

素粒子の味物理学

北原 鉄平 (千葉大学)

東京女子大学物理学セミナー

2025年10月15日

於 東京女子大学



	I	II	III		
質量 電荷 スピン	$\approx 1.9 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$	$\approx 1.32 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$	$\approx 172.7 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$	0 0 1	$\approx 125 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	H ヒッグス
	$\approx 4.4 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 87 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 4.24 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	0 0 1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$	$\approx 91 \text{ GeV}/c^2$ -1 1	
レプトン	e 電子	μ ミューオン	τ タウ	Z Zボソン	
	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$\approx 80 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	W Wボソン	

北原の自己紹介



2002年小柴

2012年ヒッグス粒子

2016年重力波

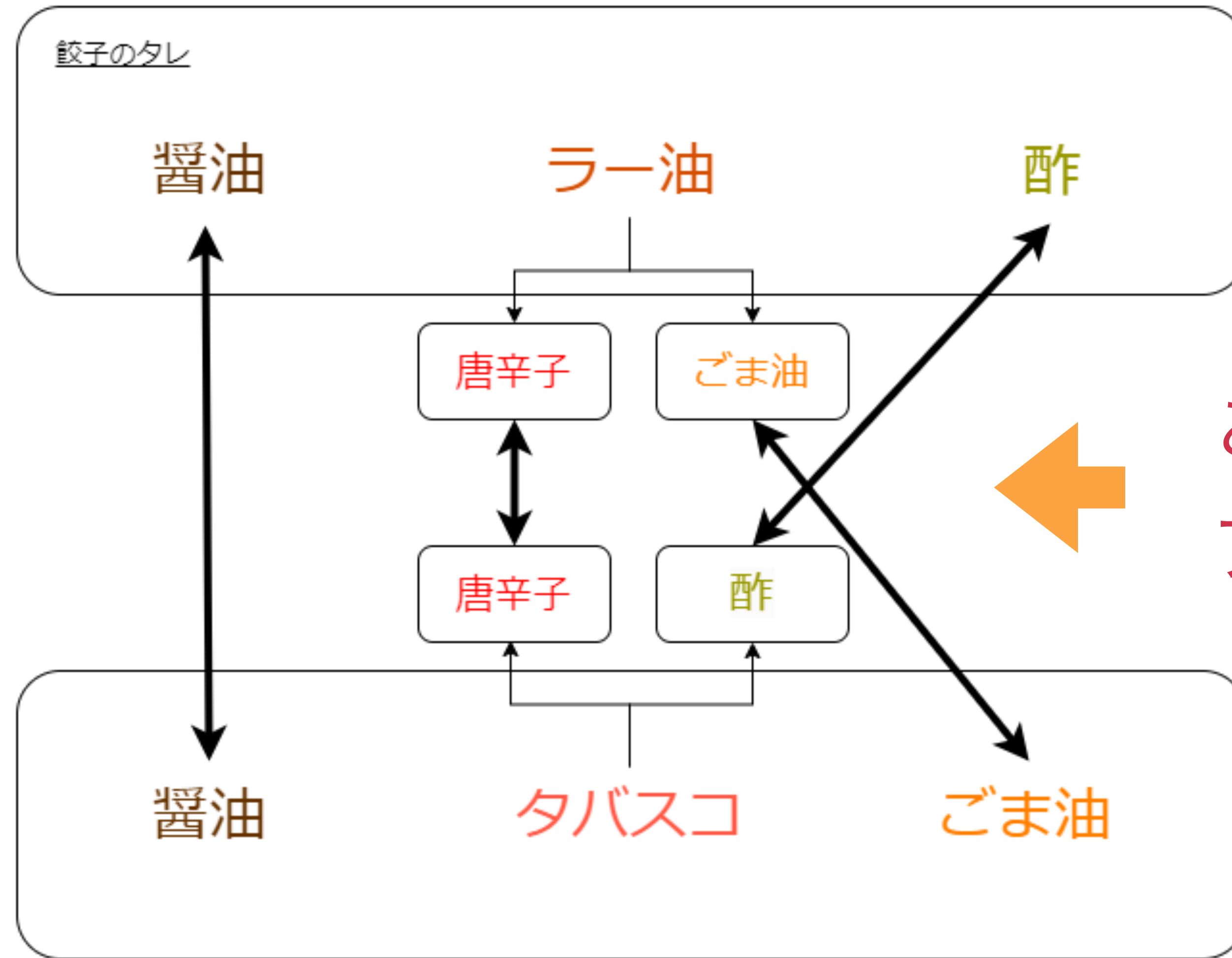


院
生
募
集
中
!

味...物理学？

わかりやすい味物理学の例

餃子のタレ
(本物)



この階層こそが
フレーバー

餃子のタレ風
原理的には
本物と等しい

有名な味物理学の例

■ プリン + 醤油 = ウニ風

■ 卵、ミルク + グルタミン酸

■ アボカド + わさび醤油 = まぐる風

■ 豆腐 + オリーブオイル + 塩 = モッツァレラ風

■ バナナ + マヨネーズ = カスタード風 (本当?)



味物理学有識者



ベストアンサー

このベストアンサーは投票で選ばれました



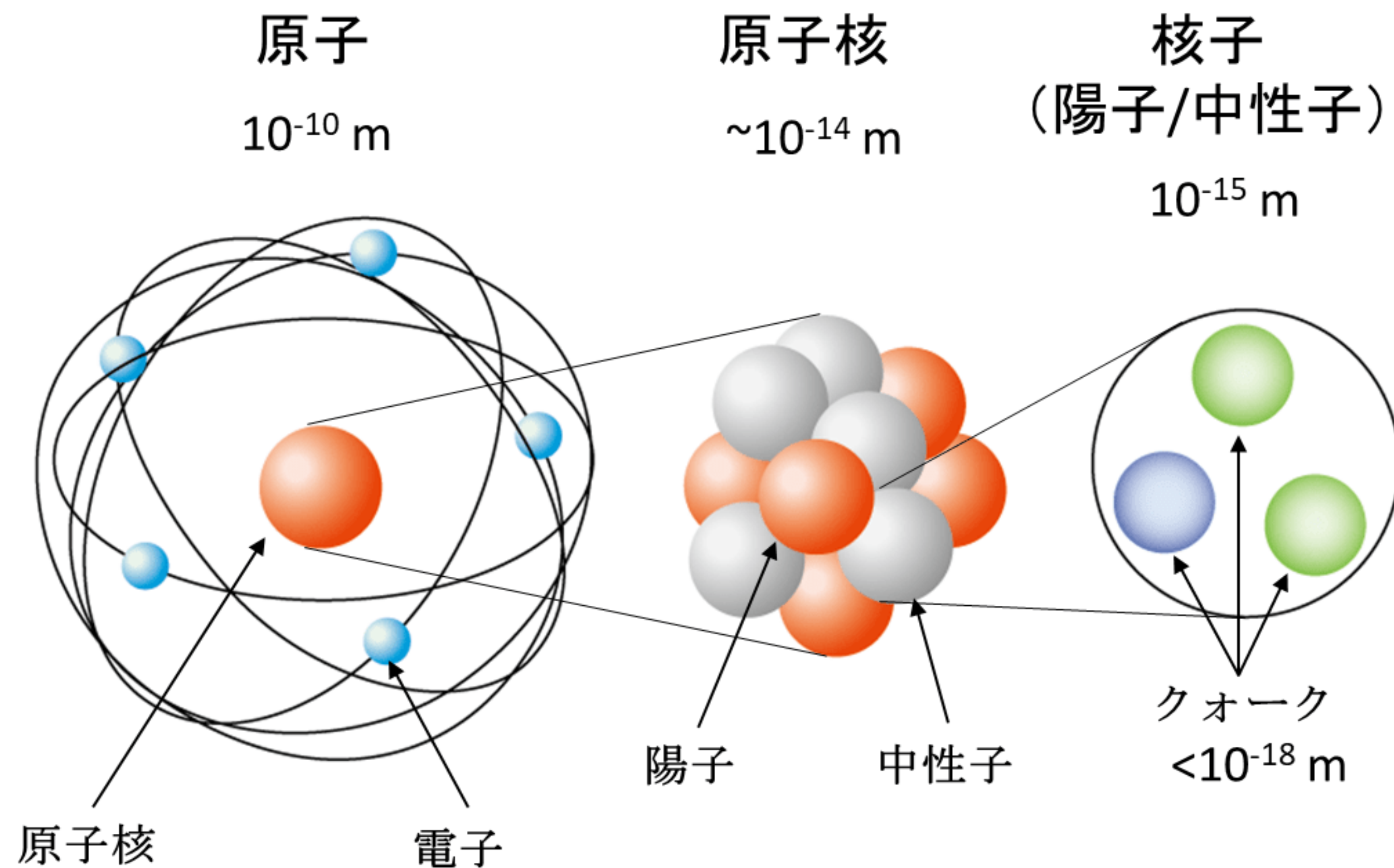
ID非表示さん

2010/11/3 18:15

- マンゴー+しょうゆ=大トロ
- アボガド+山葵醤油=トロ
- アイスクリーム+しょうゆ=みたらし団子
- 紅茶+レモン+生クリーム=甘酒
- 苺+マヨネーズ=大トロ
- 海老クリームコロッケ+ブラックコーヒー=カキフライ
- プチトマト+蜂蜜=苺
- ヨーグルト+イカ塩辛=キャビア
- 味噌汁+牛乳=キャビア
- 塩鮭+りんご=メロン
- カルピス+梅干=チーズケーキ
- 焼酎+きゅうり=メロン味
- ようかん+バター=スイートポテト
- ヤクルト+牛乳=カルピス
- プリン+ソース=トンカツ
- チョコレート+メロンパン=ヨーグルト
- カルピス+ウーロン茶=オレンジジュース

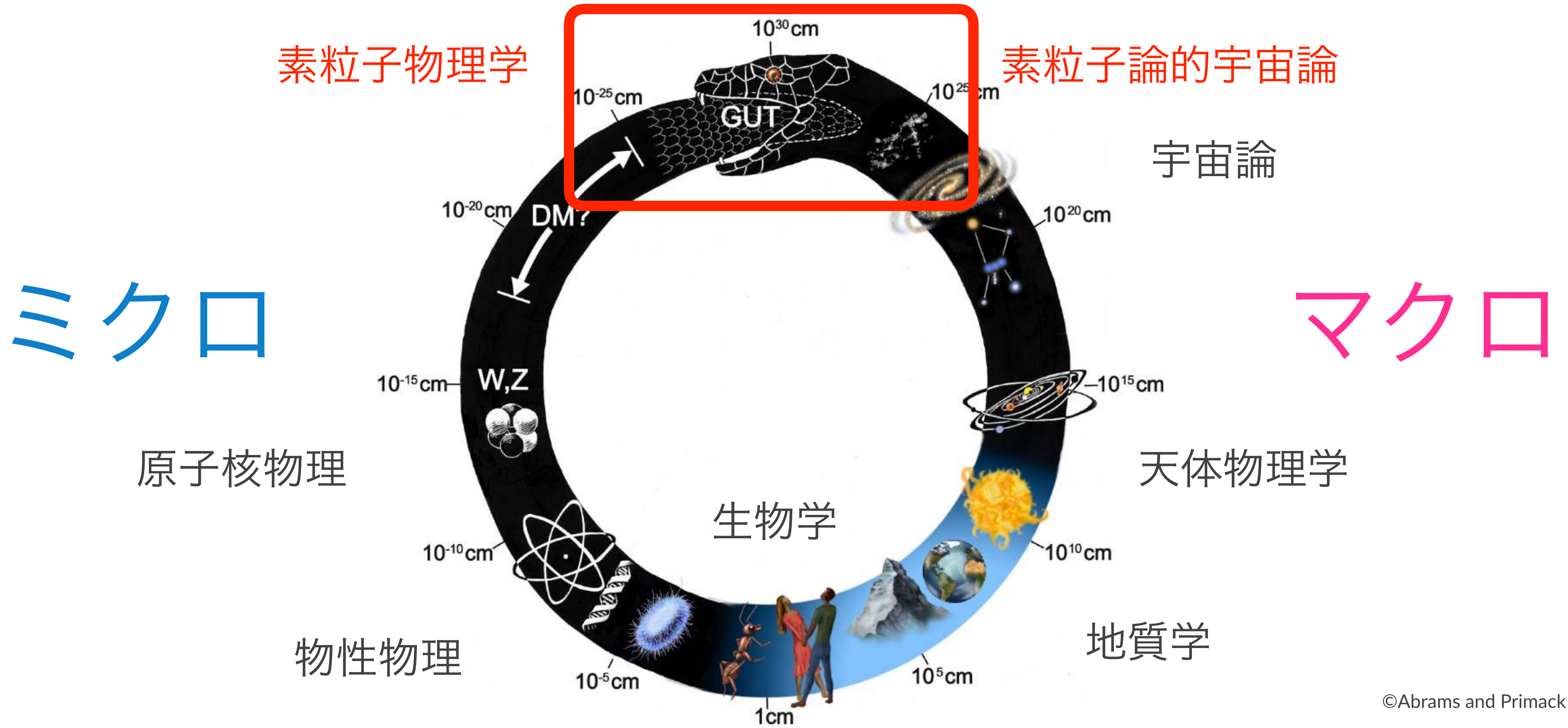
なるほど...?

素粒子とは？素粒子物理学とは？



最小単位 = 素粒子

Cosmic Ouroboros



©Abrams and Primack (2006)

突然ですがクイズです

これまでに発見された素粒子の種類は？

A. 8種類

B. 13種類

C. 17種類

突然ですがクイズです

これまでに発見された素粒子の種類は？

~~A. 8種類~~

~~B. 19種類~~

C. 17種類

これまでに発見された素粒子

	I	II	III		
質量 電荷 スピン	$\approx 1.9 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 1.32 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	$\approx 172.7 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2	0 0 1	$\approx 125 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	H ヒッグス
	$\approx 4.4 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 87 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.24 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2	$\approx 91 \text{ GeV}/c^2$ 0 1	
レプトン	e 電子	μ ミューオン	τ タウ	Z Zボソン	
	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$\approx 80 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1	
	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	W Wボソン	

物質を構成する
フェルミオン

「力」や「質量」
をつかさどる
ボソン

この17種類は
素粒子の「標準模型」
と呼ばれています。

この6つの素粒子を
クォークフレーバーと呼ぶ

こちらは
レプトンフレーバー

(フェルミオン)						(ボソン)	
	I	II	III				
質量	$\approx 1.9 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.32 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.7 \text{ GeV}/c^2$	0		$\approx 125 \text{ GeV}/c^2$	
電荷	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0		0	
スピン	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1		0	
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン		H ヒッグス	
	$\approx 4.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 87 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.24 \text{ GeV}/c^2$	0			
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0			
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1			
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	γ 光子			
レプトン	-1	-1	-1				
	$1/2$	$1/2$	$1/2$				
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ	Z Zボソン			
	$< 2 \text{ eV}/c^2$	$< 2 \text{ eV}/c^2$	$< 2 \text{ eV}/c^2$				
	0	0	0				
	$1/2$	$1/2$	$1/2$				
	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	W Wボソン			

ゲージボソン

スカラーボソン

(フェルミオン)

	I	II	III
クォーク	$\approx 1.9 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2 u アップ	$\approx 1.32 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 c チャーム	$\approx 172.7 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 t トップ
	$\approx 4.4 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 d ダウン	$\approx 87 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 s ストレンジ	$\approx 4.24 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 b ボトム
レプトン	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e 電子	$\approx 105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ ミューオン	$\approx 1.78 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ タウ
	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e 電子ニュートリノ	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ ミューニュートリノ	$< 2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ タウニュートリノ



素粒子の味物理学

フレーバー物理

本講演の目標：このイラストの理解



美味しそう！

©KMI

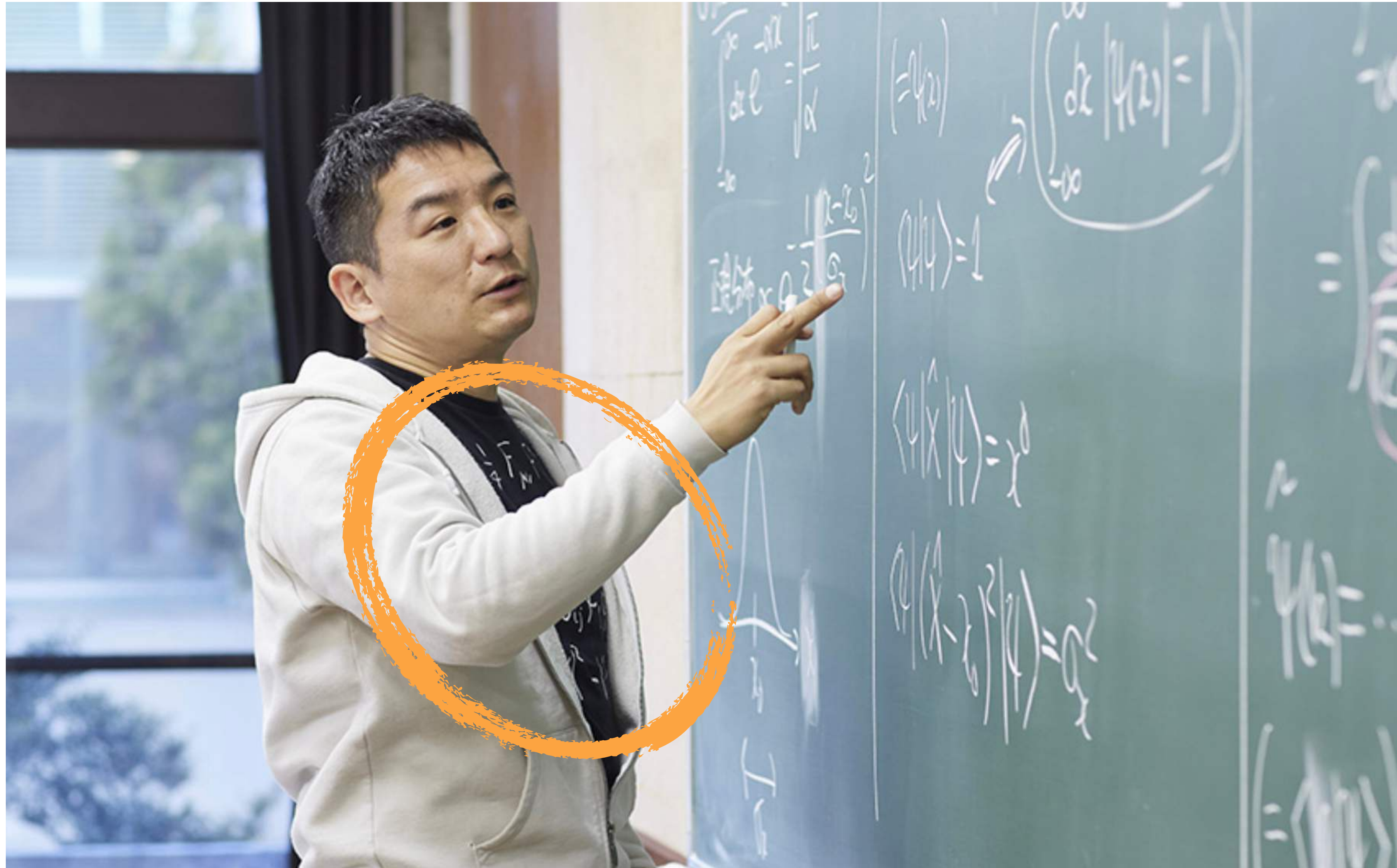
導入

突然ですが再びクイズです

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + i \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu D_\mu \psi_i - \sum_{ij} \bar{\psi}_i y_{ij} H \psi_j + \text{h.c.} \\ + (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) - \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4$$

この式は何を表す？

\mathcal{L}_{SM}



h.c.

