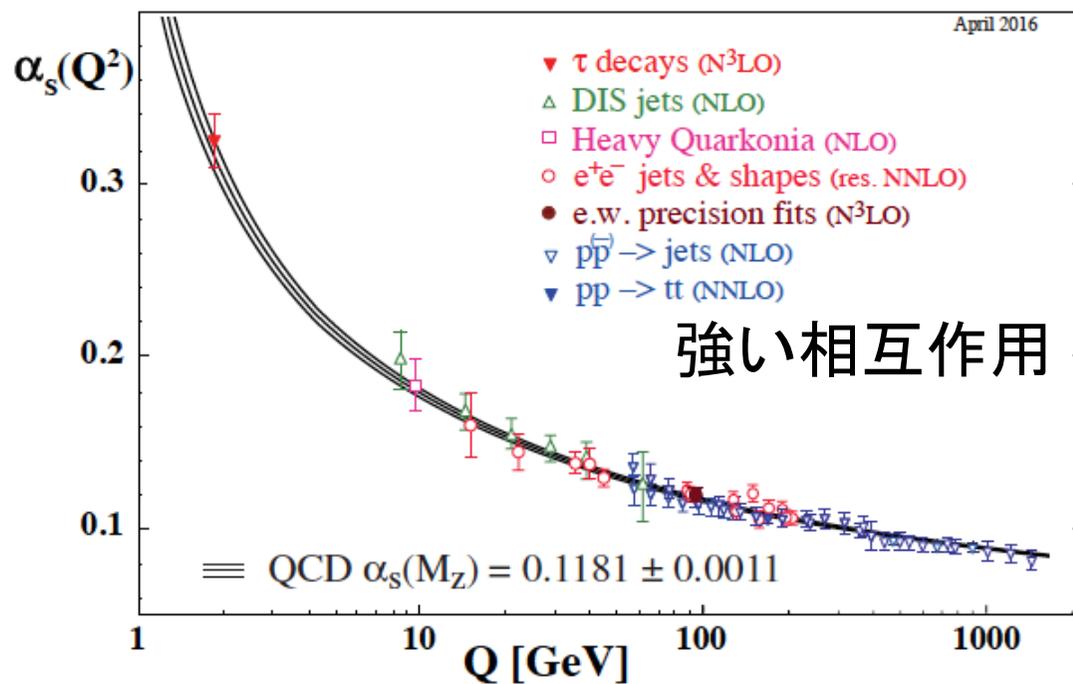
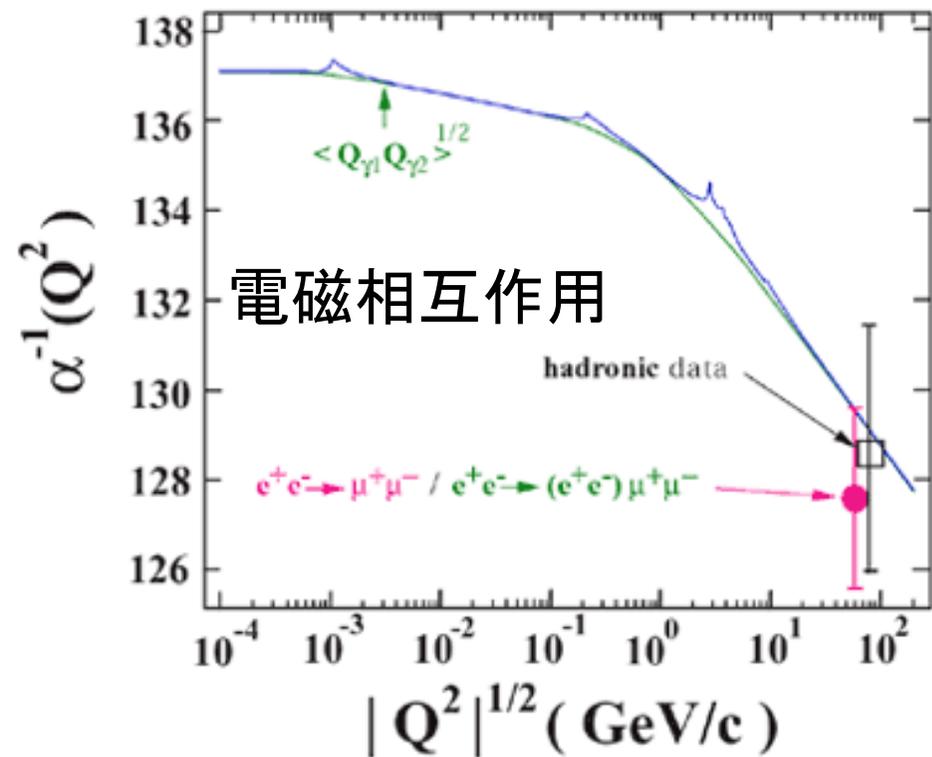


くりこみ操作の前



くりこんだ後

# 結合の大きさ(力の強さ)のランニング



結合の大きさ(電磁気力なら $\alpha=1/137$ )はエネルギーとともに変化。  
 教訓: ある量を異なるエネルギースケールで測ることは意味がある。

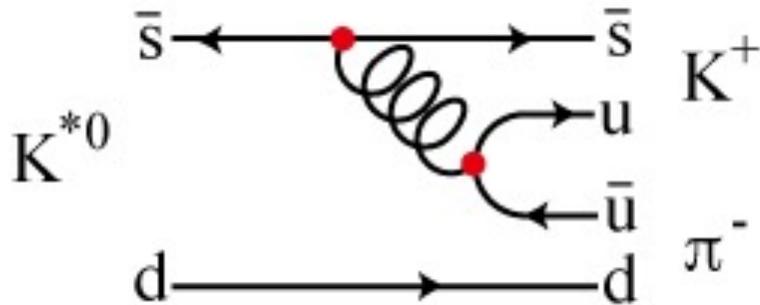
# 対称性と保存則

- ネーターの定理: 対称性があると保存量が出現する。
- 時空間の変数(無限小変換が存在するもの)
  - 時間の並進対称性→エネルギー保存
  - 座標の並進対称性→運動量保存
  - 座標の回転対称性→角運動量保存
- ゲージ対称性=相互作用の性質に起因するもの
  - 電磁気力のU(1)ゲージ対称性→電荷の保存