突然ですが再びクイズです

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + i \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu D_\mu \psi_i - \sum_{ij} \bar{\psi}_i y_{ij} H \psi_j + \text{h.c.} \\ + (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) - \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4$$

素粒子標準模型のラグランジアン

物質と力の物理法則（運動方程式）を1行に圧縮した式

素粒子標準模型

- 各々の文字は素粒子（または微分、あるいはただの係数）を表す

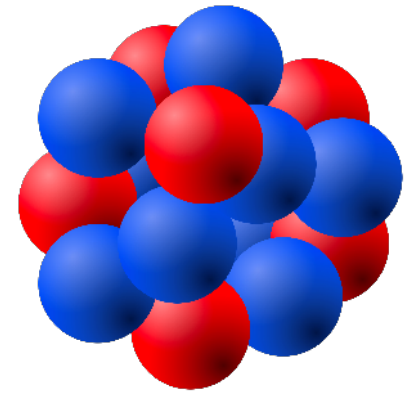
$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = \underbrace{-\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a}}_{\text{ゲージ場}} + i \underbrace{\sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu D_\mu \psi_i}_{\text{フェルミオン場}} - \underbrace{\sum_{ij} \bar{\psi}_i y_{ij} H \psi_j + \text{h.c.}}_{\text{フェルミオン質量とヒッグス結合定数が等しいという予言}} + (D_\mu H)^\dagger (D^\mu H) \underbrace{- \mu^2 |H|^2 - \lambda |H|^4}_{\text{ヒッグス機構}}$$

ここには $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$
リー群という数学が含まれている

四つの力と対称性

力を伝える粒子 = ゲージボソン

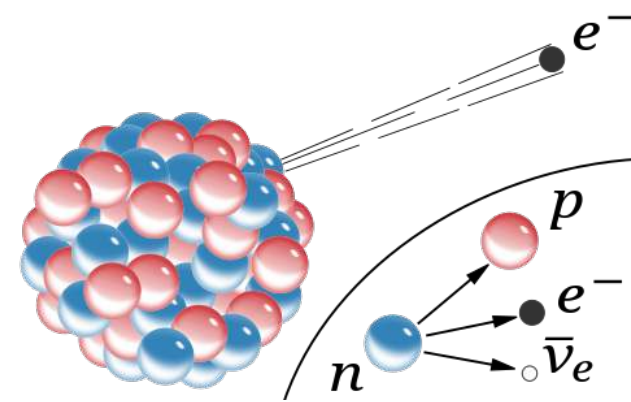
強い力



グルーオン g

陽子はプラスの電荷なのに、引力がある
この引力が「強い力」
クォークの閉じ込め現象も強い力

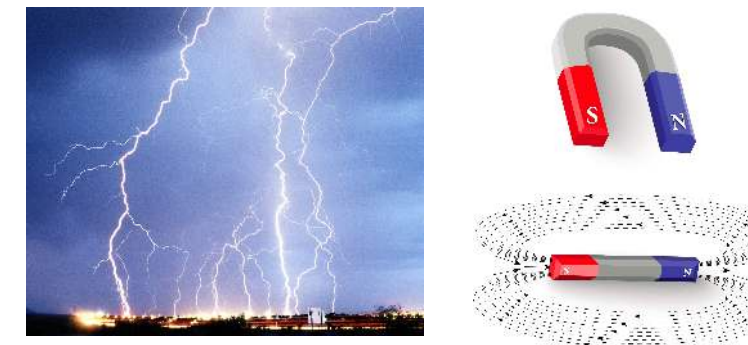
弱い力



W, Zボソン W Z

放射性崩壊や核反応をもたらす力
太陽エネルギーは弱い力

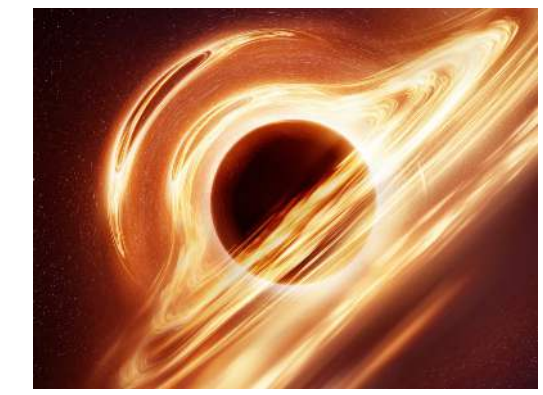
電磁気力



光子 γ

電力・磁力・電磁力、実は全て同じ力

重力







グラビトン: 未発見

質量の間に働く引力。量子論は
いまだにわかっていない

ゲージ対称性

- ◆ 三つの力を伝える**ゲージ場**は、理論に**ゲージ対称性**をもたらす
- ◆ **ゲージ対称性**は、場所ごとに**物理法則を変えないようなポテンシャルの変換**の帰結。ゲージ場はゲージ対称性を課すと、その存在が必然になる。
- ◆ **ゲージ対称性**は、**数学のリー群**（連続的な対称変換ではられた群）で記述される

	ゲージ場	ゲージ粒子の数	数学的記述
◆ 電磁相互作用	光子 	1	$U(1)_{em}$ ゲージ群
◆ 弱い力	W, Zボソン  	3	$SU(2)_L$ ゲージ群
◆ 強い力	グルーオン 	8	$SU(3)_C$ ゲージ群

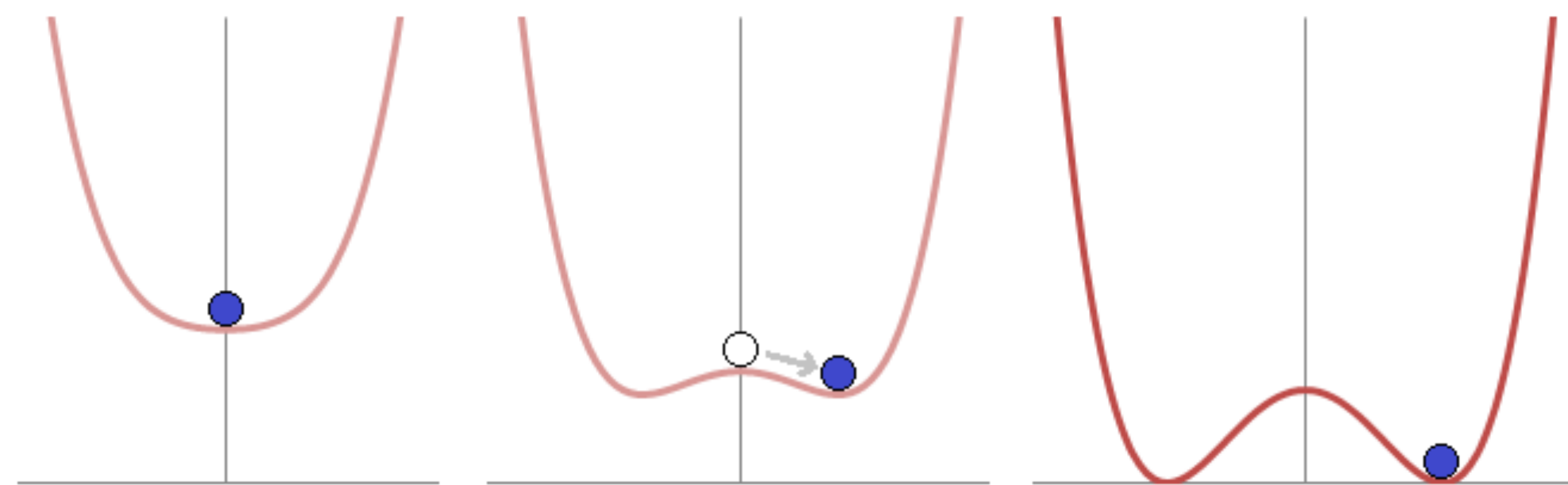
ヒッグス機構

- ◆ ヒッグス場が初期宇宙において**自発的に対称性を破った**ことが引き金となり、**フェルミオンとW, Zボソンは質量を獲得した** (Higgs mechanism)

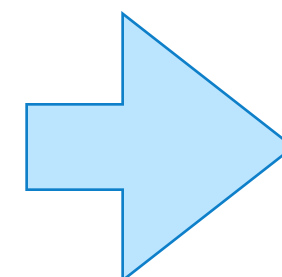
対称性がある

対称性が破れている

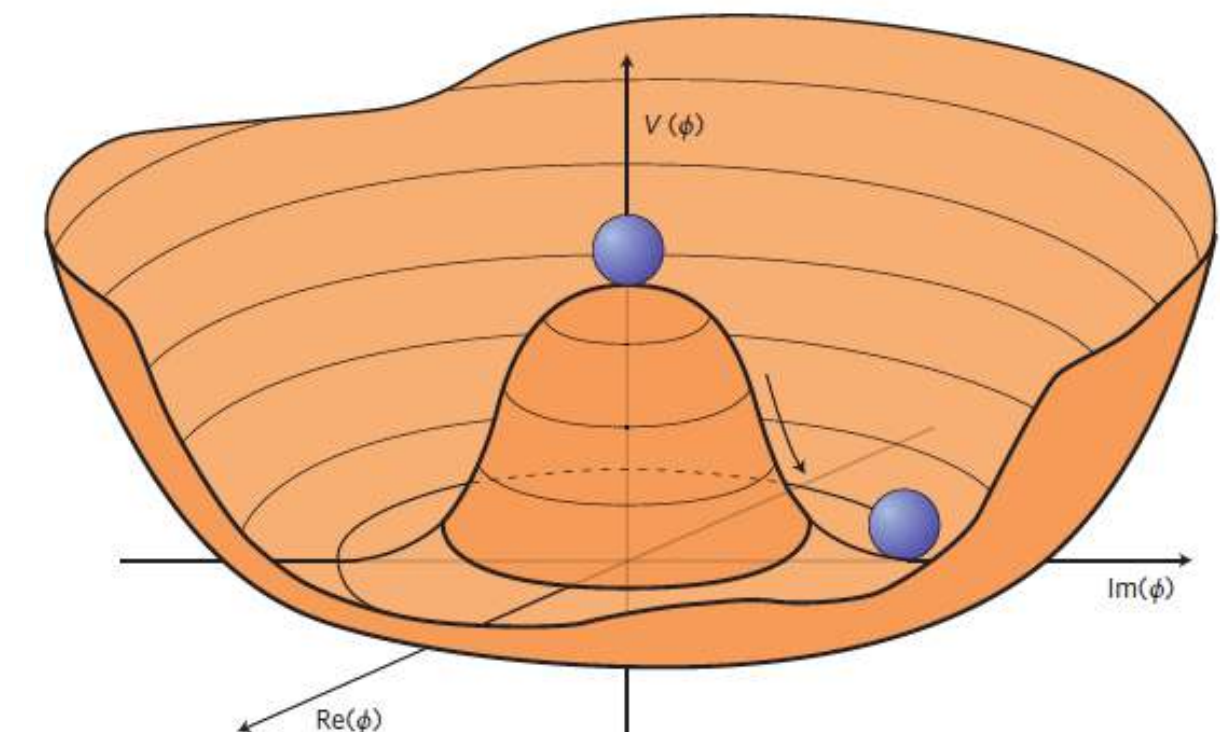
ヒッグス場の
ポテンシャル



初期宇宙



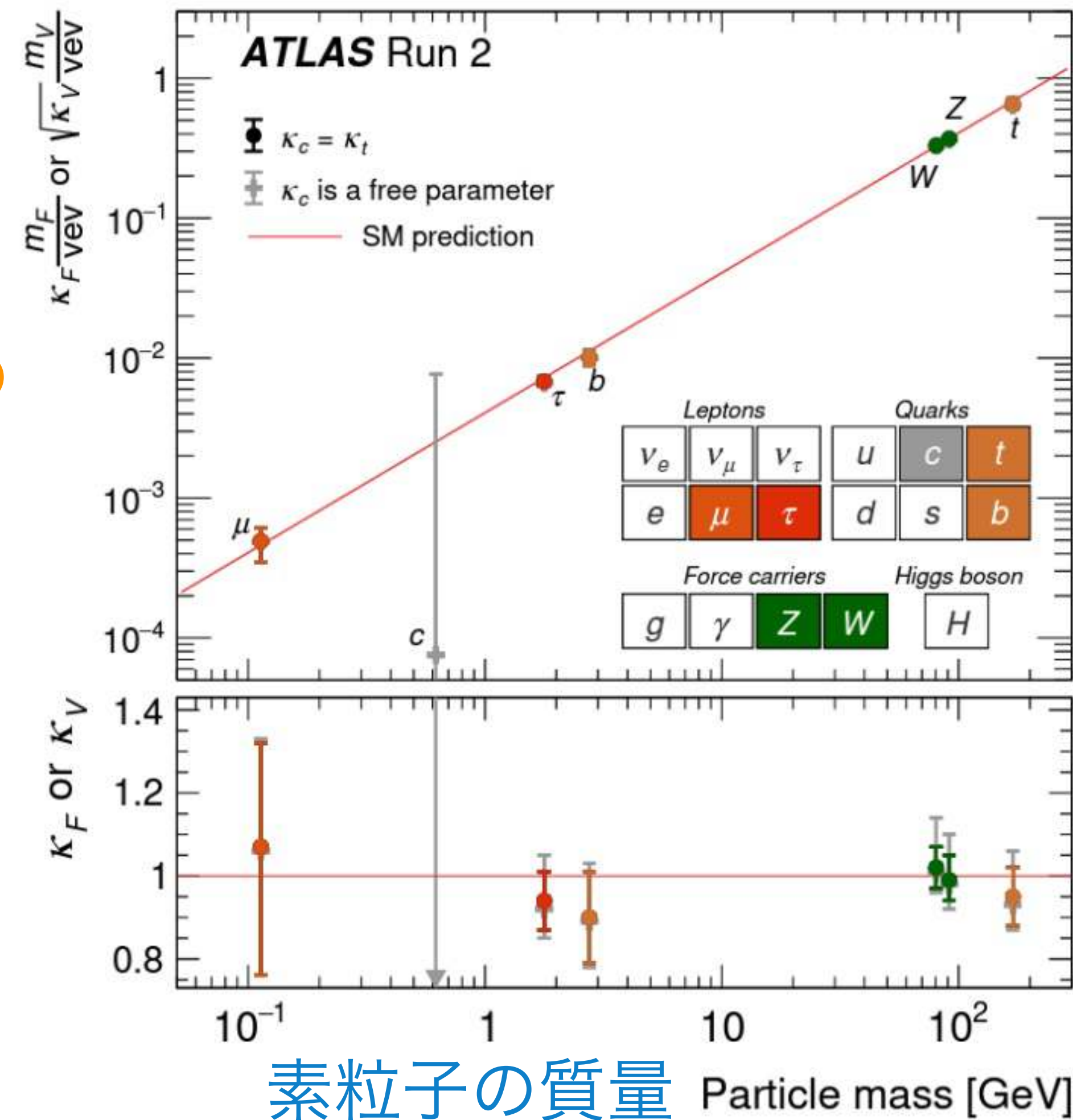
現在の宇宙



理論そのものは対称性を持っているが、エネルギーが一番低い真空状態ではそれが破れている

ヒッグス粒子との結合

素粒子とヒッグス粒子との結合の大きさ



標準模型の予言

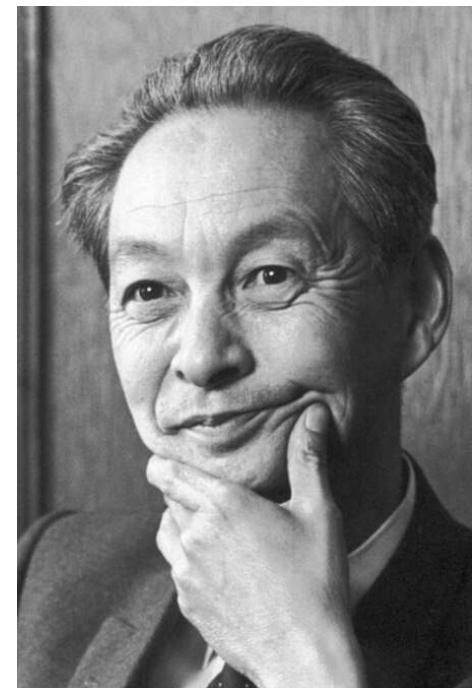
$$(\kappa_F = 1)$$

標準模型の予言通り！

[ATLAS Collaboration, Nature 607 (2022) 52]

標準模型のマイルストーン: 異常磁気モーメント

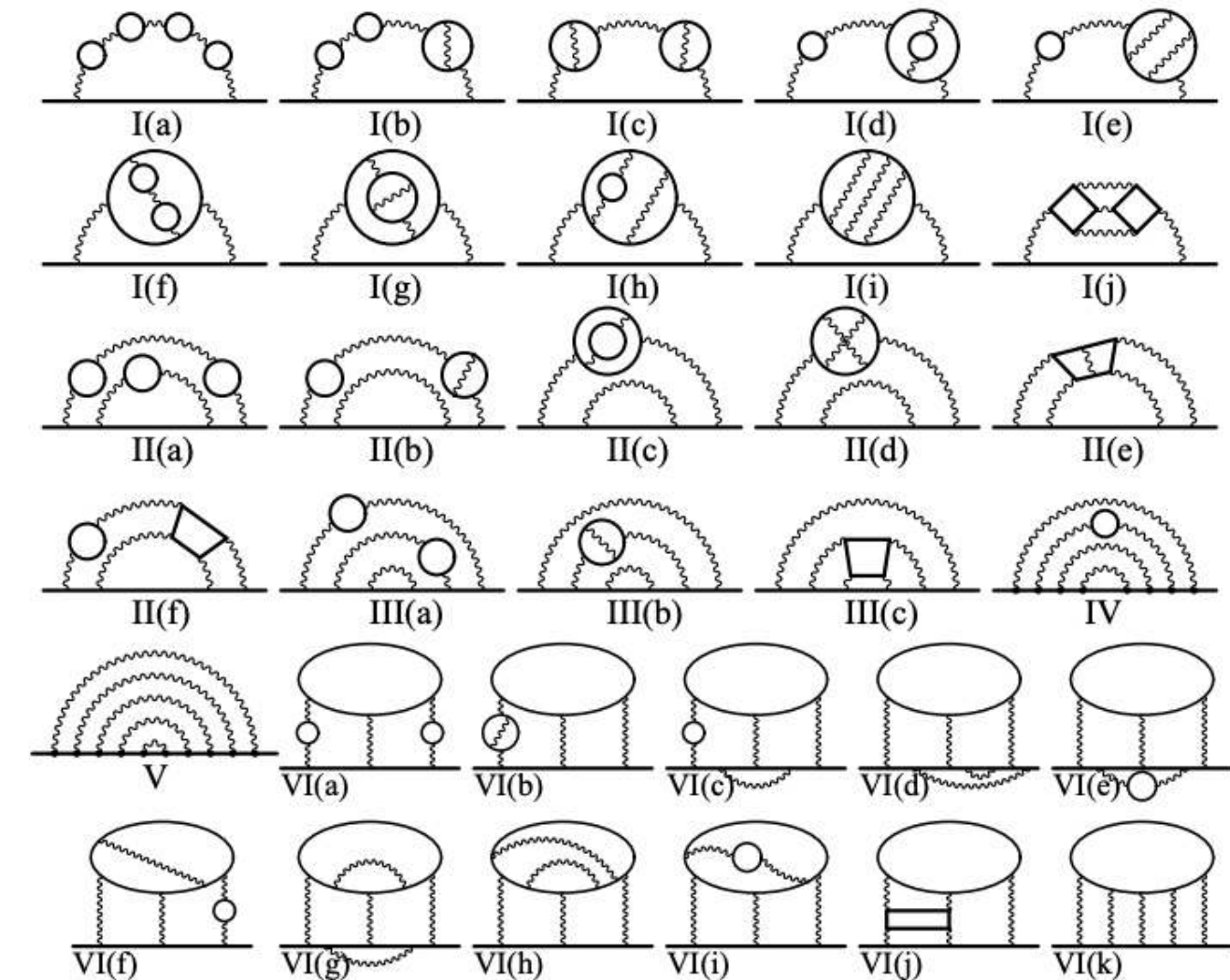
- ◆ 標準模型が最も信じられている一つの理由が**電子の「異常磁気モーメント」**という物理量の計算と測定と比較 (電子スピンと磁場の相互作用係数)