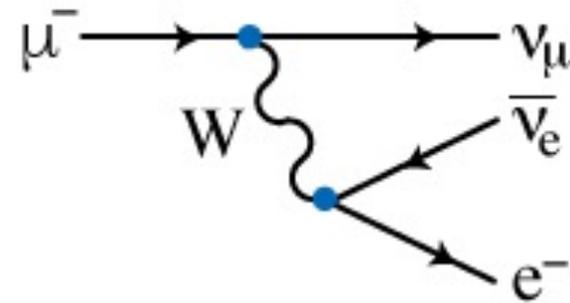
# 背後にある対称性が不明な保存則

- これまでの実験では保存することがわかっているが、それを裏打ちする対称性が何なのかわかっていない量がある。

- バリオン数(クォークの数)
- レプトンフレーバー



$K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$  バリオン数は  
 $-1/3 + 1/3 \rightarrow -1/3 + 1/3 -1/3 + 1/3$

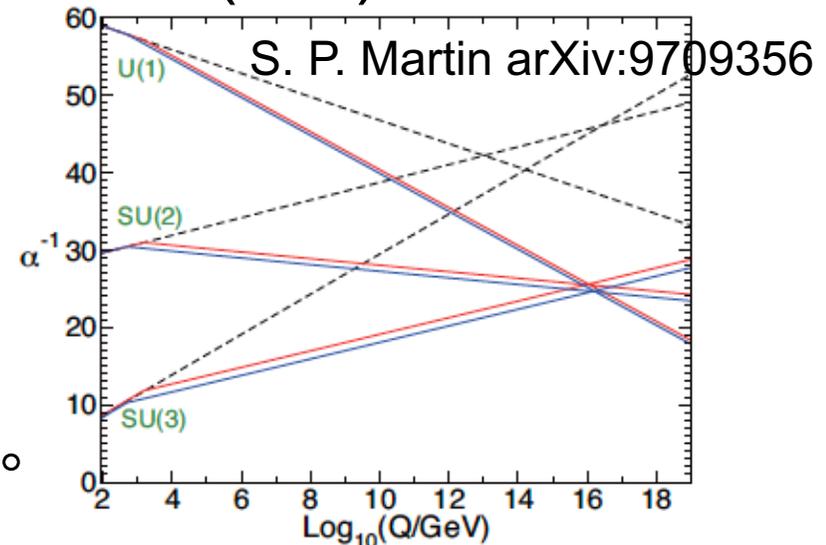


$\mu^- \rightarrow e^- \nu_e \nu_\mu$   
 $L_\mu +1 \rightarrow +1$   
 $L_e 0 \rightarrow +1 -1$

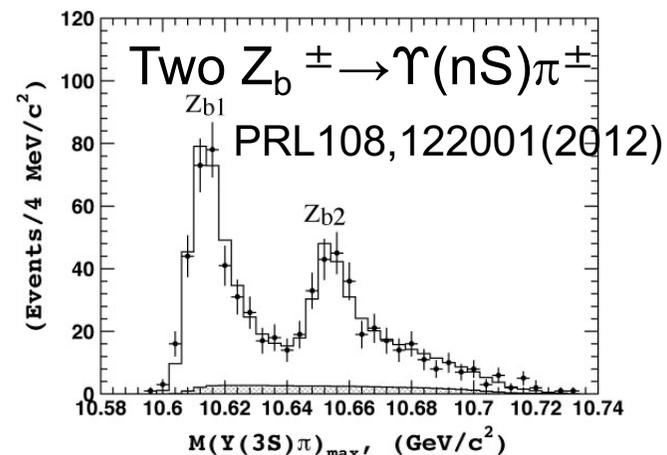
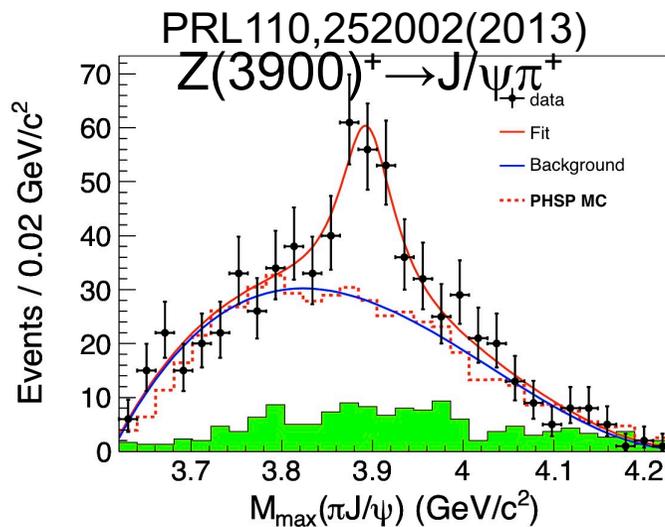
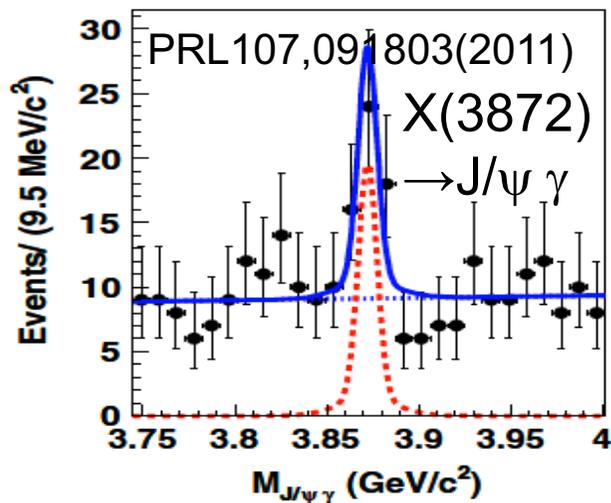
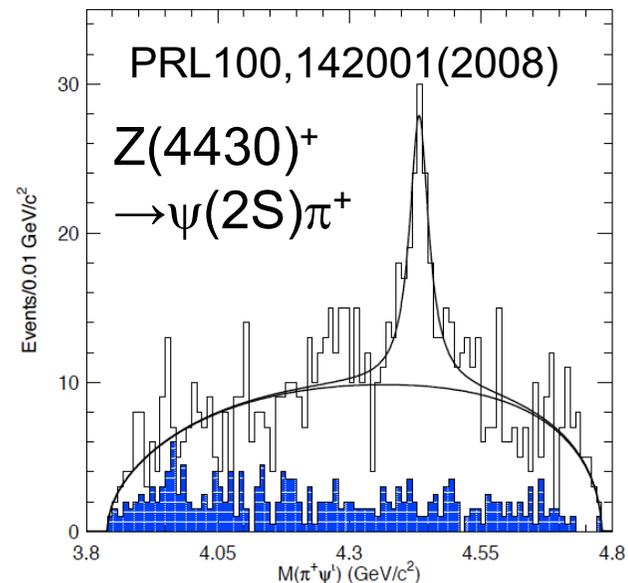
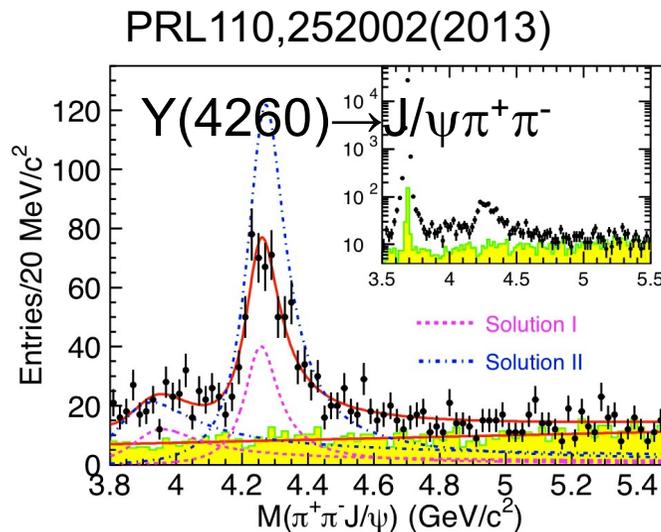
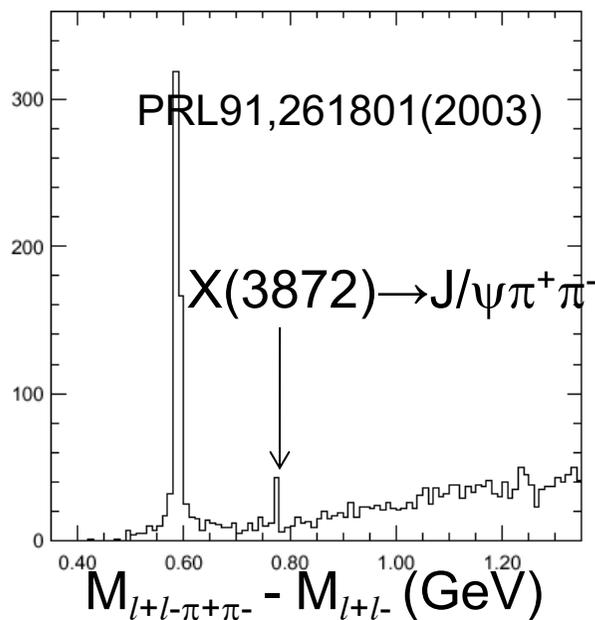
- これらが保存しない事象 = 新原理・新粒子の証拠

# バリオン数やレプトンフレーバーを保存しない過程があって当たり前では？

- 現在の宇宙に反物質が残っていない
    - サハロフの3条件: バリオン数を保存しない相互作用、CとCPの破れ、非平衡条件
  - スファロン過程:  $(B+L)$ は保存されず、 $(B-L)$ が保存
    - B: バリオン数、L: レプトン数
  - 大統一理論
    - ゲージ相互作用の統一
    - クォークとレプトンの統一
- バリオン数非保存→陽子崩壊を予想。



# 寄り道：“XYZ” sensations at Belle



# エキゾチックハドロン研究の教訓

- QCDの枠組の中にはメソン( $q\bar{q}$ の二体)、バリオン( $qqq$ 三体)以外の構造を持つエキゾチックハドロン: テトラクォーク、ペンタクォーク、メソン-メソン分子、メソン-バリオン分子などの形成を禁止するルールなし。
- にもかかわらず、実験的に証拠が見つからないため、メソン、バリオン以外の状態の生成があり得ることは忘れ去られていた。
- Belle/BaBarの高統計データにより、エキゾチックハドロンの生成が起きるときには起きていることが確認された。
- 明確な禁止則がないのに未発見のものは、頻度が低いものが見えずにいるor見逃しているだけかも知れない、という観点は常に心の片隅にとどめておくべき。
- レプトンフレーバー保存、バリオン数保存に対しても、その基準はあてはまると思われる。

# $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索: MEG II 実験

## MEG II



Thin-wall SC solenoid  
(gradient B-filed: 1.3→0.5 T)

Liquid xenon photon detector  
( $\epsilon_\gamma \sim 65\%$ ,  $\sigma_E/E \sim 2\%$ )

Continuous  $\mu^+$  beam  
( $4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ )

Pixelated timing counter  
( $\sigma_t \approx 35 \text{ ps}$ )