朝永さん (ノーベル賞)

標準模型: $a_e = 0.001\ 159\ 652\ 181\ 643(764)$

測定値: $a_e = 0.001\ 159\ 652\ 180\ 59(13)$



標準模型の計算結果と測定値に矛盾なし。有効数字9桁の一致！

木下さん

これを示したのは日本人 [Kinoshita, et al, 2012]

Q. 標準模型バンザイ？

A. いいえ

標準模型 における 問題点

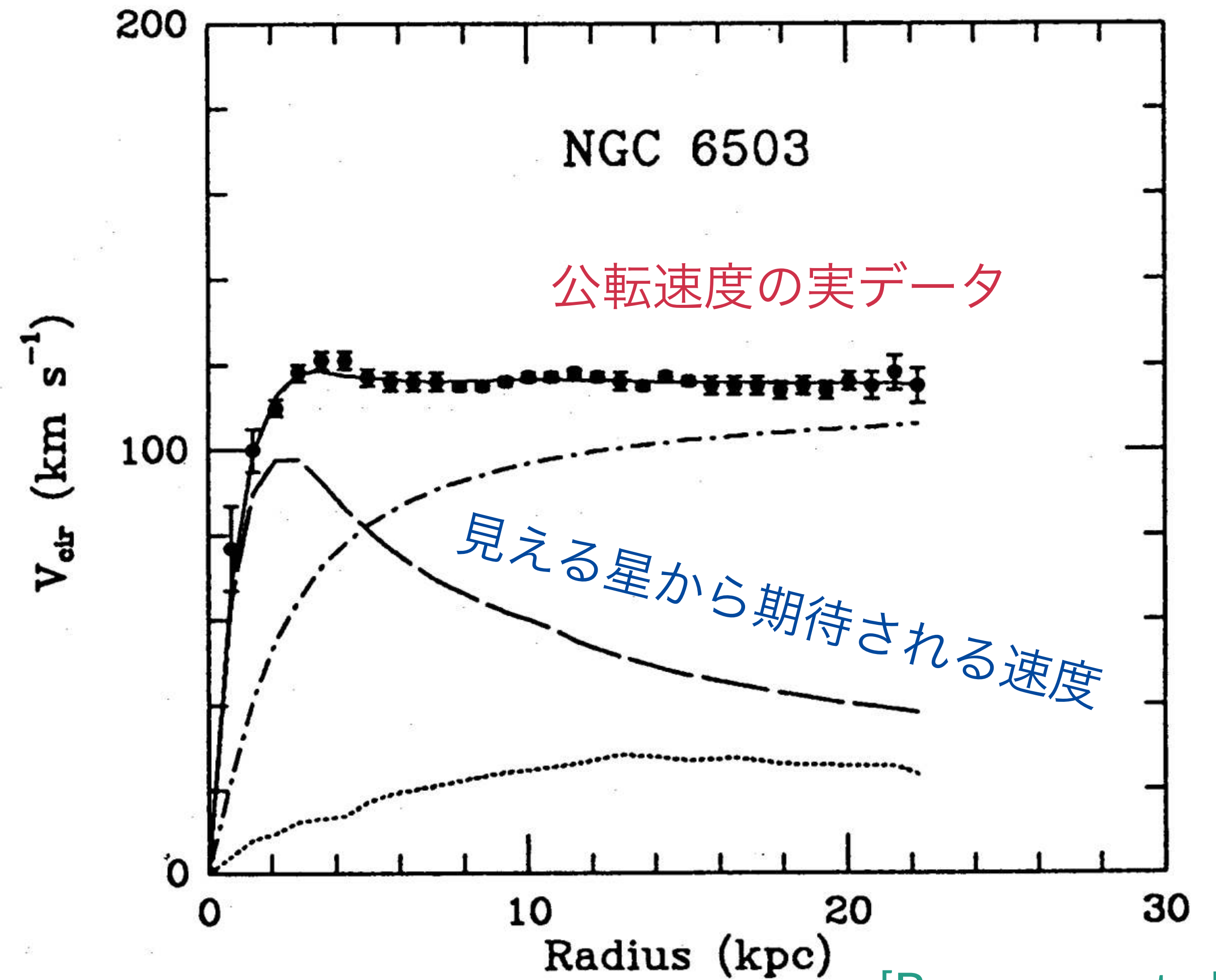
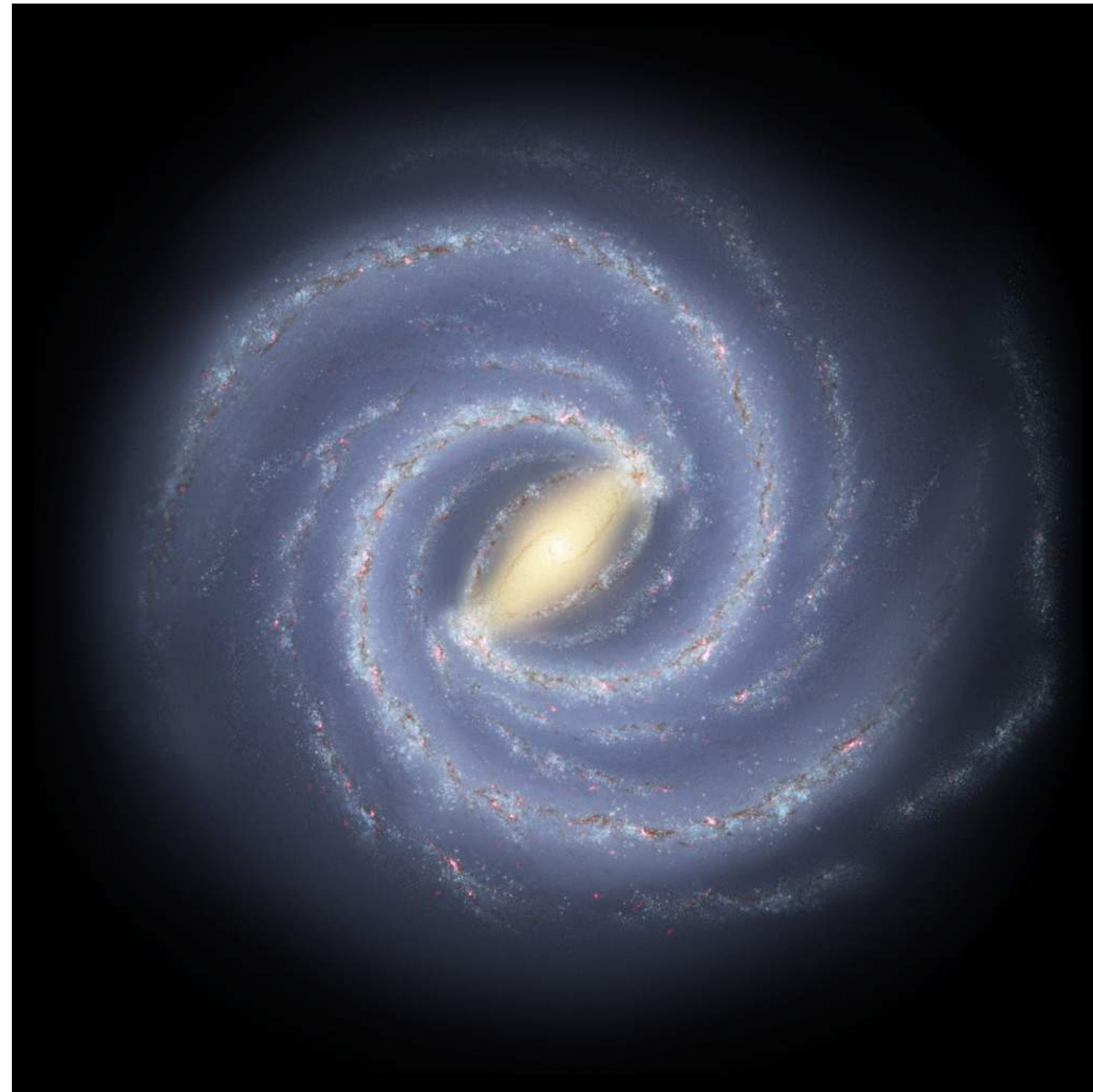
- ◆ 量子色力学（強い力）の数学的理解
- ◆ 暗黒物質・暗黒エネルギーの解明
- ◆ 大統一理論の謎、階層性問題の謎
- ◆ ニュートリノ質量機構
- ◆ フレーバー構造の謎
- ◆ インフレーション宇宙の解明
- ◆ 宇宙のバリオン数生成の謎
- ◆ 真空・時空構造の理解
- ◆ 量子重力・超弦理論の解明

一つでも解ければ
ノーベル賞



これらの謎は
「標準模型を
超える物理」
が確かに存在するこ
とを示唆している

暗黒物質の間接的な証拠



[Begeman, et al, 1991]

暗黒物質の間接的な証拠

- ◆ 銀河の中心から距離 r の位置の質点 m の運動方程式

$$F = \frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad \longleftrightarrow \quad v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

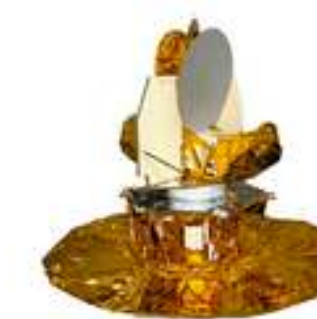
重力 向心力

仮に M が銀河中心に密集 $v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$
見える星から期待される速度

仮に M が r に比例 $v \propto \text{constant}$
ダークマター分布 (暗いため、見えない)

宇宙のバリオン数生成の謎

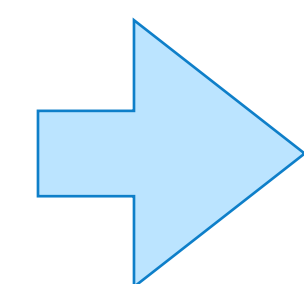
- ◆ 物質には対応する反物質がある（電子と陽電子 etc）
- ◆ 我々の身の回りには物質しかない
- ◆ 宇宙を観測しても反物質はあるにはあるが、基本は物質しかない
- ◆ 宇宙は無の真空からはじまった。真空から生まれる物質と反物質は同数



WMAP



PLANCK



謎: 宇宙の歴史の中で反物質はどこへ消えた？

標準模型は、定量的にも定性的にも「解なし」なことが
研究の結果わかっている

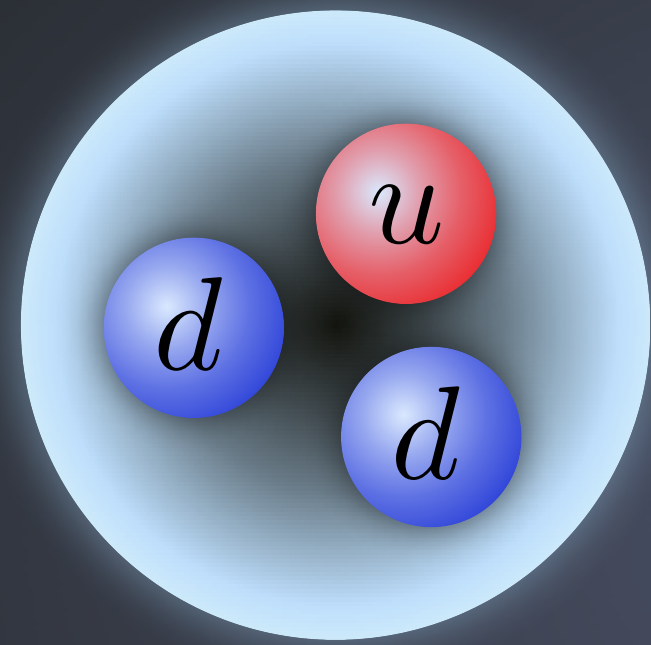
フレーバー物理

フレーバー物理

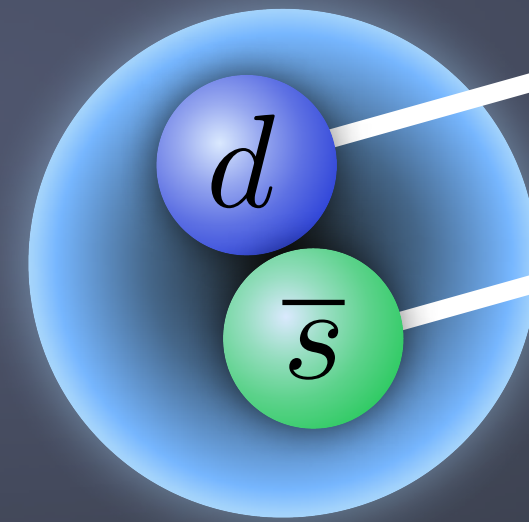
電子

e

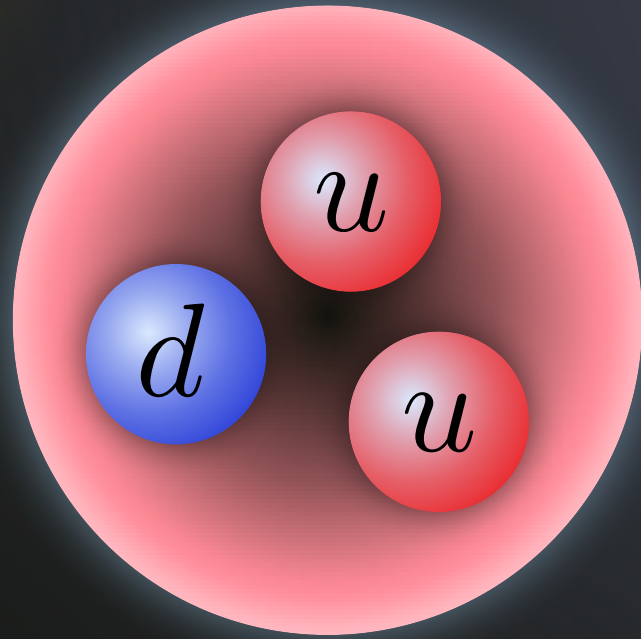
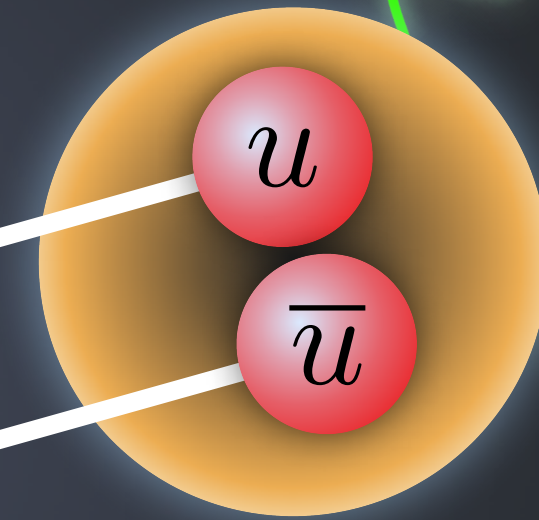
中性子