Muon stopping target  
(180  $\mu\text{m}$ -thick scintillating film)

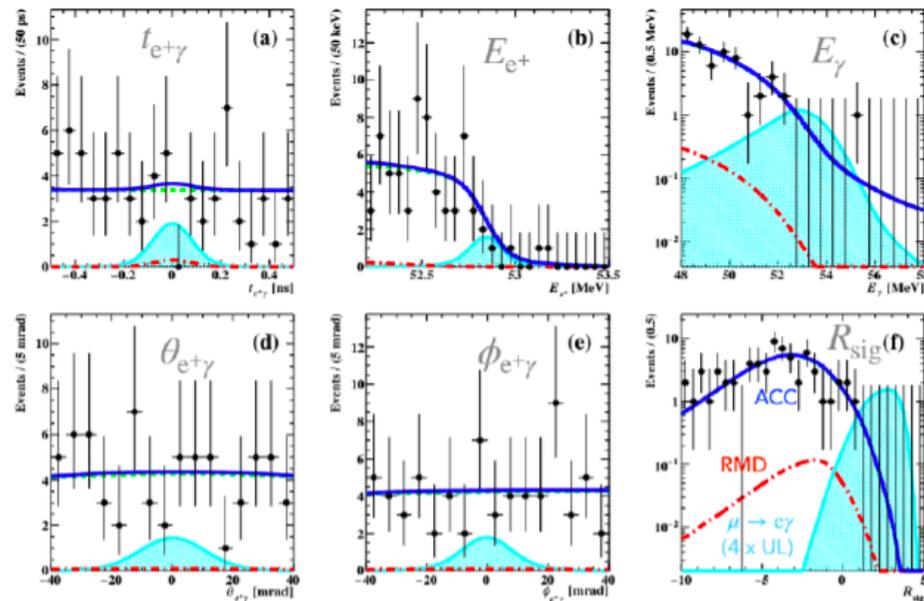
Radiative decay counter  
(identify high-energy BG  $\gamma$  events)

Cylindrical drift chamber  
( $\sim 1.6 \times 10^{-3} X_0$ ,  $\sigma_p \sim 90 \text{ keV}$ )

Design: [EPL-C 78 \(2018\) 380](#)  
Performance: [arXiv.2310.11902](#)

## Fit to 2021 data

Projections



Zero consistent

2023年11月16日 内山氏セミナースライドより抜粋

今のところ、信号の顕著な兆候はなし。  
近い将来に感度が約10倍向上した結果が期待されている。  
 $\mu$ 崩壊だと $e$ や $\gamma$ が出てくるモードに限られる。

# $\tau$ 崩壊だとモードのバリエーションあり

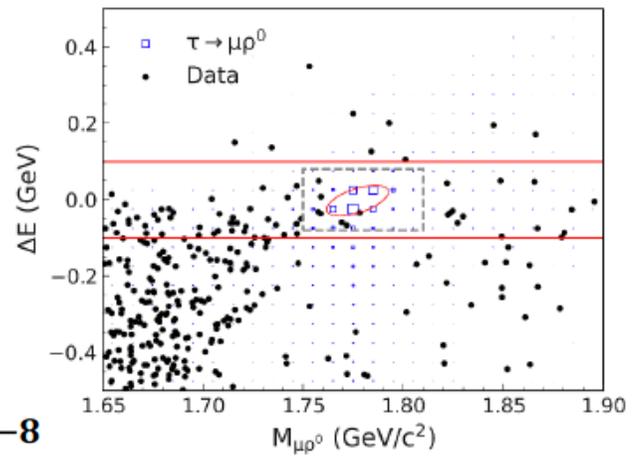
$m_\tau = 1.78 \text{ GeV} \rightarrow e$ および $\mu$ が生成するモードはもちろん  
ハドロンが生成するモードも可能。

- $\tau \rightarrow e\gamma, \mu\gamma$
- $\tau \rightarrow eP, \mu P$  ( $P: \pi, K, \eta, \eta'$ )
- $\tau \rightarrow eV^0, \mu V^0$  ( $V^0: \rho^0, \omega, \phi, K^{*0}$ )
- etc.

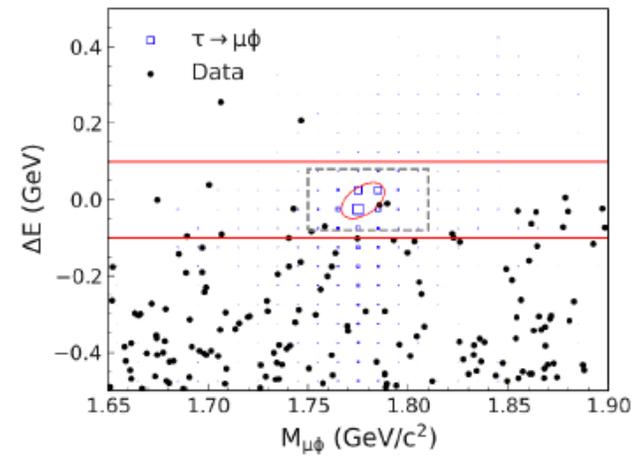
レプトクォークなど、クォーク (color charge) に結合する  
ものの寄与を探ることもできる。

# Recent results : Belle $\tau \rightarrow eV^0, \mu V^0$

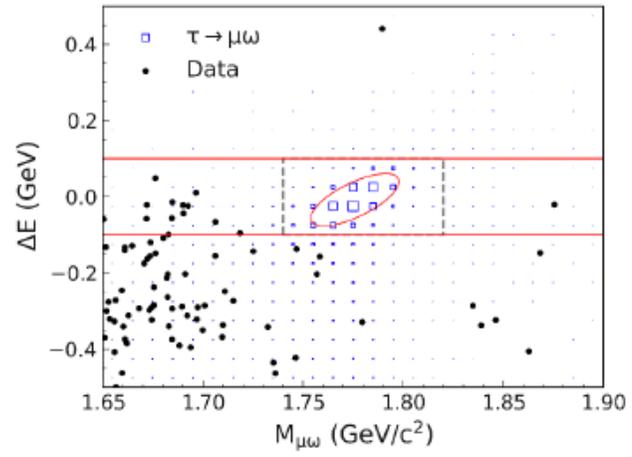
$\Delta E = E_{lV} - \sqrt{s}/2$   
in CMS



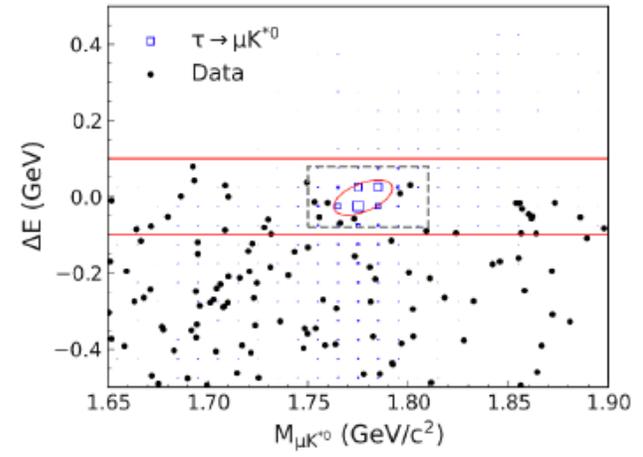
(a)  $\tau \rightarrow \mu\rho^0$



(b)  $\tau \rightarrow \mu\phi$



(c)  $\tau \rightarrow \mu\omega$

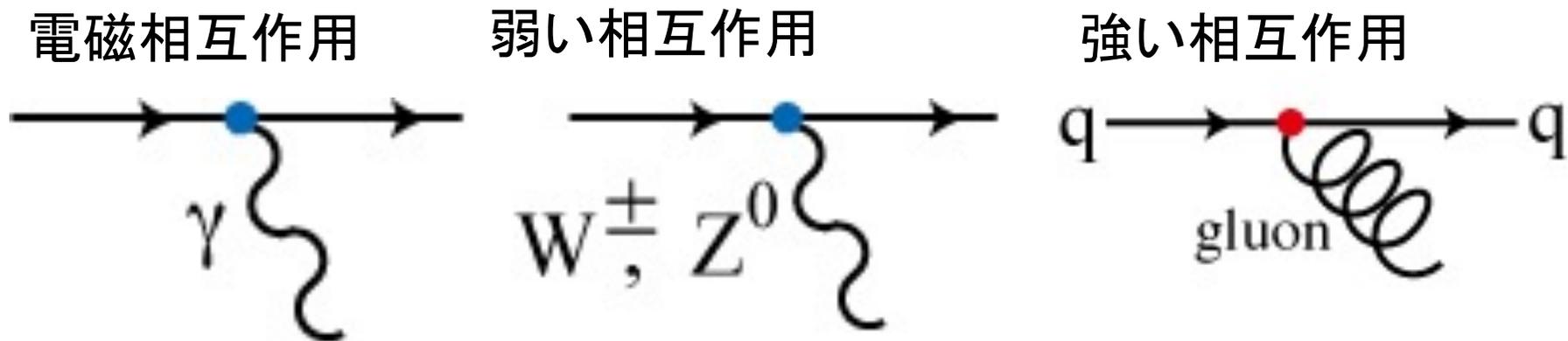


(d)  $\tau \rightarrow \mu K^{*0}$

$B(\tau \rightarrow eV^0) < (1.7 - 2.4) \times 10^{-8}$

$B(\tau \rightarrow \mu V^0) < (1.7 - 4.3) \times 10^{-8}$

# 標準模型：相互作用がユニバーサル



粒子の電荷が同じなら強さは同じ。

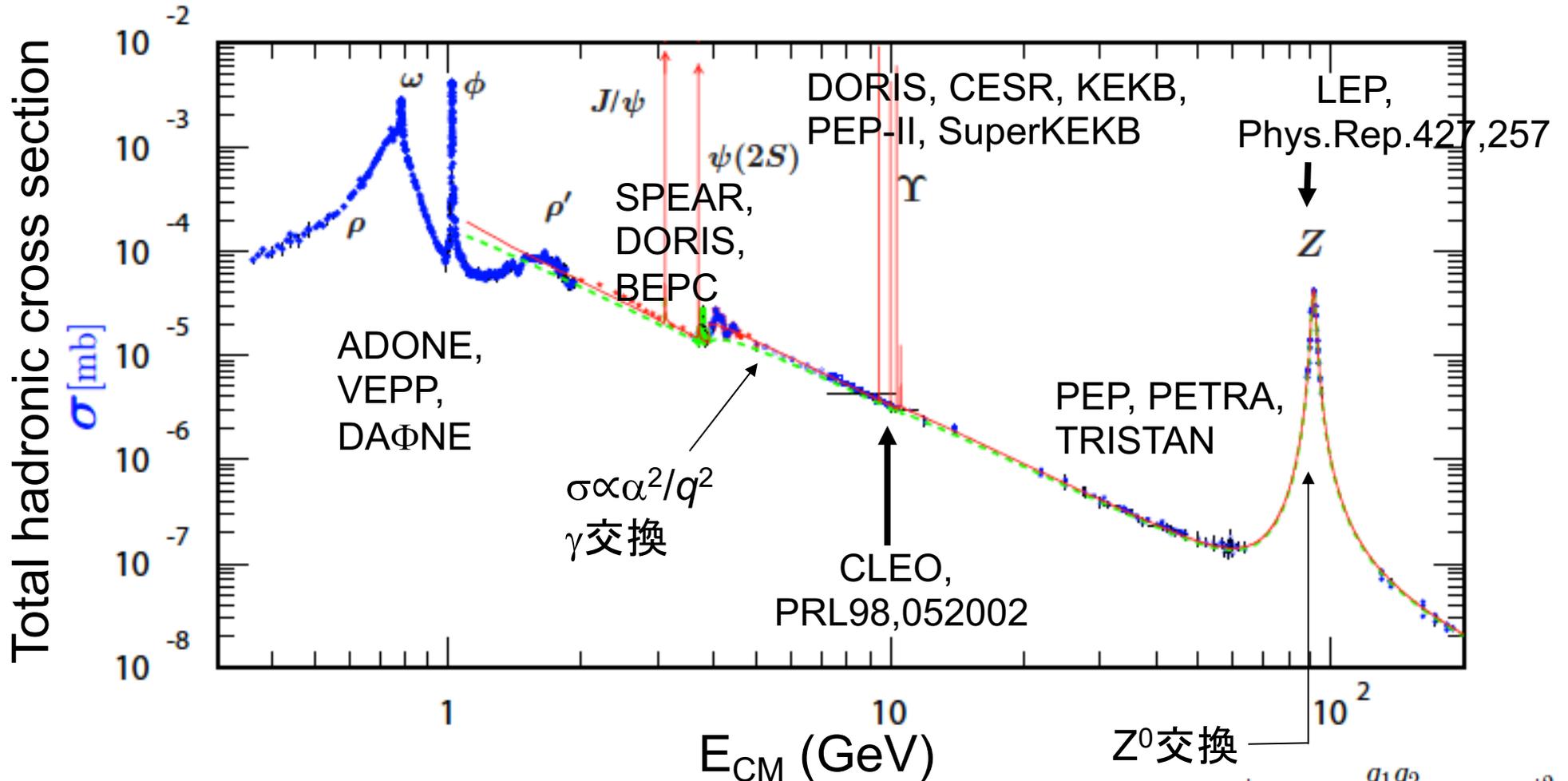
粒子のウイークアイソスピンが同じなら強さは同じ。