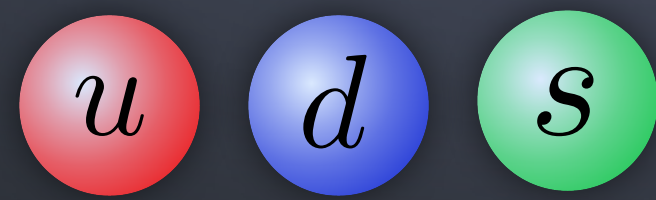
K_L^0



π^0



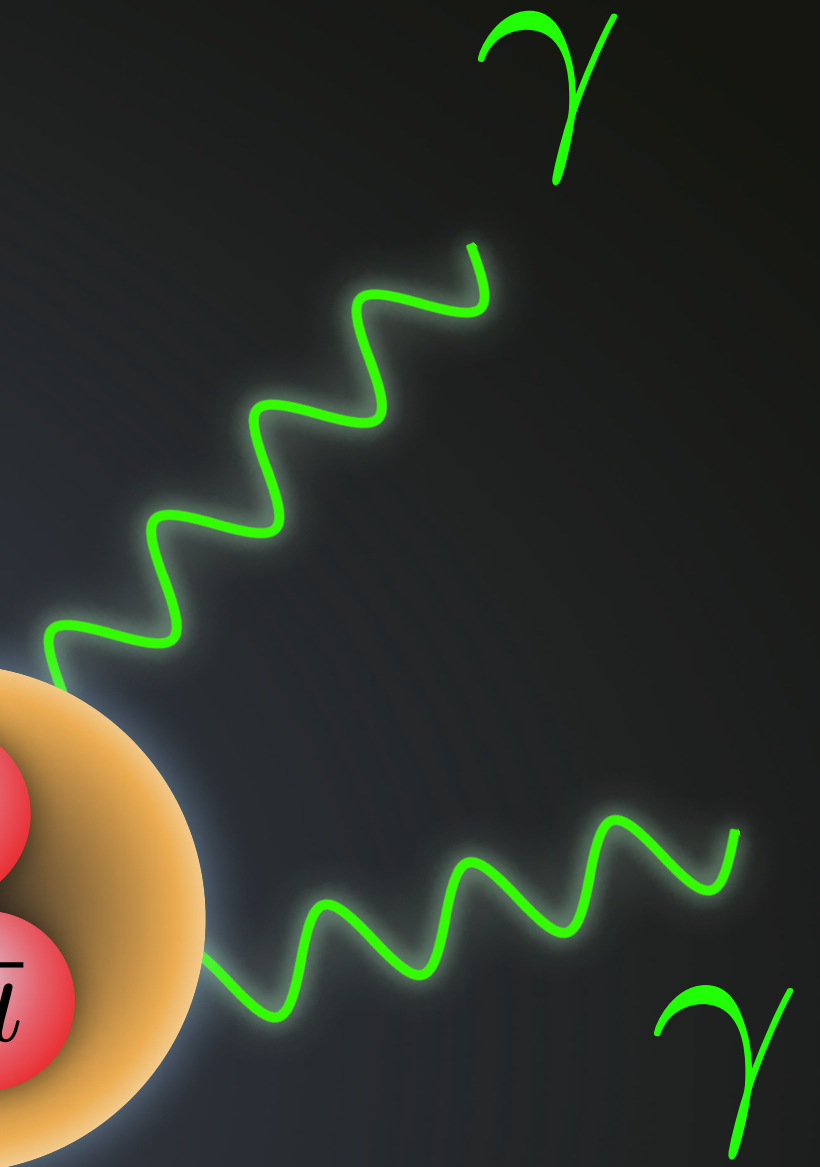
陽子



軽クォーク

X

new particle X



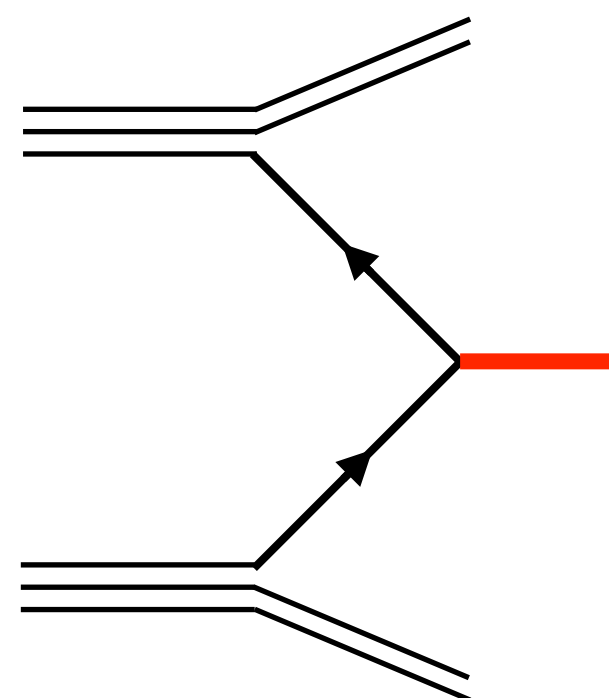
コライダー物理（左）とフレーバー物理（右）

標準模型
における
問題点

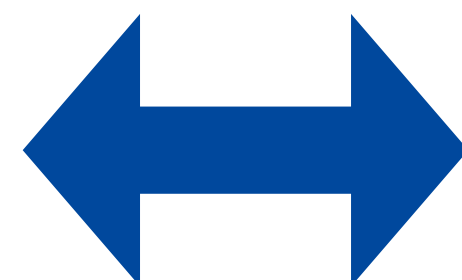


ハドロンコライダー
High-energy frontier

$$\sqrt{s} > m_{NP}$$



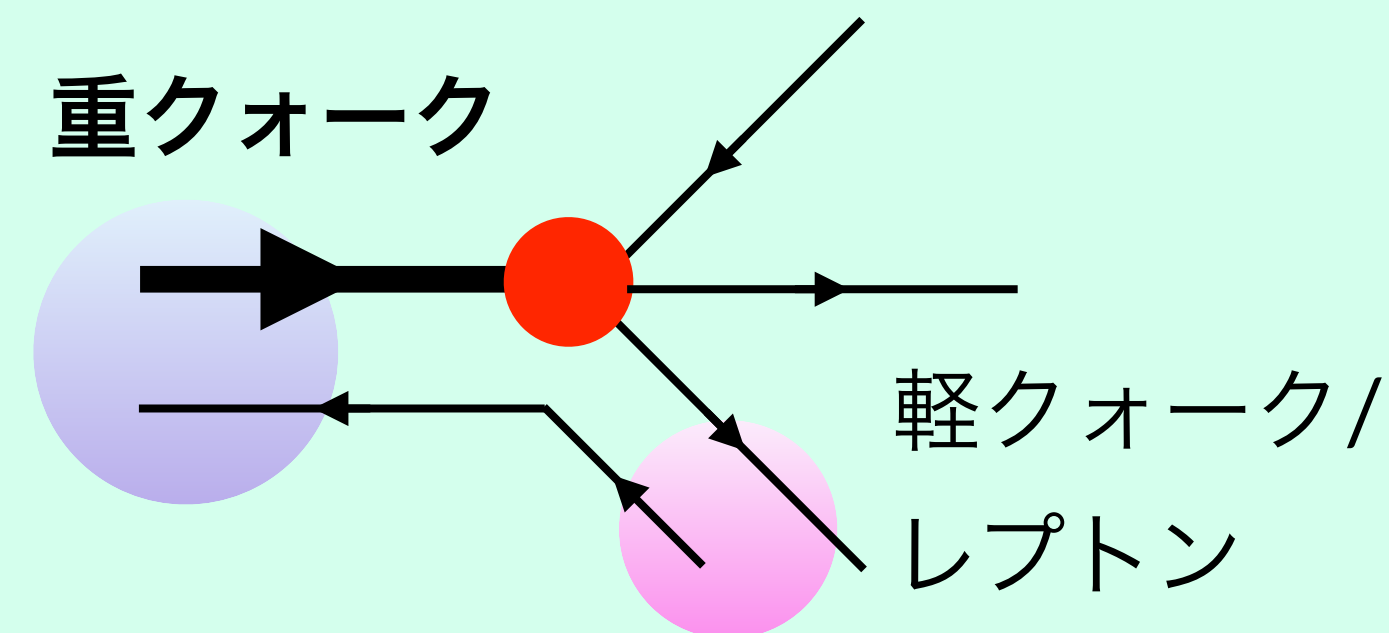
相補的



標準模型過程の精密測定
High-intensity frontier



理論予言精度：良
新物理の影響：大



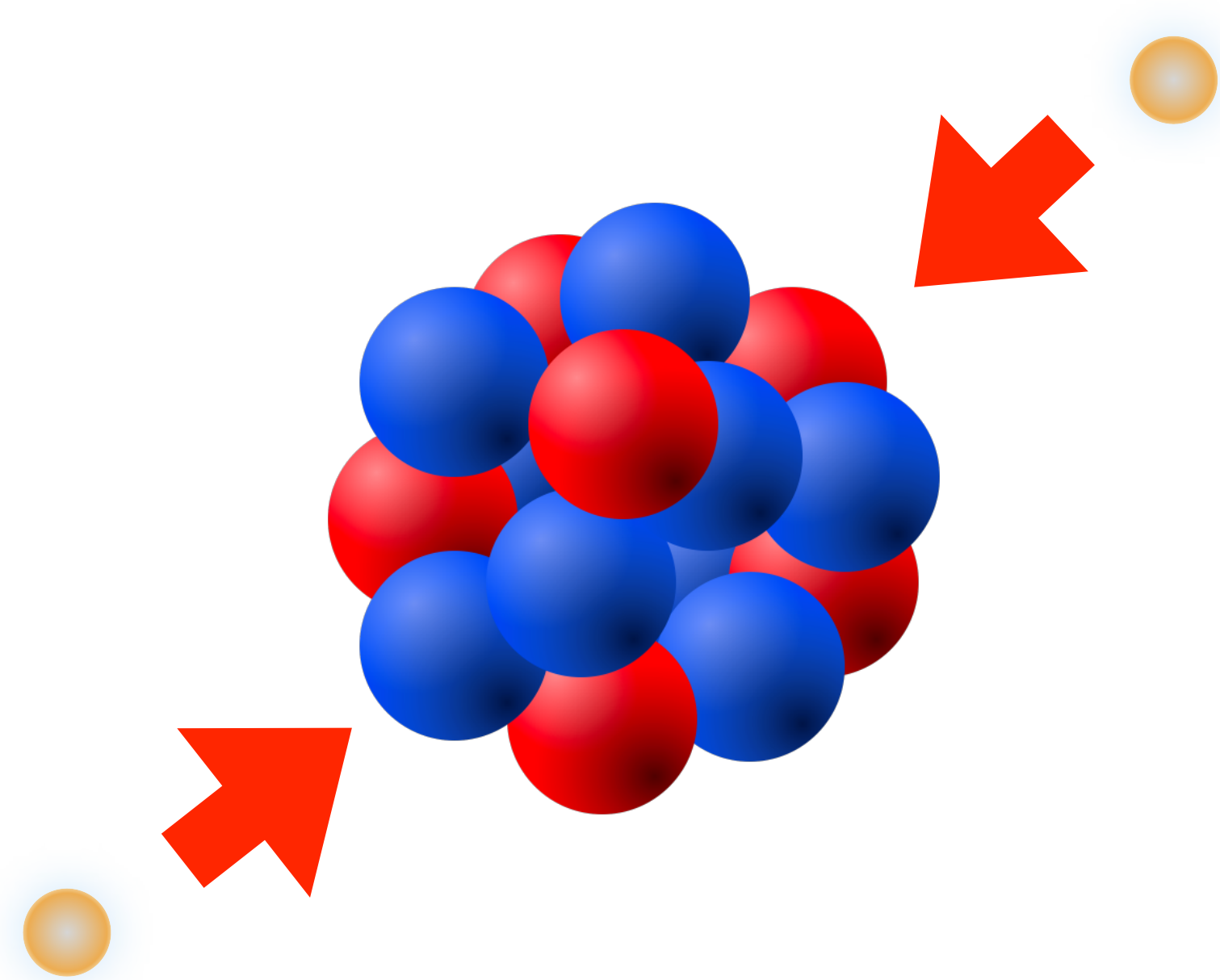
高エネルギー領域まで
新物理を間接的に探索

強い力

陽子と陽子は電荷が + 同士なので、反発するはず。

実際は、電子軌道の4桁下に、引力によって陽子を閉じ込めている

強い力

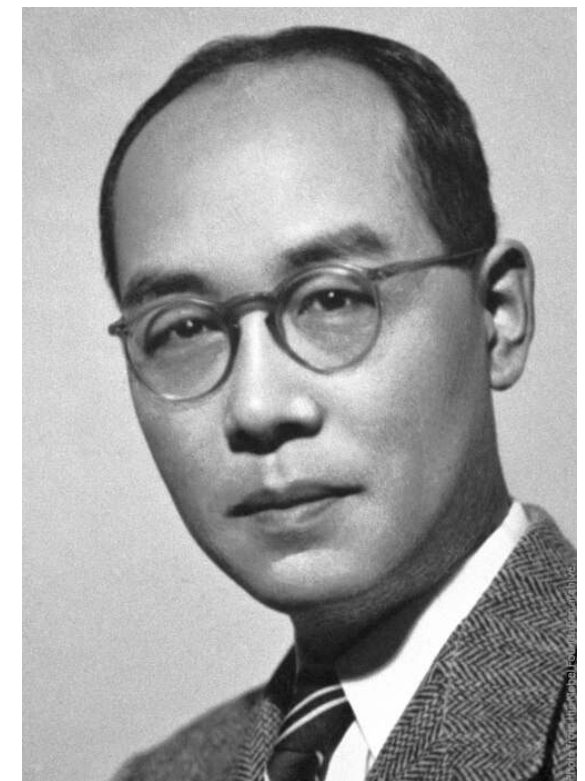
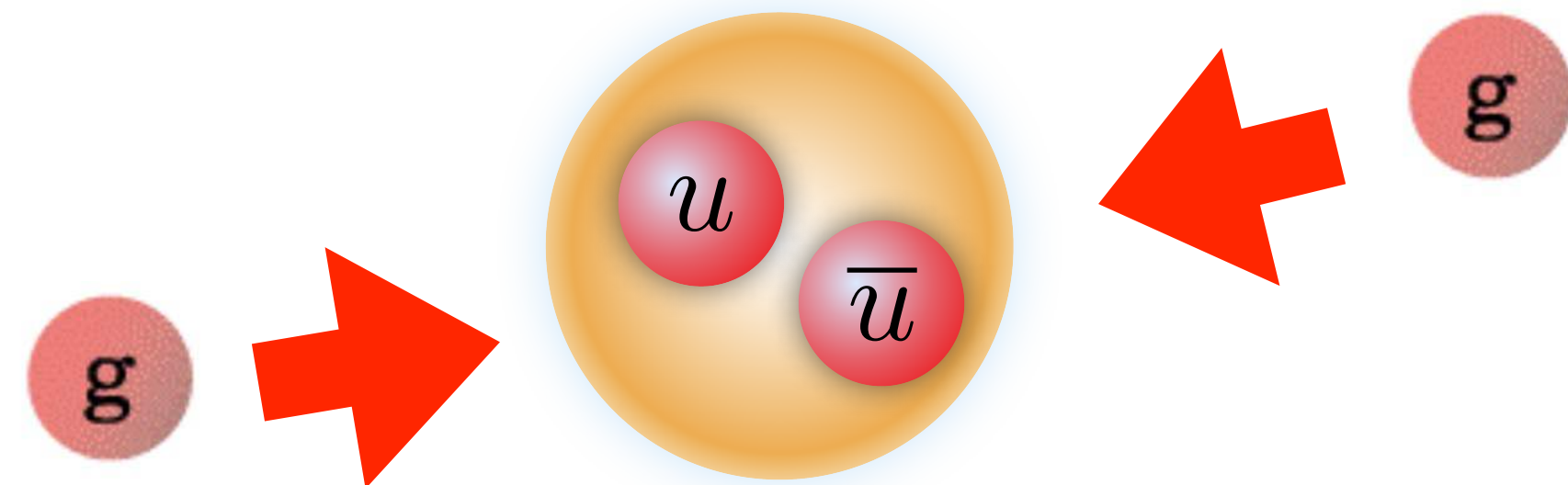


陽子同士の引力の正体は π 中間子

→ π 中間子の予言で湯川さん **ノーベル賞**

日本人初ノーベル賞

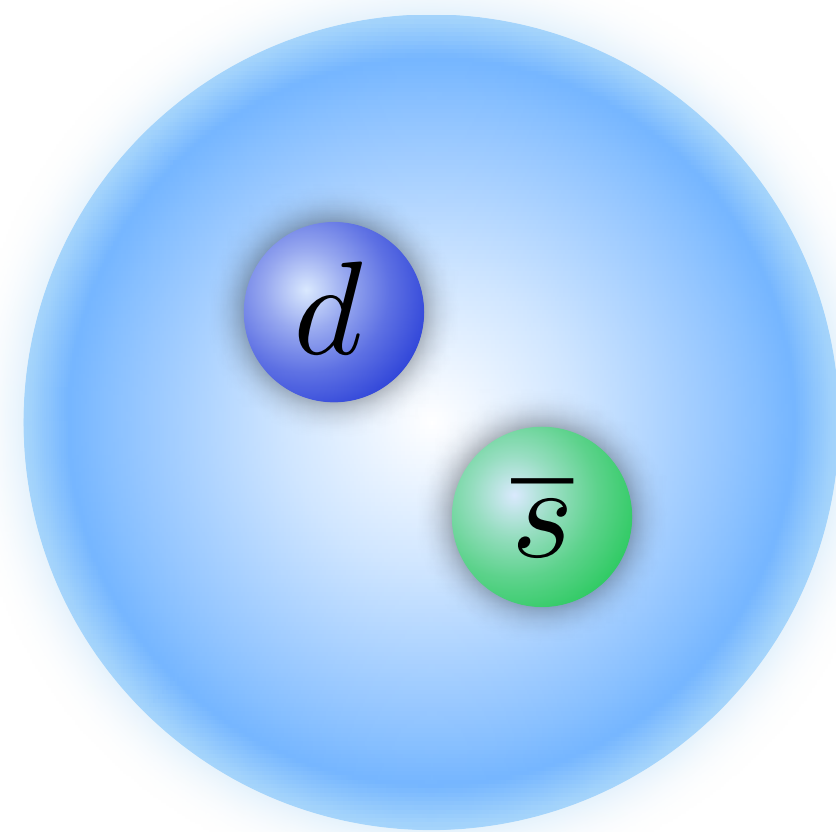
π 中間子はクォークと反クォークの
グルーオンによる束縛状態



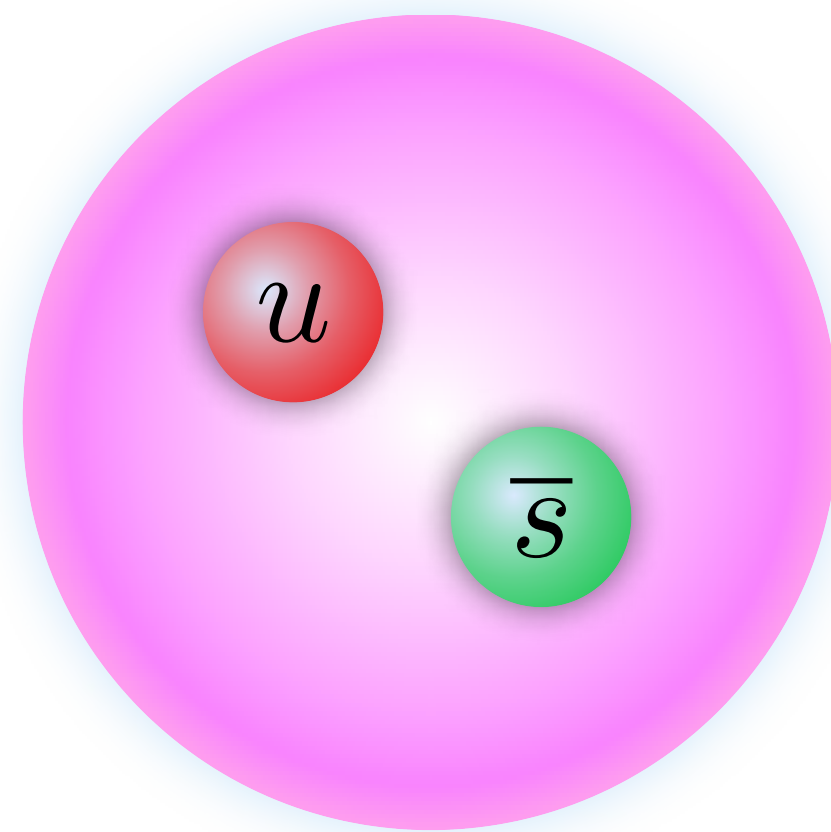
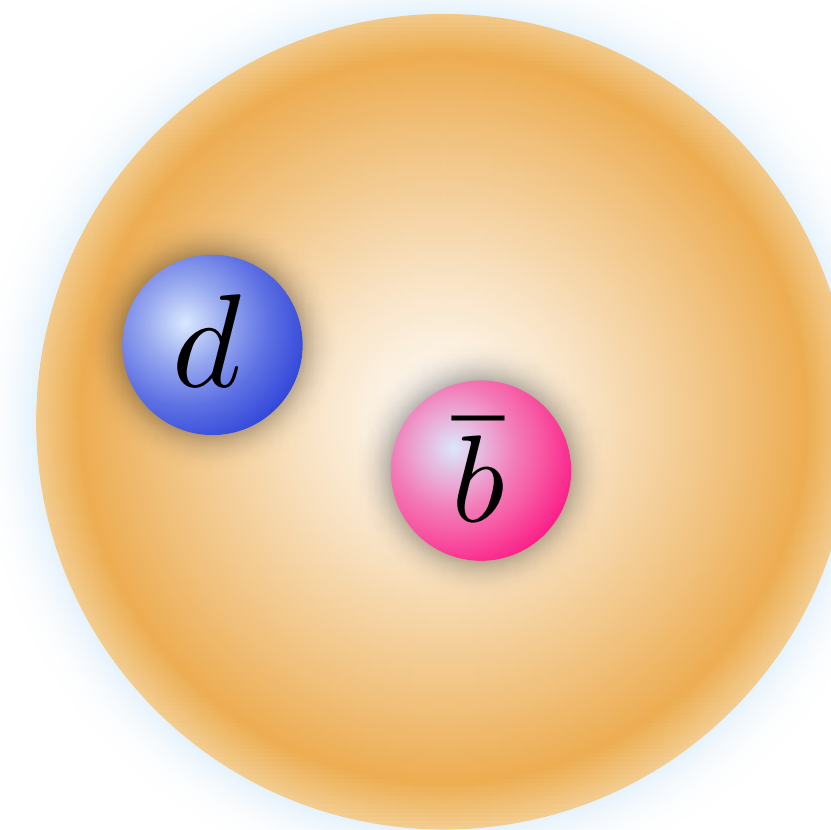
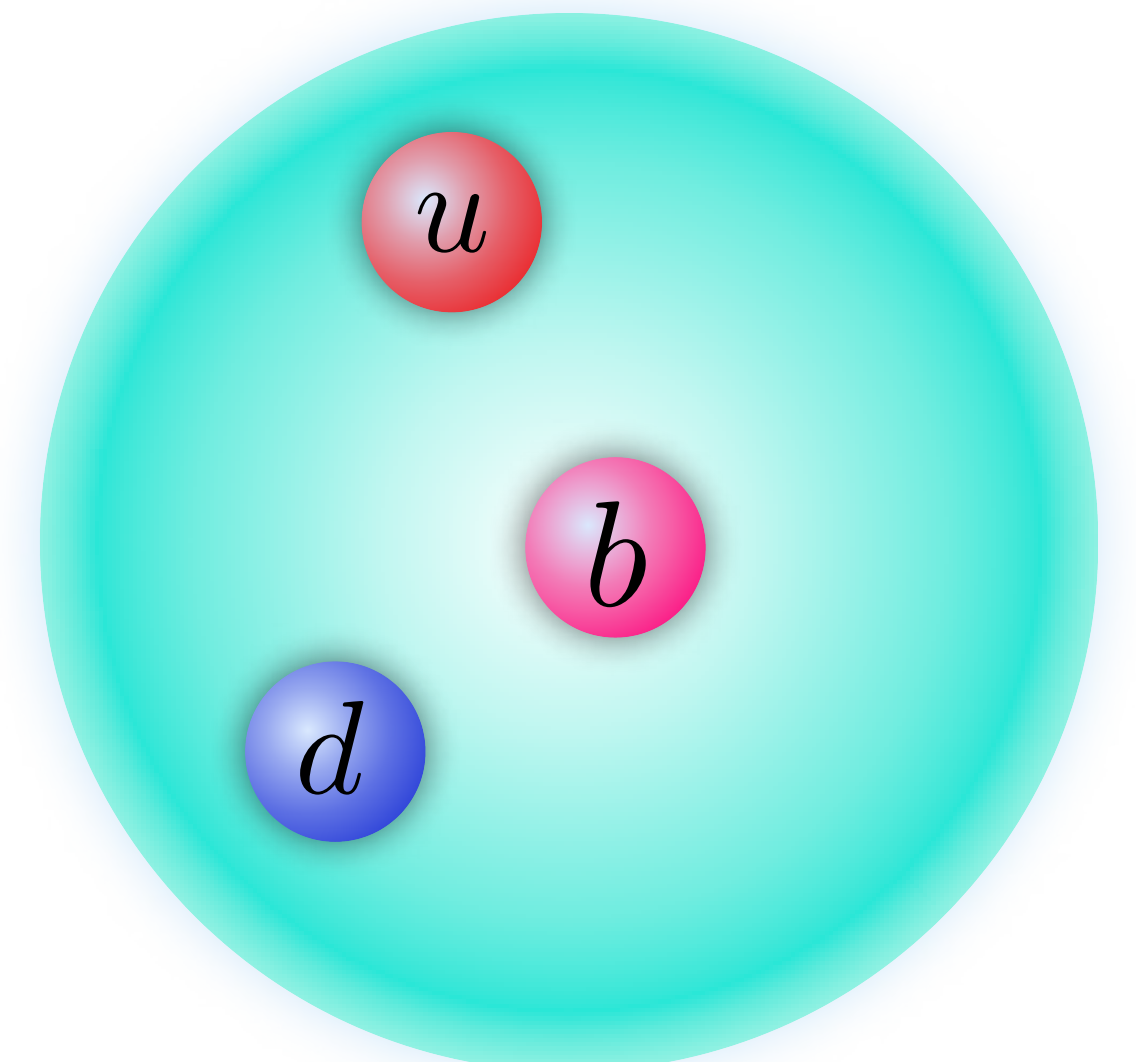
主要登場人物：K中間子・B中間子・

 K_L^0

長寿命状態

 K_S^0

短寿命状態

 K^+ B^0  Λ_b^0 

K中間子は**ストレンジクォーク**を含む

B中間子・ラムダ**b**バリオンは**ボトムクォーク**を含む

素粒子物理の実験施設

- ◆ 世界各地に大型素粒子加速器が存在する



有名なのがCERN (サーン) が所有する **LHC加速器** 山手線の大きさ

日本のKEKにある **SuperKEKB加速器** は **b** **τ** についてはLHCよりも優秀

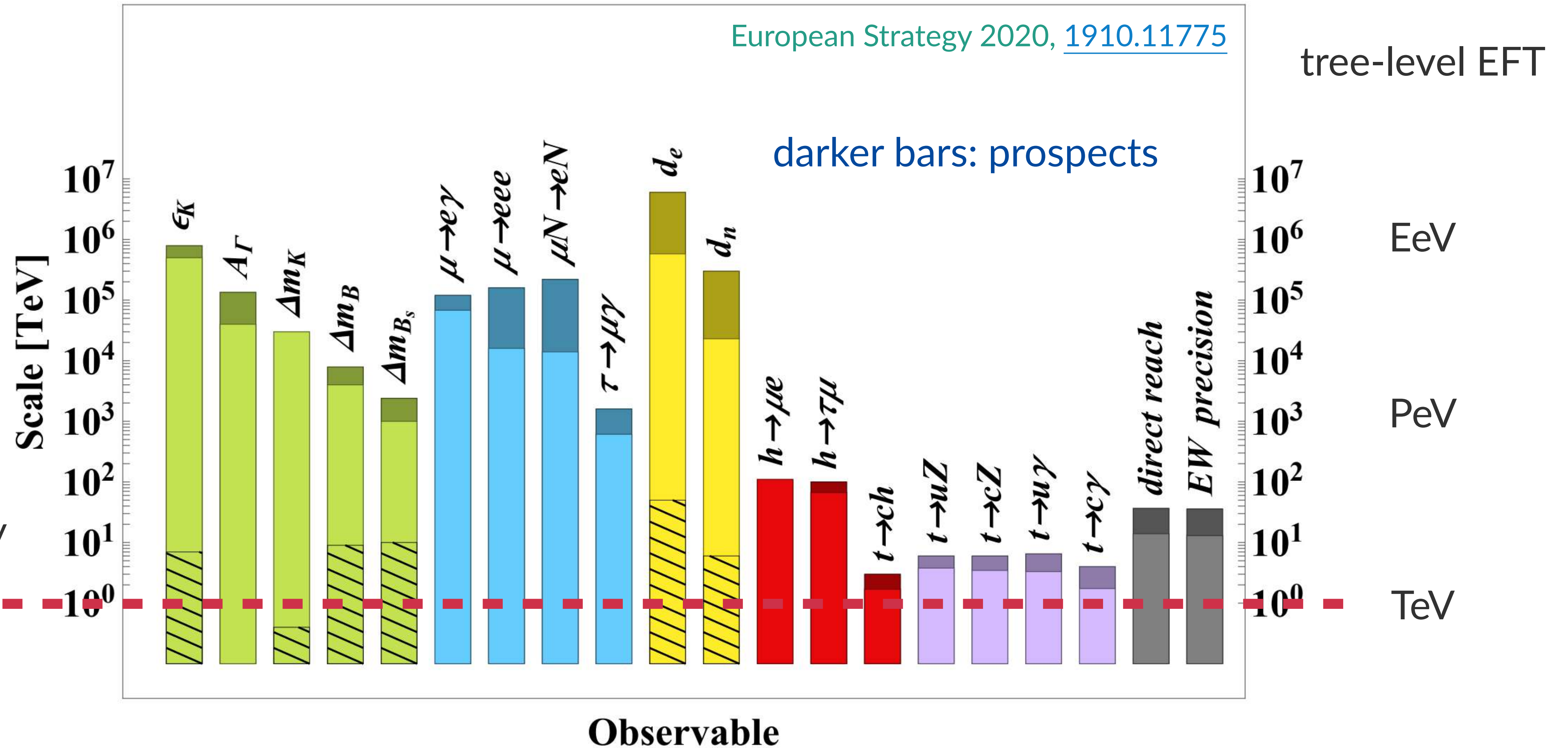
フレーバーの物理の理論的立場

- 新物理を探るアプローチは3種類ある
 - 理想的なセットアップの基礎物理を追求し、それをこの世界に適用する
 - トップダウン：対称性・対称性の破れ・自然性に基づいて新物理を考察する
 - ボトムアップ：実験データや事実に基づいて新物理を考察する
- フレーバー物理は膨大な実験データを持ち、主にボトムアップアプローチで研究されてきた
- フレーバー物理の究極的な目標は、物質・反物質非対称性の謎、フレーバー構造の謎、ニュートリノ質量、強いCP問題。ここからトップダウンアプローチで研究も可能

フレーバー物理の新物理スケールへの感度

コライダー物
理 (~TeV) を遙
かに超える新
物理への感度
をもつ

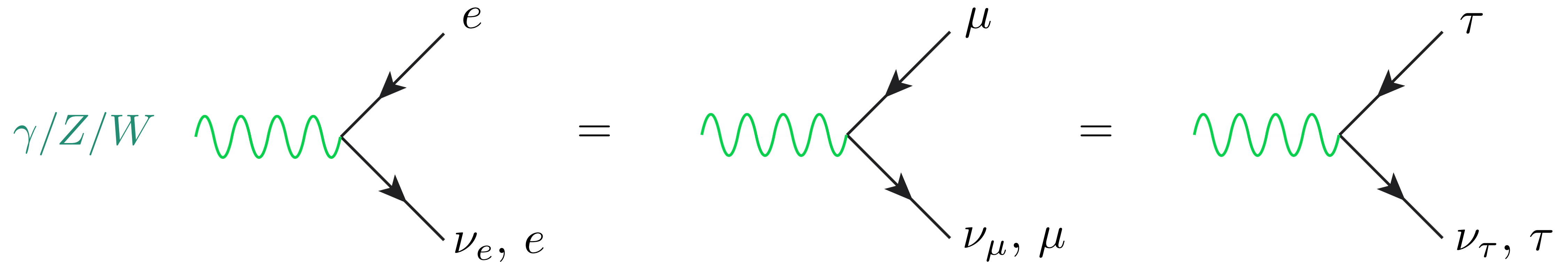
MFV sensitivity



Flavor Anomalies

Test of Lepton Flavor Universality (LFU)

- Gauge symmetry predicts **Lepton Flavor Universality (LFU)**



- Only lepton mass (+QED corrections) violates LFU within the SM

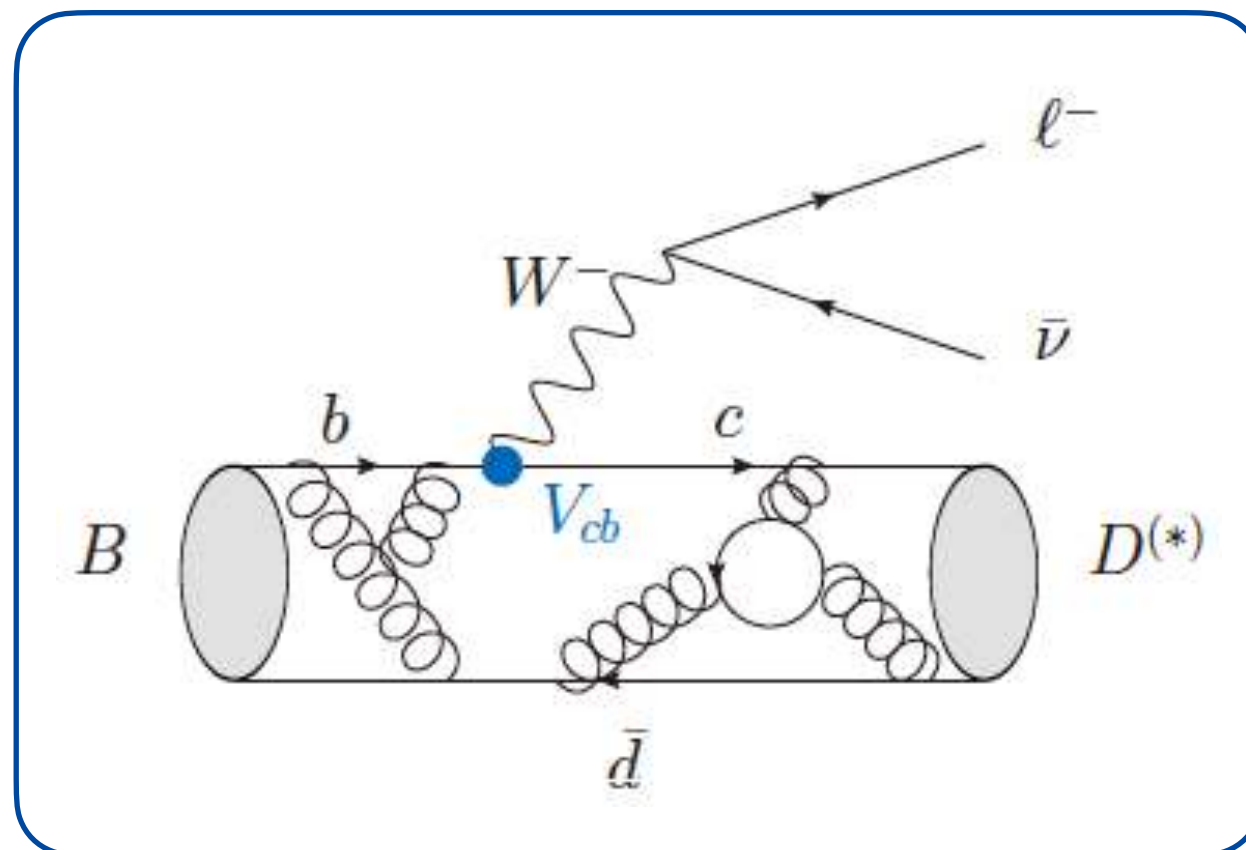
$$m_e = 0.5 \text{ MeV} \ll m_\mu = 105 \text{ MeV} \ll m_\tau = 1776 \text{ MeV} \quad \rightarrow \quad \text{different phase space}$$

Current status of LFU violation

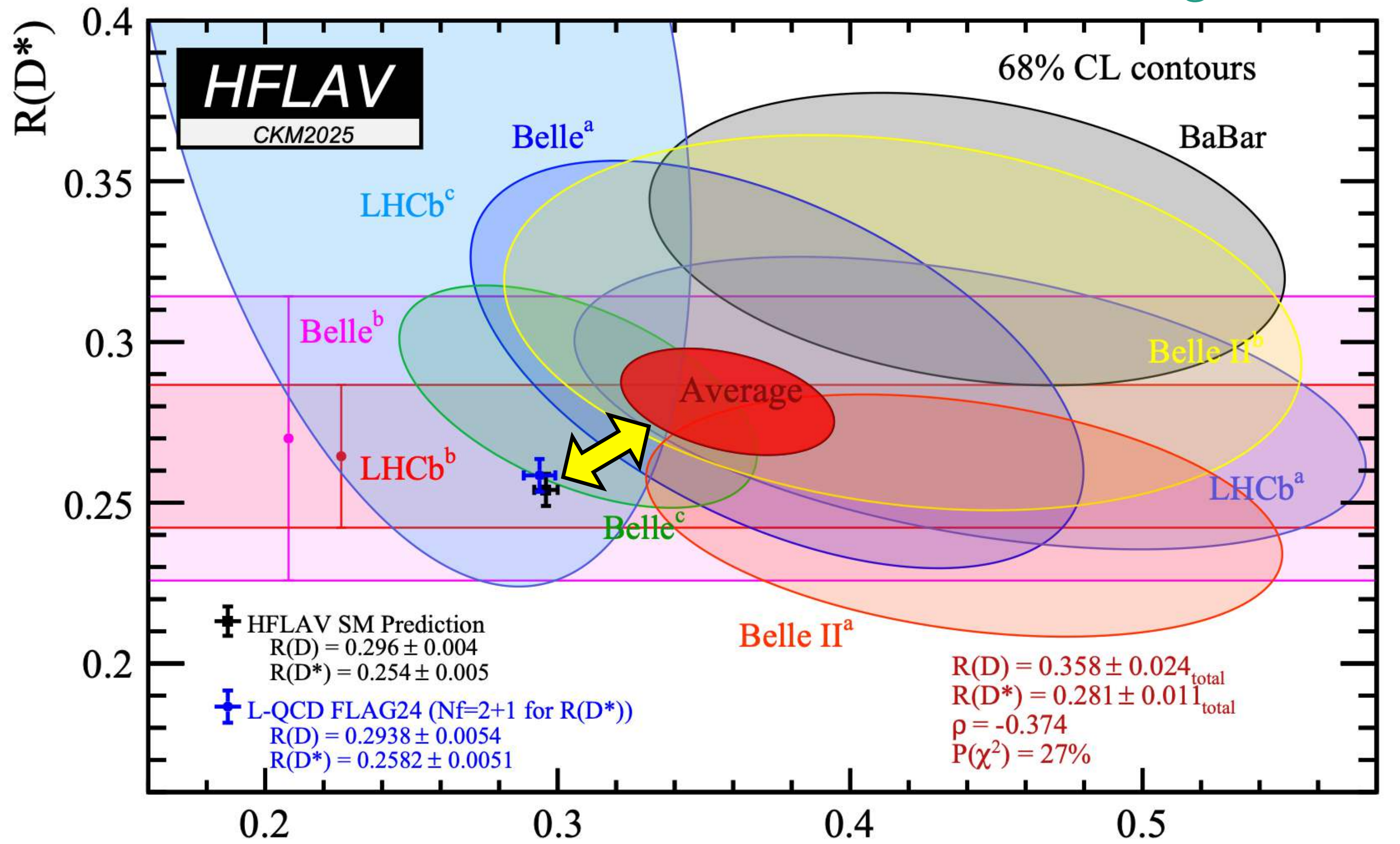
HFLAV 2025 @ CKM2025

$$R(D^{(*)}) = \frac{\text{BR}(B \rightarrow D^{(*)} \bar{\tau} \nu_{\tau})}{\text{BR}(B \rightarrow D^{(*)} \bar{\ell} \nu_{\ell})}$$

($\ell = e, \mu$)



$b \rightarrow c \tau \nu$ anomaly



9 independent data! **3.8 (~5) σ tension (HFLAV average)**

The other B anomalies

LHCb-PAPER-2025-041

- $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$: **global fit $>5\sigma$** (\rightarrow next slide)

$$\mathcal{B}(B \rightarrow K \mu \mu), \mathcal{B}(B_s \rightarrow \phi \mu \mu), P'_5, R(K^{(*)}), \mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu \mu)$$