クォークの色電荷で働きかたが決まっている。

レプトンのフレーバー ( $e, \mu, \tau$ ) やクォークのフレーバー ( $u, d, s, c, b, t$ ) の違いは相互作用に違いを生まない (ユニバーサル)。

→ 反例が見つければ、新原理・新粒子の証拠。

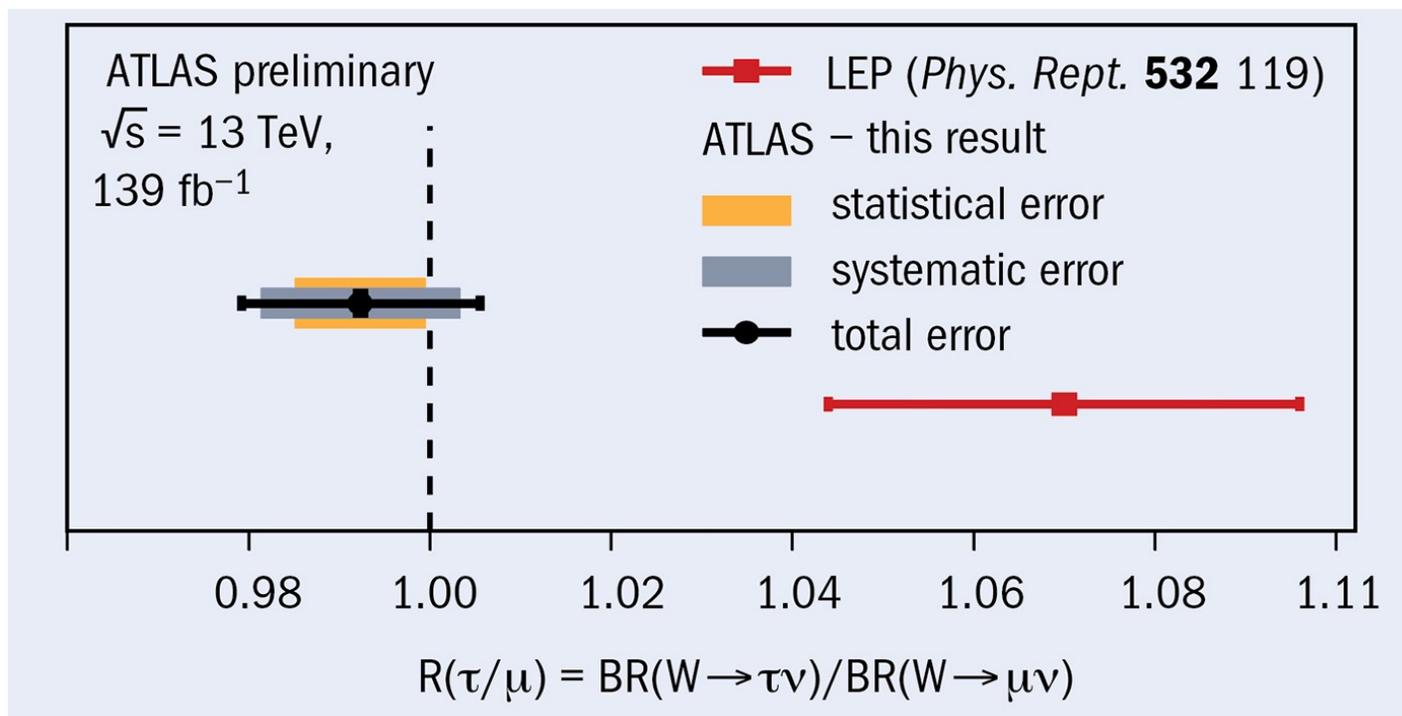
# e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>衝突: Neutral Current相互作用



Neutral currentのlepton universalityは低エネルギー、中間エネルギー( $\sim 10$  GeV)、 $M_Z$  (91 GeV)で測定あり。

$$\sigma \propto \left| \frac{g_1 g_2}{(q^2 - M_Z^2) - i M_Z \Gamma_Z} \right|^2$$