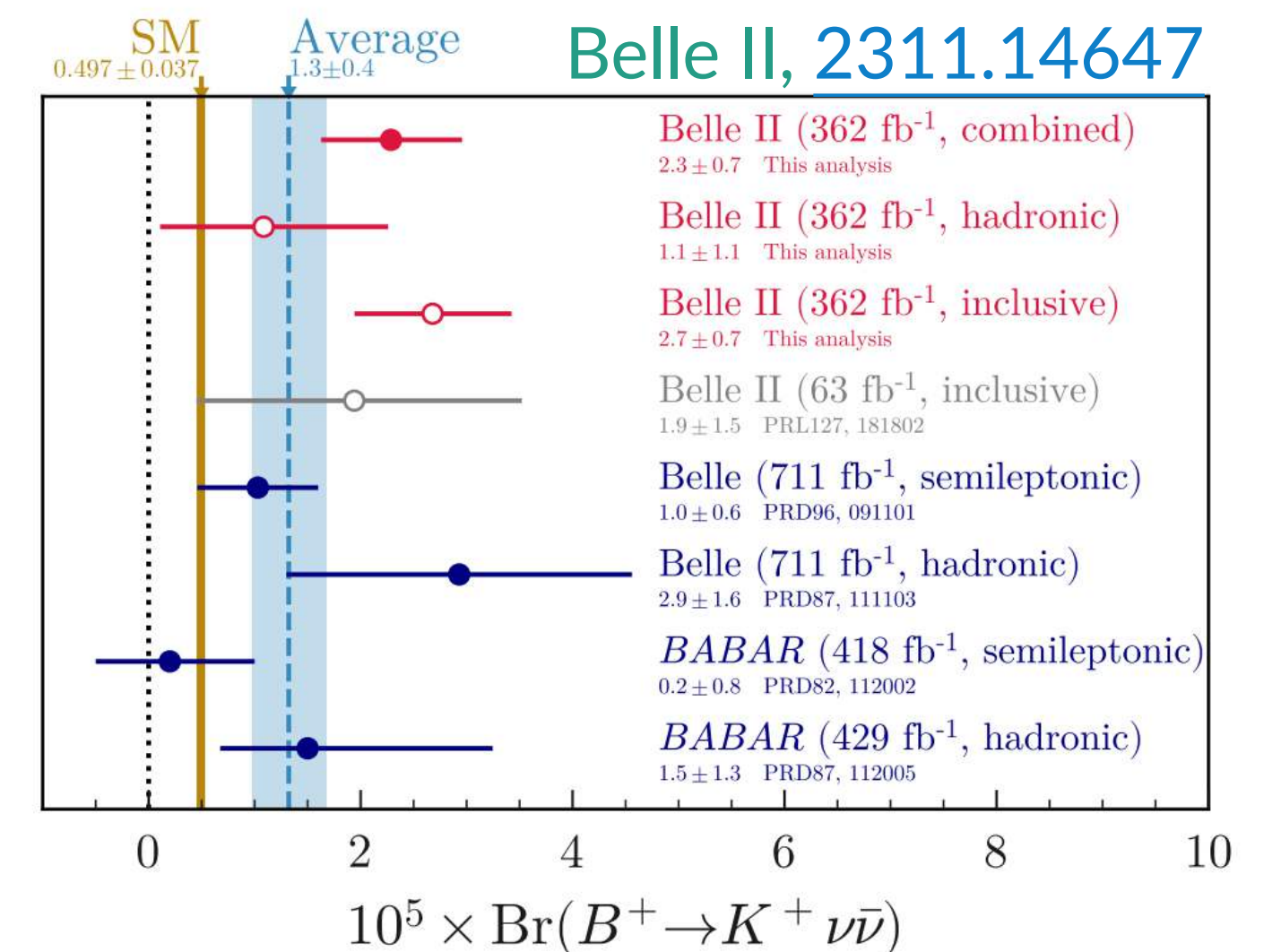
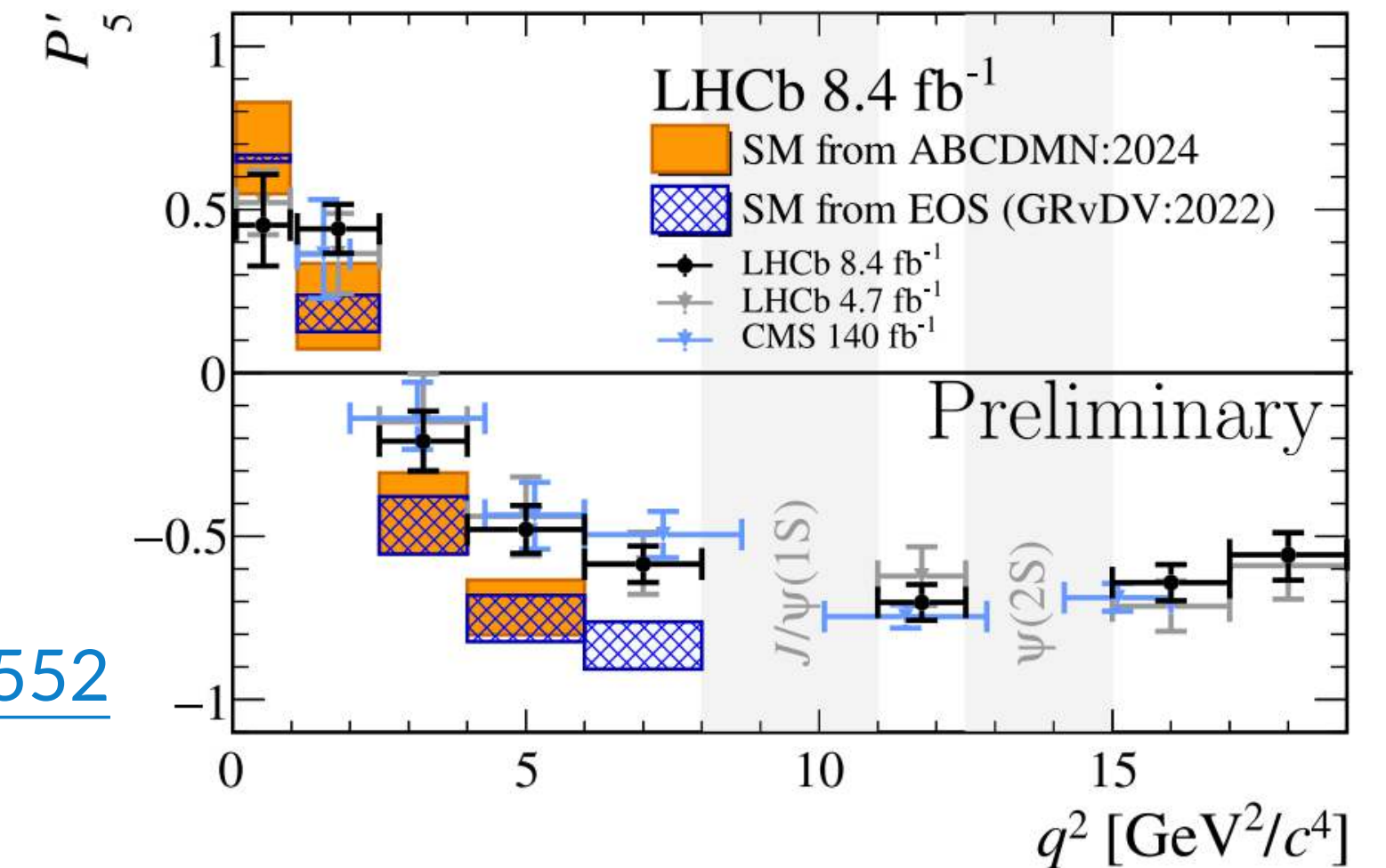
- $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$: $\approx 2\sigma$ excess? [Crivellin, Iguro, TK, 2505.05552](#)

$$\mu(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}) \equiv \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})_{\text{SM}}} = 2.75 \pm 0.86$$

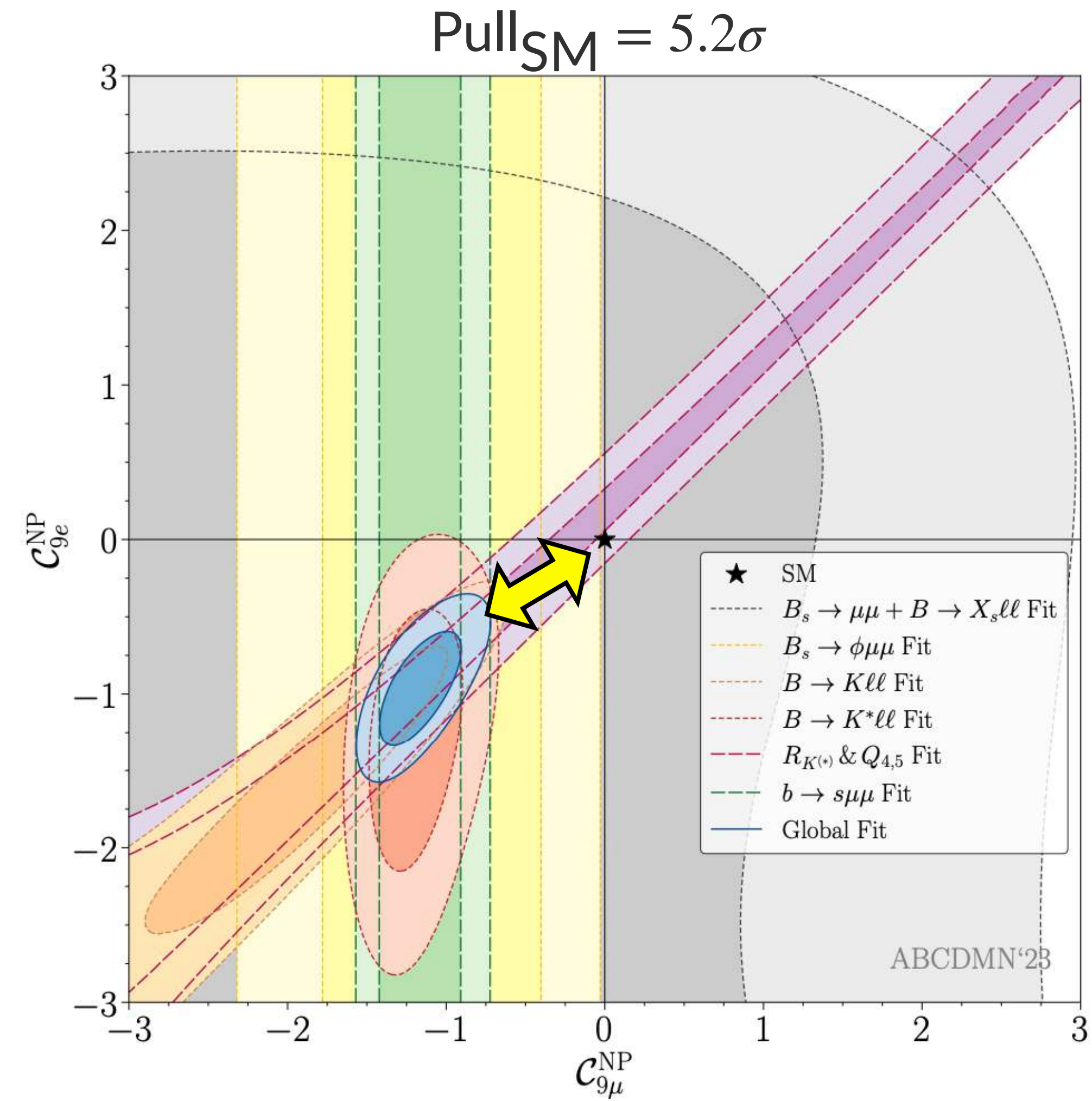
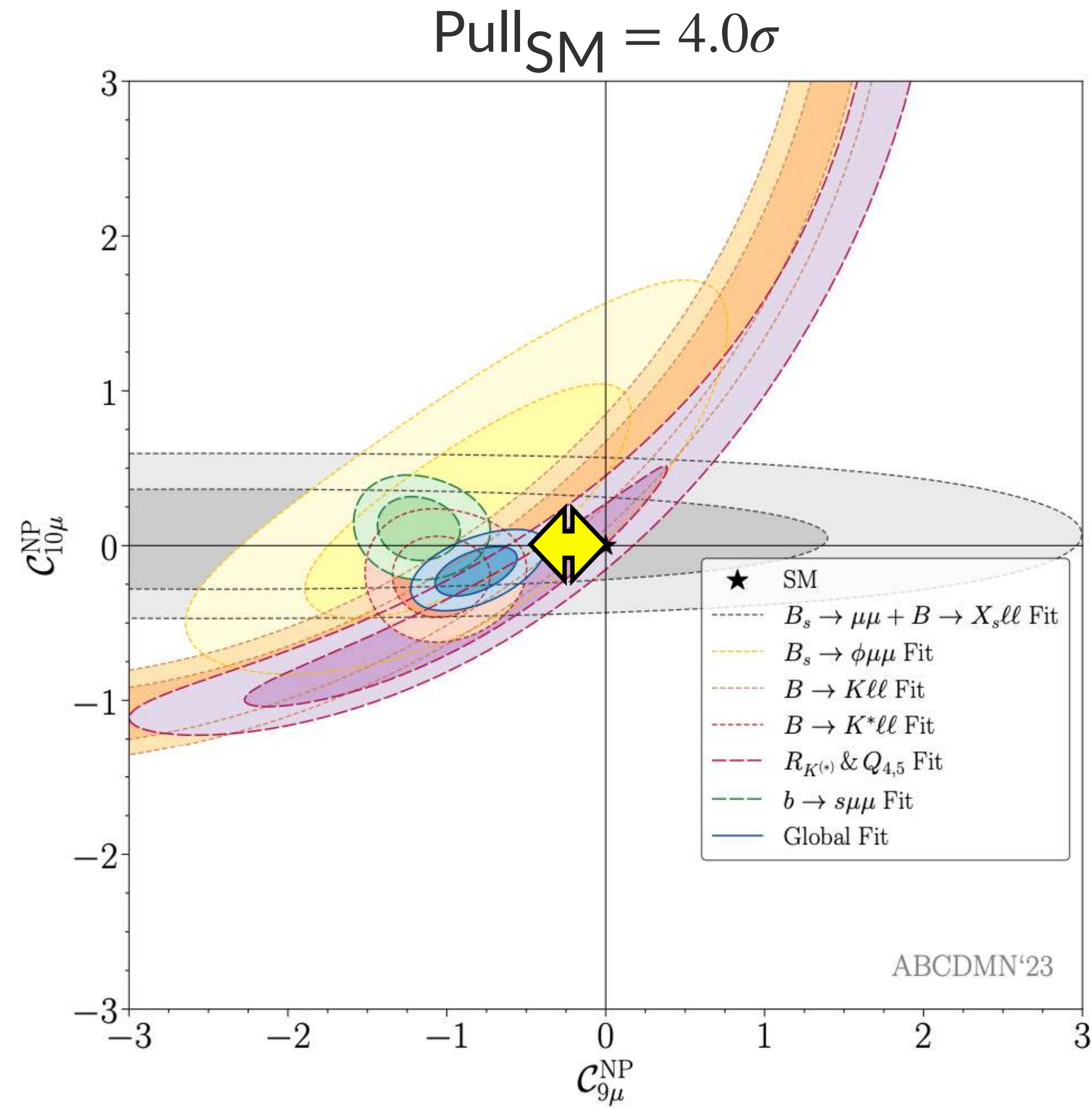
- $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$: $\approx 1.5\sigma$ excess? [NA62, 2412.12015](#)

$$\mu(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \equiv \frac{\mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})}{\mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})_{\text{SM}}} = 1.61^{+0.43}_{-0.39}$$

Both neutrino channels indicate the same direction—interesting



Global fit of $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ observables Algueró, et al, [2304.07330](#)



Leptoquarks

- TeV leptoquarks (**LQ**) can accommodate all flavor anomalies (without collider bounds). Feynman diagrams are shown in next slide

- We consider two examples:

- $S_1 + S_3$ **scalar** LQ ($\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3$) ($\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{3}, 1/3$) **UV model?**

$$\lambda_{ij}^L = \lambda^L \begin{pmatrix} 0 & 0 & r^3 \\ 0 & 0 & r \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \lambda_{ij}^R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{23}^R \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathcal{L}_{S_1+S_3} = \left(\lambda_{ij}^L \overline{Q_i^C} (i\sigma^2) L_j + \lambda_{ij}^R \overline{u_i^C} e_j \right) S_1 + \kappa_{ij} \overline{Q_i^C} (i\sigma^2) \sigma^I L_j S_3^I + \text{h.c.},$$
minimal set of the couplings

$$\kappa_{ij} = (1 - \epsilon) \lambda^L \begin{pmatrix} 0 & 0 & (1 - \delta)r^3 \\ 0 & 0 & -r \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

- U_1 **vector** LQ ($\mathbf{3}, \mathbf{1}, 2/3$) **Several UV completions are proposed**

$$\mathcal{L}_{U_1} = \left(\kappa_{ij}^L \overline{Q_i} \gamma_\mu L_j + \kappa_{ij}^R \overline{d_i} \gamma_\mu e_j \right) U_1^\mu + \text{h.c.}$$

Leptoquark contributions

S1 + S3 **scalar** LQ

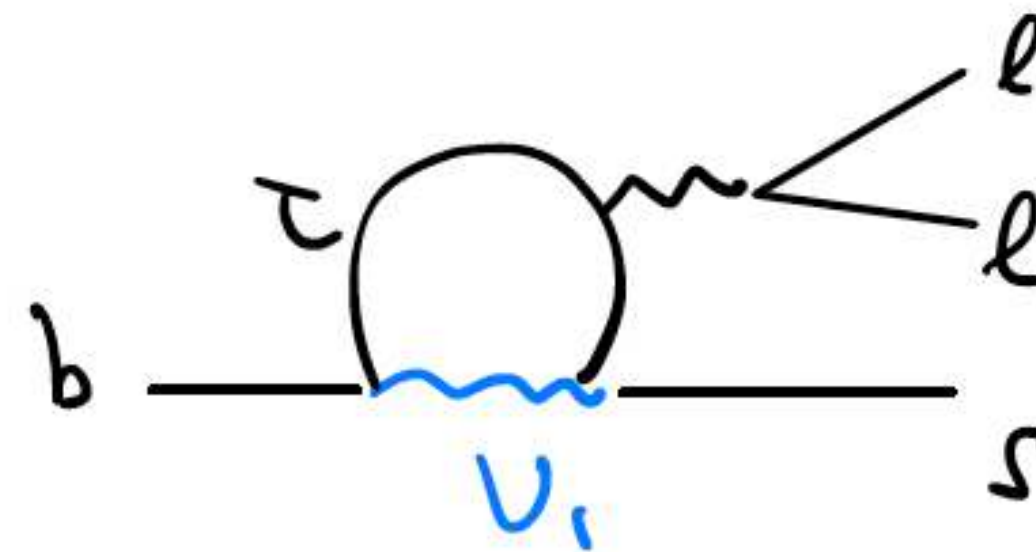
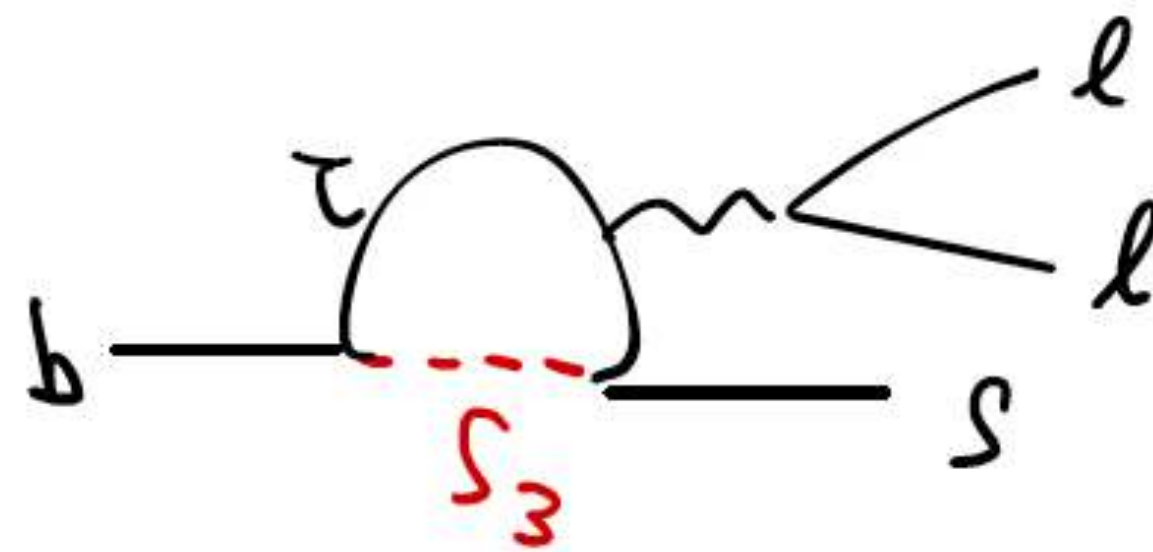
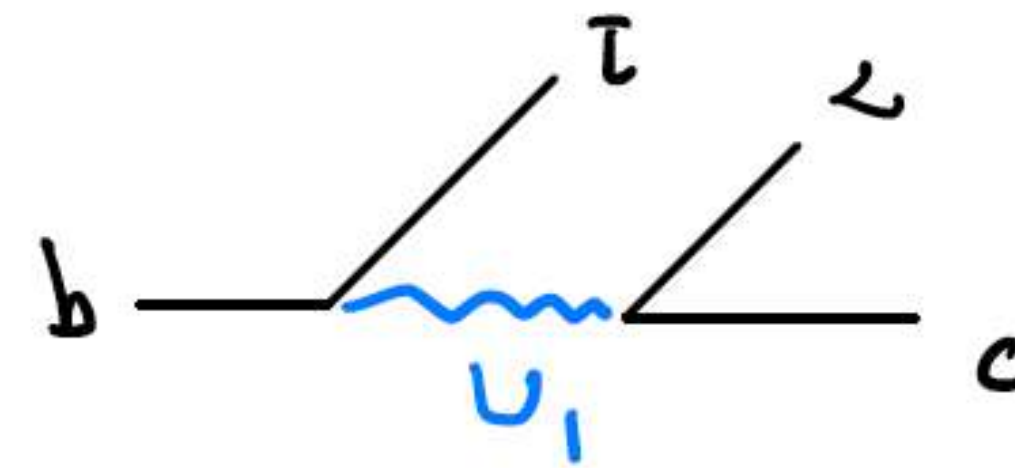
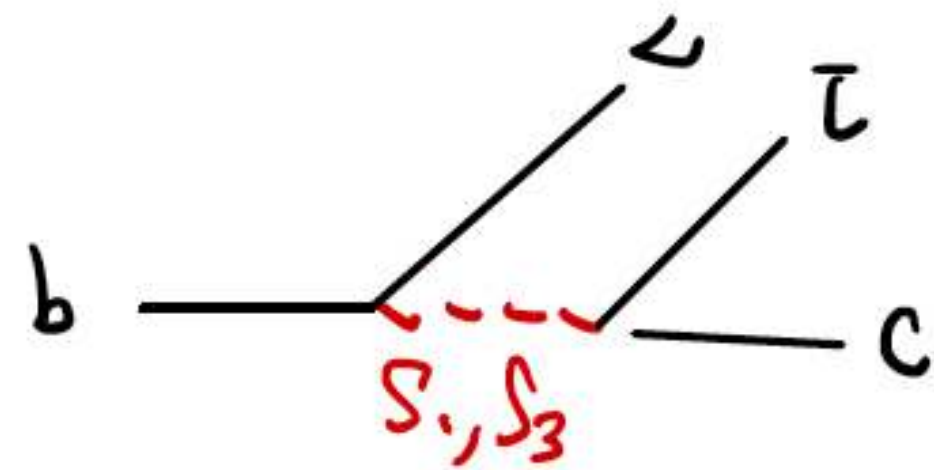
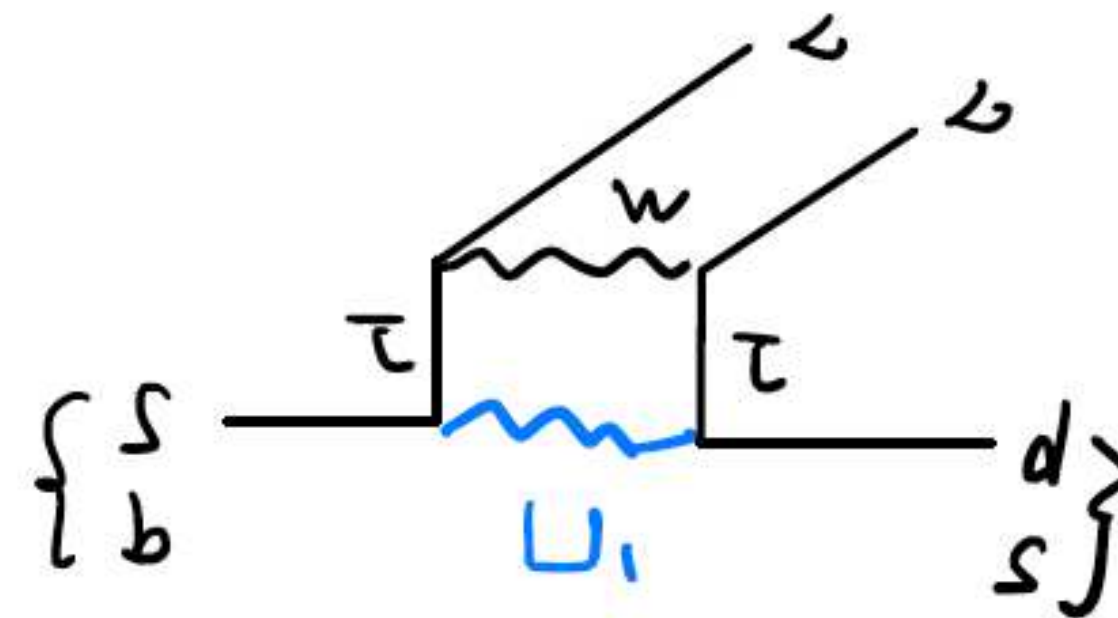
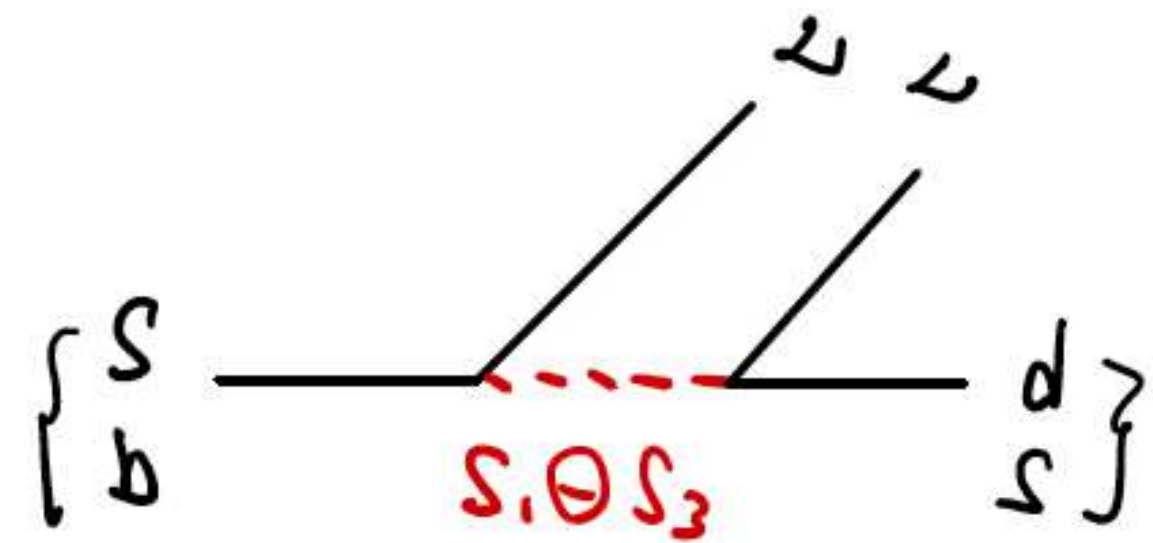
U1 **vector** LQ

$$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$$

$$B \rightarrow K \nu \bar{\nu}$$

$$B \rightarrow D \tau \bar{\nu}$$

$$b \rightarrow s l^+ l^-$$



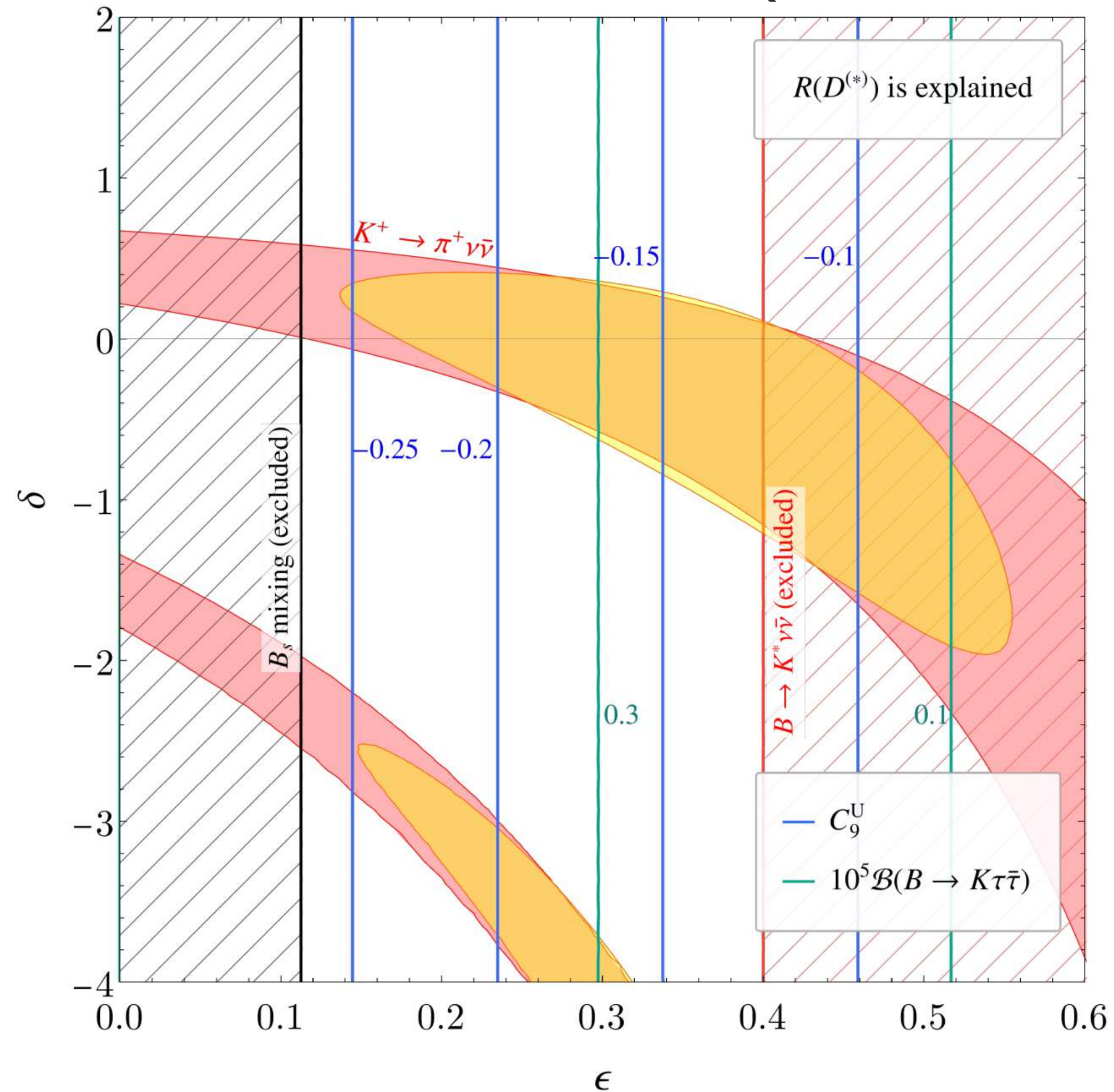
$S_1 - S_3$ cancelation must be satisfied

loop-induced

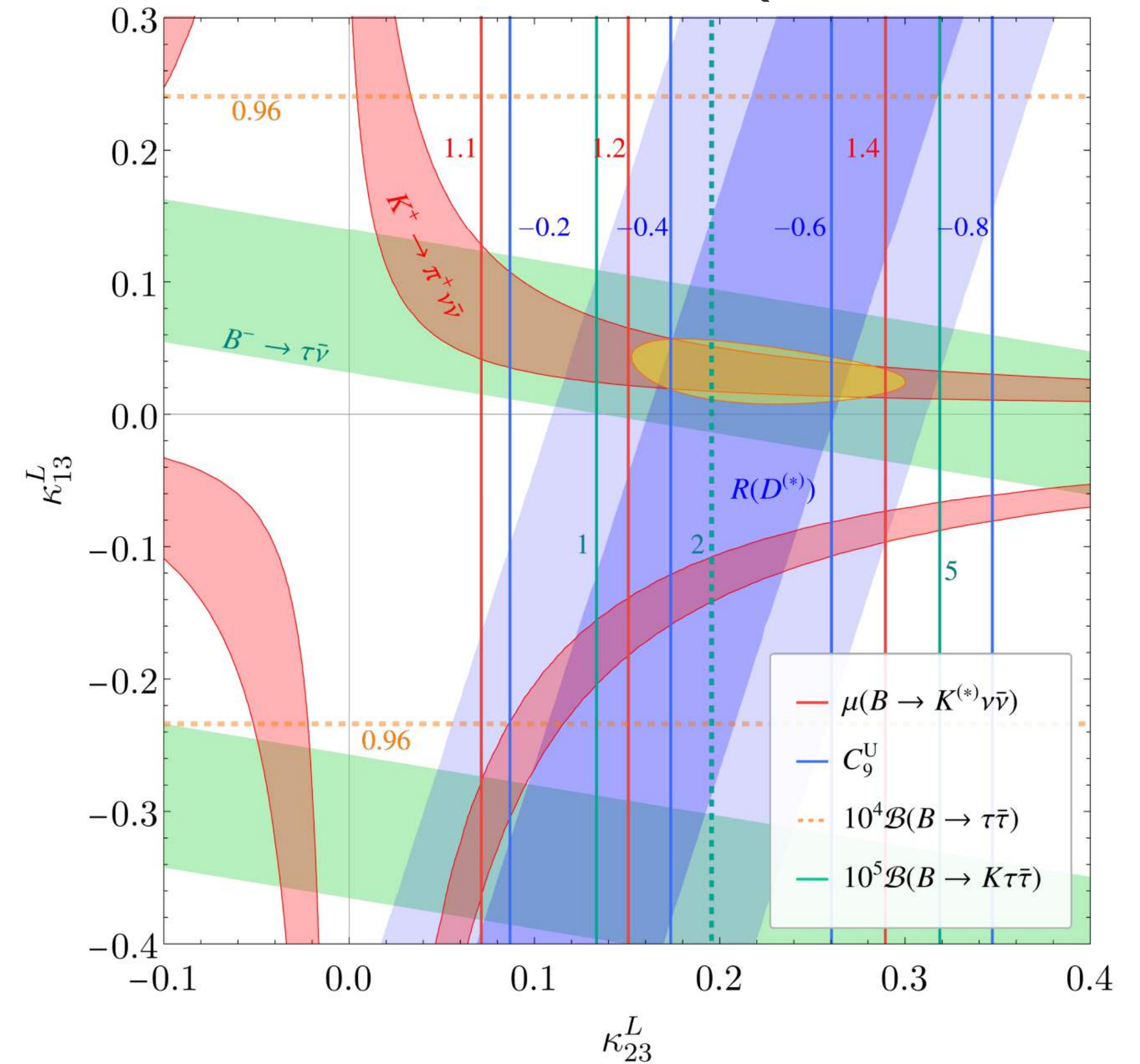
LQ vs flavor anomalies

Crivellin, Iguro, TK, [2505.05552](https://arxiv.org/abs/2505.05552)

S1 + S3 scalar LQ



U1 vector LQ



$b \rightarrow c$ セミレプトニック和則

- バリオンにけるレプトン普遍性: $\mathcal{R}(\Lambda_c) = \frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+ \ell^- \bar{\nu}_\ell)}$
- 新物理によらず、**任意のラグランジアン**で以下の和則が $R(D)$, $R(D^*)$, $R(\Lambda_c)$

の間に成立する (重クォーク対称性)

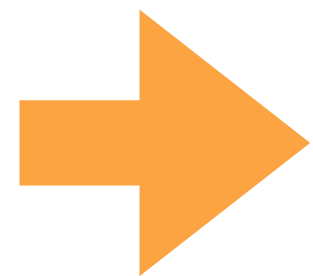
現象論的
解析 [Blanke, TK, et al, 1811.09603](#),
[Fedele, TK, et al, 2211.14172](#)

$$\frac{R(\Lambda_c)}{R(\Lambda_c)_{\text{SM}}} \simeq 0.28 \frac{R(D)}{R(D)_{\text{SM}}} + 0.72 \frac{R(D^*)}{R(D^*)_{\text{SM}}}$$

理論的
導出 [Endo, Iguro, et al, 2501.09382](#),
[2506.16027](#), [2508.06322](#), [2509.02006](#)

$R(\Lambda_c)$ を測定すれば、 $R(D^{(*)})$ アノマリーを追試可能であることがわかった

$R(D^{(*)})$
anomaly
input



$$R(\Lambda_c) = 0.377 \pm 0.011 R_{D^{(*)}} \pm 0.005 R_{\Lambda_c}^{\text{SM}}$$

$$R(\Lambda_c)_{\text{SM}} = 0.324 \pm 0.004$$

1.8 σ tension

$$R(\Lambda_c)_{\text{exp}} = 0.242 \pm 0.075 \quad \text{LHCb, } \a href="#">2201.03497$$