# Charged current相互作用



実Wボソンの崩壊で測定された $\tau$ ,  $\mu$ のuniversality。  
 $\tau \rightarrow e\nu\nu$ ,  $\mu\nu\nu$ 崩壊で $e, \mu$ のuniversalityは確認されている。  
中間のエネルギー ( $O(10 \text{ GeV})$ ) で $e, \mu, \tau$ の3 flavor出てくるのは  
Bメソン崩壊だけ。

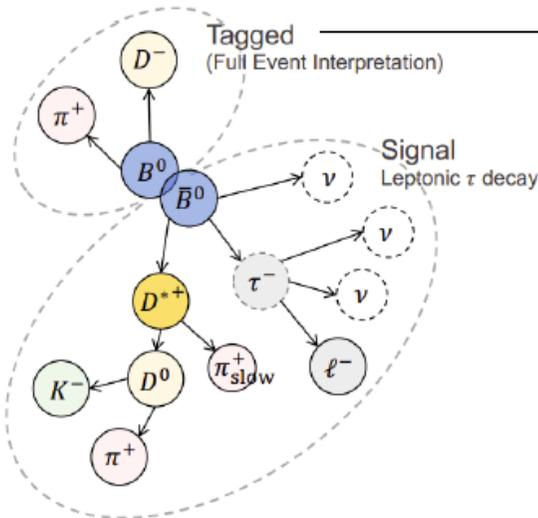
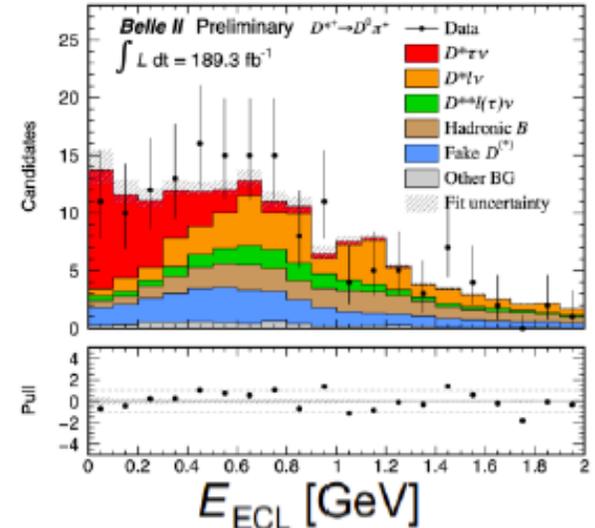
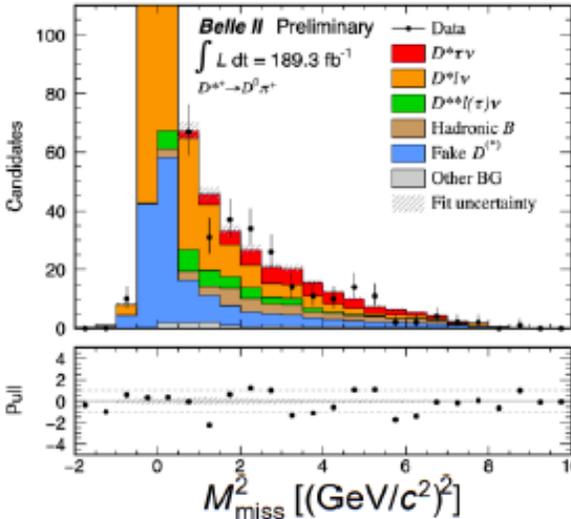
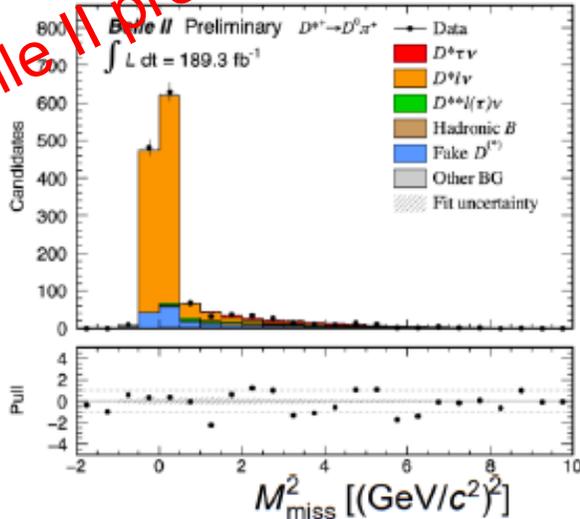
# Belle II recent R(D\*)

Belle II preliminary

zoomed

D\*τv enhanced

$$1.5 < M_{\text{miss}}^2 < 6.0 \text{ (GeV}/c^2)^2$$



片方のBメソンを完全再構成し、D\*とvisibleなτの娘粒子を除いたらそれ以外の粒子はいないはず = カロリメーターのextra energy  $E_{\text{ECL}}=0$  に分布する者が信号

-The first R(D\*) results from BelleII:

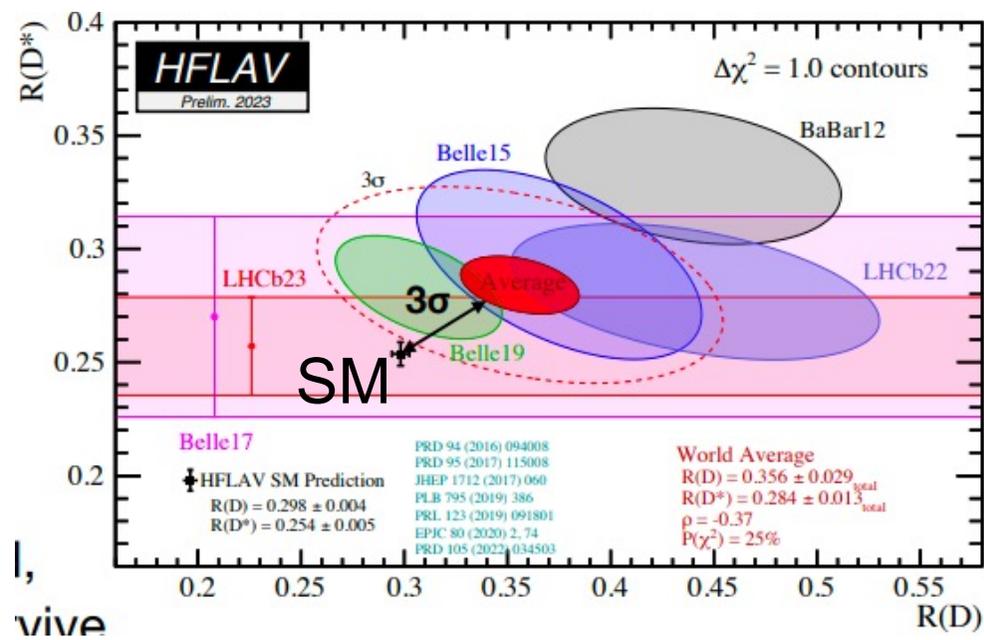
$$R(D^*) = 0.267^{+0.041}_{-0.039}(\text{stat.})^{+0.028}_{-0.033}(\text{syst.})$$

# セミレプトニック崩壊による レプトンユニバーサルティーのテスト

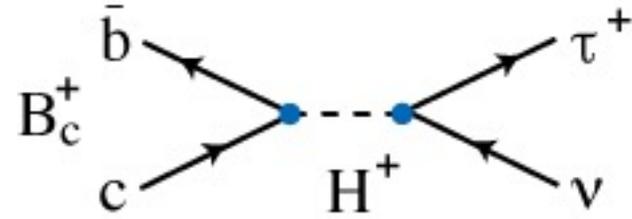
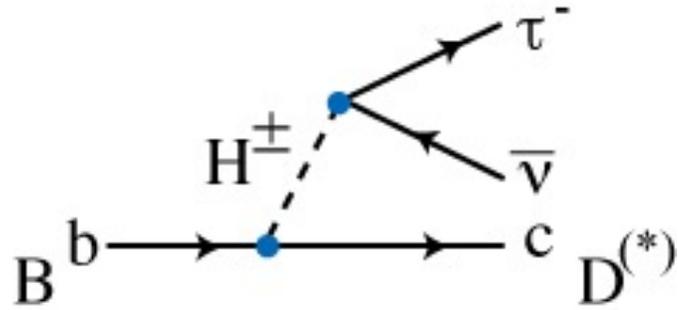
$$R(D^{(*)}) = \frac{\text{Br.} \left( B \rightarrow b \rightarrow c D^{(*)} \tau^{-} \bar{\nu} \right)}{\text{Br.} \left( B \rightarrow b \rightarrow c D^{(*)} l^{-} \bar{\nu} \right)}$$

SM 予言値の不定性は小さい。  
SM と  $3\sigma$  強の tension.

荷電カレントのレプトンユニバーサルティーは、 $\tau$ 崩壊 (low energy) と W崩壊 (high energy) ではテストされてるが、中間のエネルギー領域である  $O(10\text{GeV})$  で見るのは Bメソン崩壊だけ。

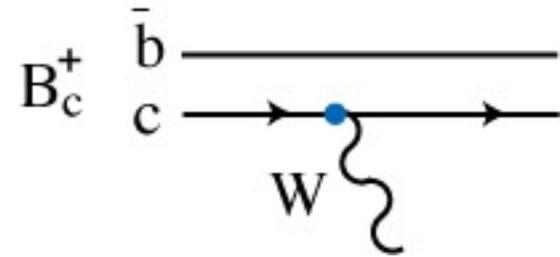


# 最近の検討では

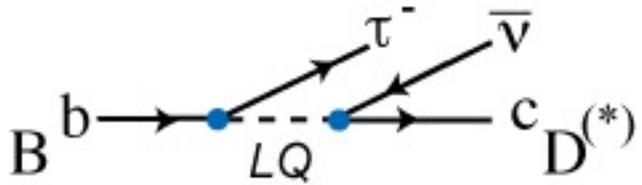


荷電ヒッグスのせいだと考えると

$B_c$ メソン崩壊にこれが効くはずだが、



これで $B_c$ メソンの寿命が決まっています。ダメっぽい。



レプトクォークだと他の実験結果からの制限に引っかからずにすむ。

# まとめ

- Lepton Flavorはその保存を保証する対称性が何であるか不明な量子数であるので、その非保存を探索するのは非常に有意義。
- $\mu$ 崩壊に比べて $\tau$ 崩壊はモードのバリエーションが豊富。
- Lepton Flavor Universalityは素粒子標準理論における基本原理である。レプトクォークなど、標準理論にない粒子の介在はこれを破り得る。
- 異なるエネルギースケールでの測定による検証が重要であるとの観点に立つと、Neutral Currentは $O(10\text{GeV})$ の中間エネルギーの測定が既に存在するが、Charged currentはBメソンのセミレプトニック崩壊のみが $e, \mu, \tau$ の3フレーバーレプトン全てを網羅する $5.28\text{GeV} = O(10\text{GeV})$ の中間エネルギー(実Wボソン崩壊よりも新物理に高感度)における測定の機会を与えている。

# Backup slides

# 「測定」の意味と確率統計

- 量子力学では「自然が確率的にふるまうのが本質」
  - 粒子の状態を複素数の波動関数  $\psi$  で表現。
  - $|\psi|^2$  が粒子を見出す確率密度。

基本法則(理論)は観測する量の期待値や確率密度を与える。



多数回の検出(試行)を繰り返して得た分布から、  
もとの確率密度を推定することが実験的測定である。



種々の測定結果の全てにわたって  
無矛盾な期待値を与える理論が正しい。

例外 = 発生頻度が低い過程を調べるには高統計データが必要。