中間子とバリオンの素は同じ味



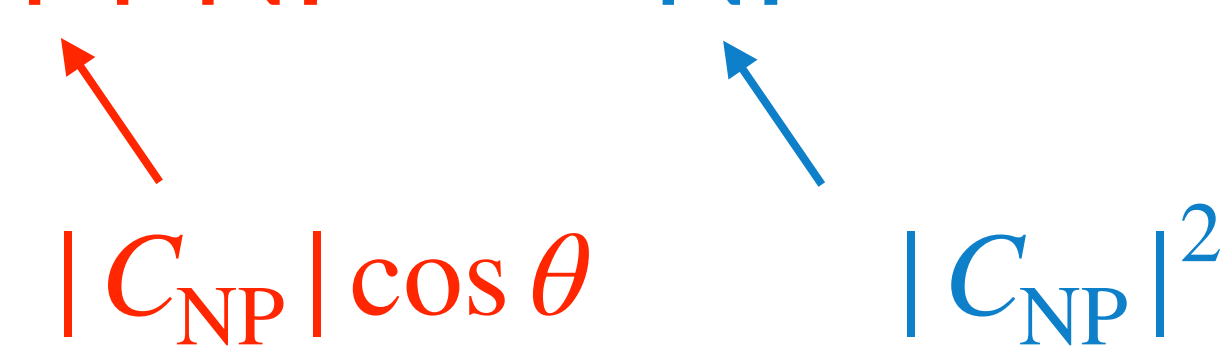
©KMI

CP violation in CP-conserving process

- CPV phase contributions to the CP-conserving process

$$\text{CP-conserving Observables} = \text{SM}^2 + \text{SM-NP} + \text{NP}^2$$

$|C_{\text{NP}}| \cos \theta$ $|C_{\text{NP}}|^2$

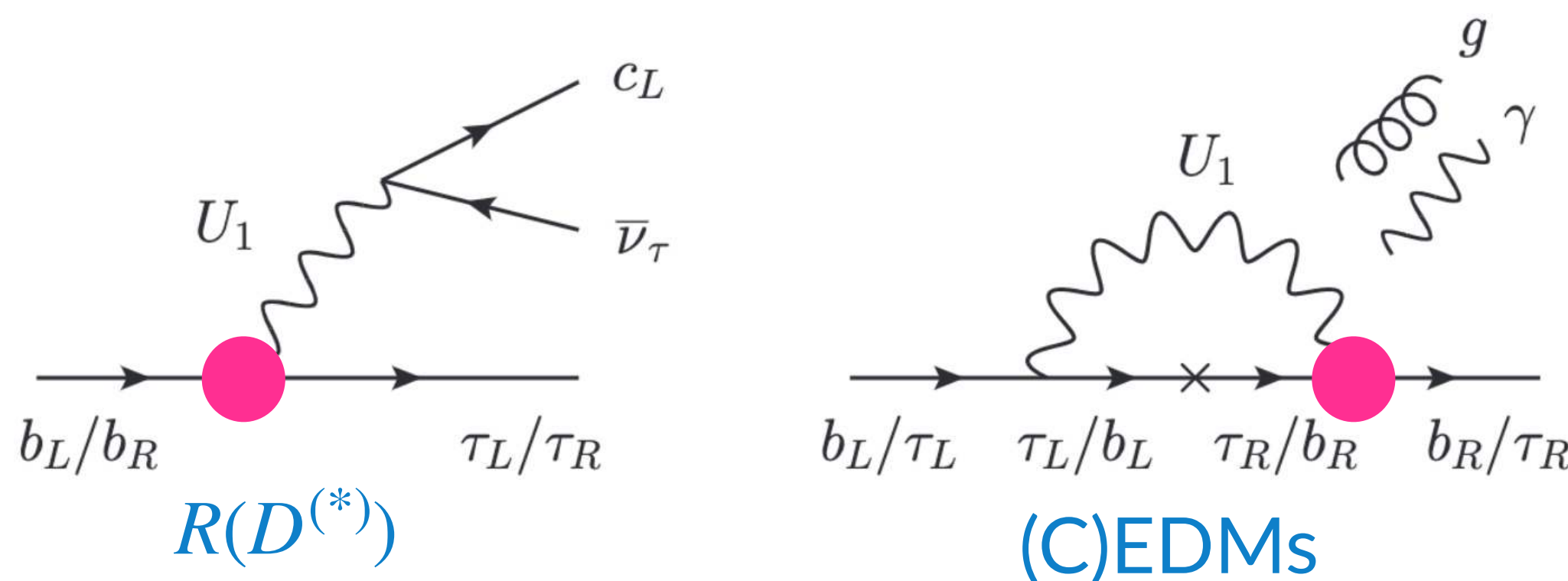


- When the number of anomalous (CPC) observables ≥ 2 , this gives nontrivial constraint on both the CPV phase (θ) and the absolute value ($|C_{\text{NP}}|$) in NP
- Although B anomaly is CP-conserving processes, $R(D)$ and $R(D^*)$ anomalies provide the nontrivial constraint on the CPV phase in simple NP models

Leptoquark induced EDM

- LQ models naturally contain the CPV phase in the Yukawa interactions

$$\mathcal{L} = (Y_L \bar{Q}_i \gamma_\mu P_L L_3 + Y_R \bar{b} \gamma_\mu P_R \tau) U_1^\mu$$

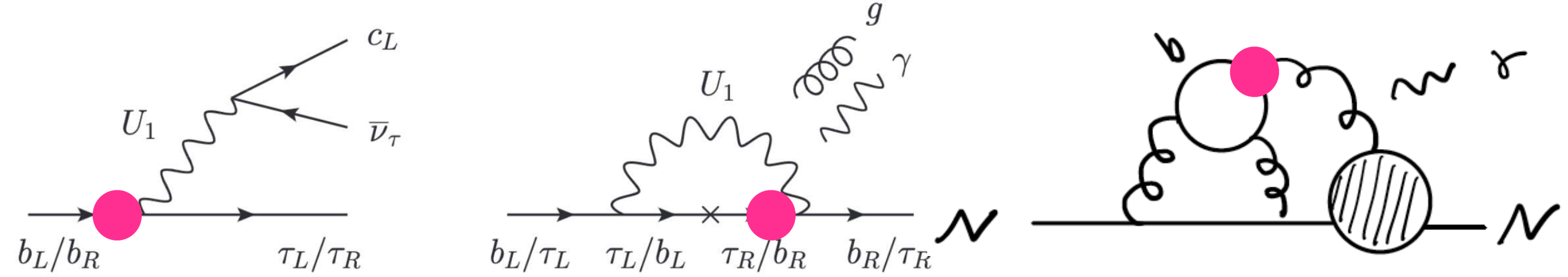


U_1 vector LQ induces bottom quark (C)EDM

R_2 scalar LQ induces charm quark (C)EDM

- At hadronic scale, the neutron and proton EDMs are radiatively induced from the heavy-quark EDM and chrome-EDM

LQ vs EDM

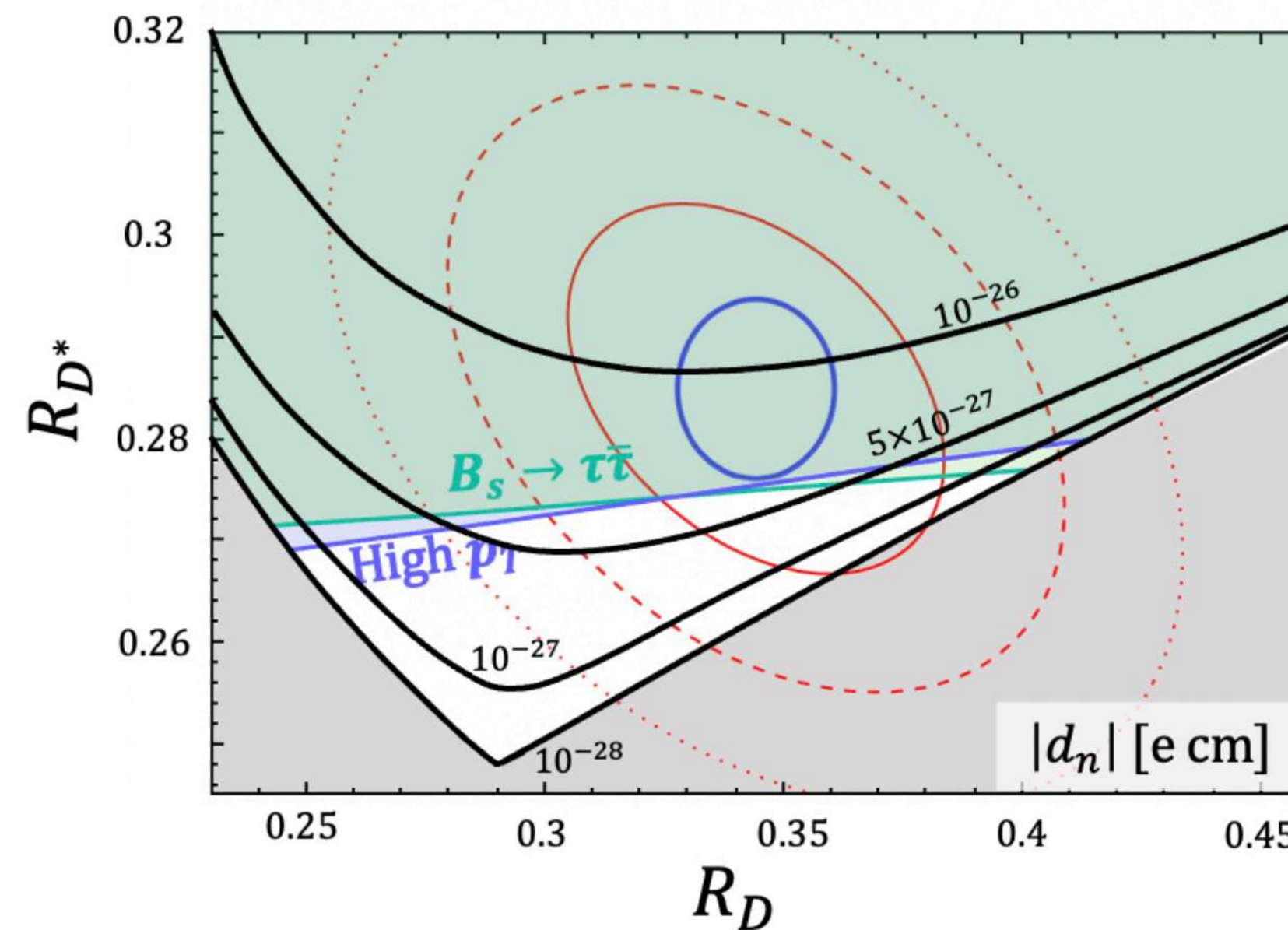
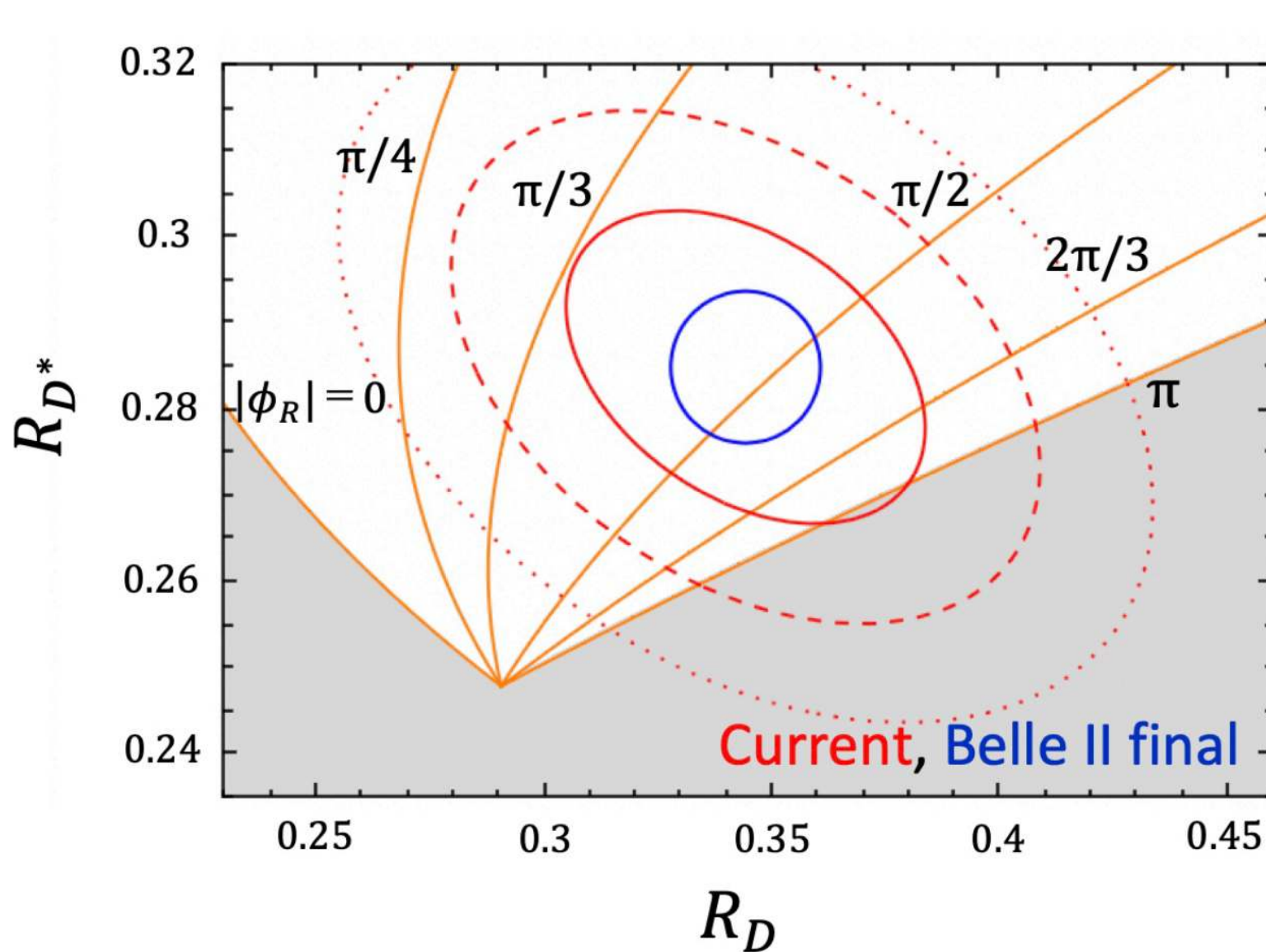


CP-conserving Observables = SM² + SM-NP + NP²
 $|C_{NP}| \cos \theta$ $|C_{NP}|^2$

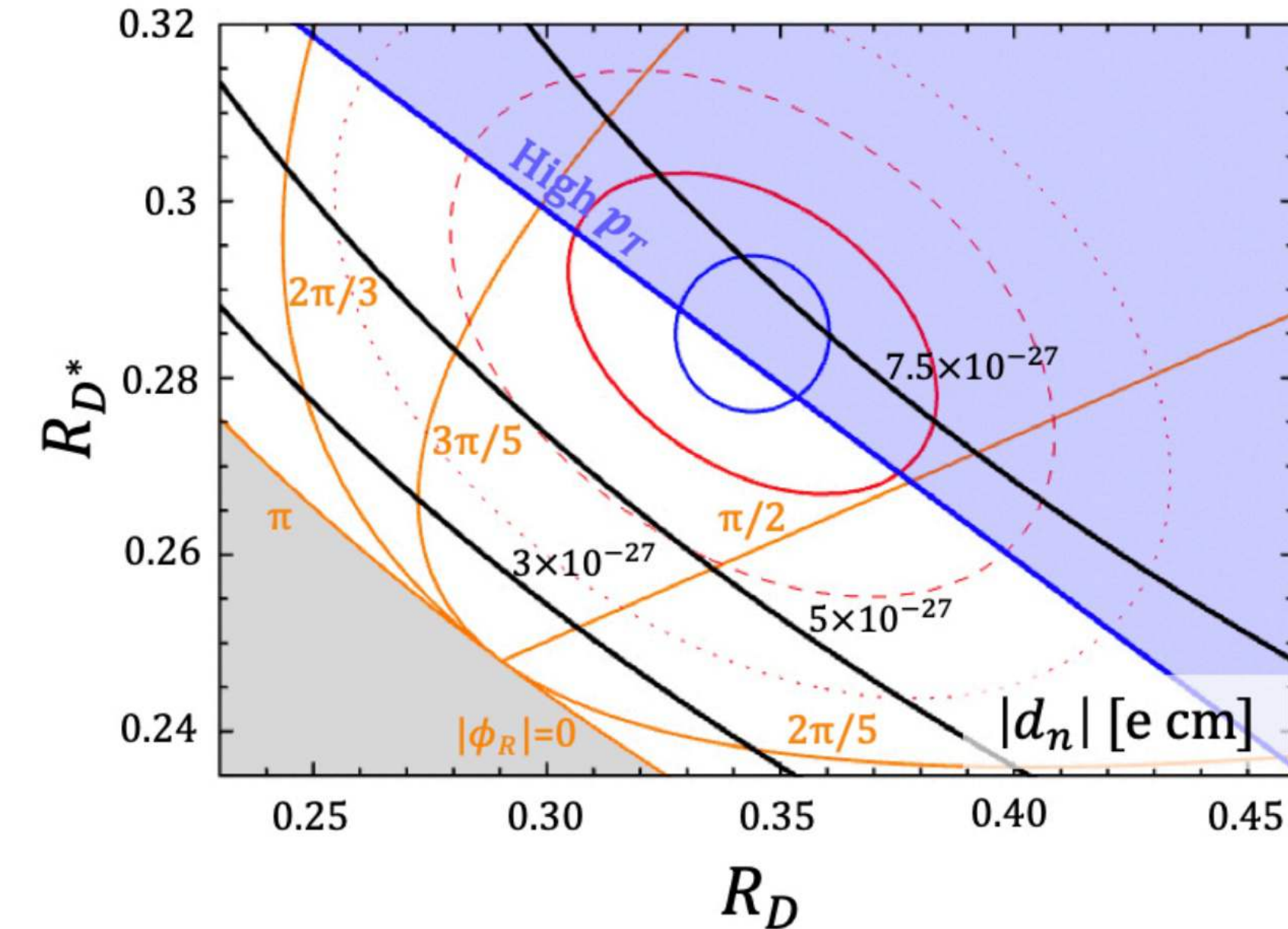
Fuyuto, et al, [1804.01137](#)

Iguro, TK, [2307.11751](#)

CPV phase in a vector LQ U_1



CPV phase in a scalar LQ R_2



4-loop level LQ-induced nucleon EDM can be probed with future sensitivity

CP violation in $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

$|V_{us}|$ vs unitarity (CAA)

$K \rightarrow \pi \ell \bar{\nu}$ tree-level CPC

$K^- \rightarrow \mu \bar{\nu}$

ϵ_K and ϵ'

$K_L \rightarrow \pi\pi$

FCNC and CPV

$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$



Understanding of ChPT

$K_S \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-$

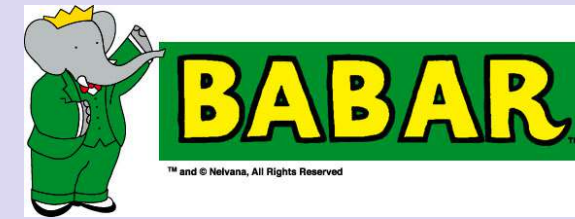
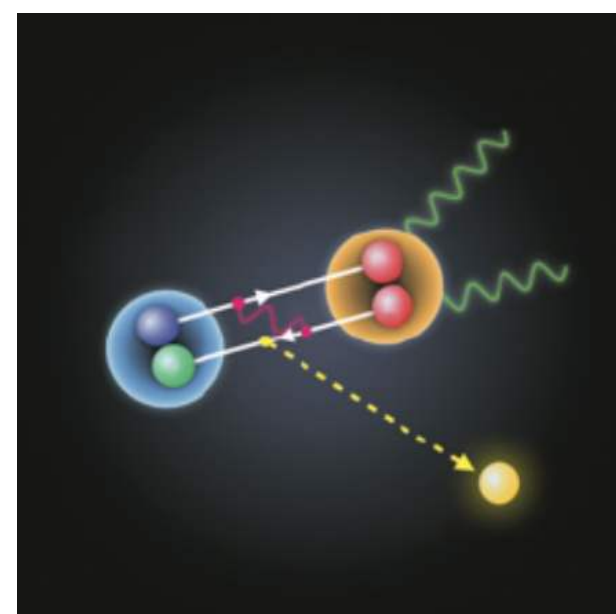
$K_S \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$

$K_S \rightarrow 4\ell$

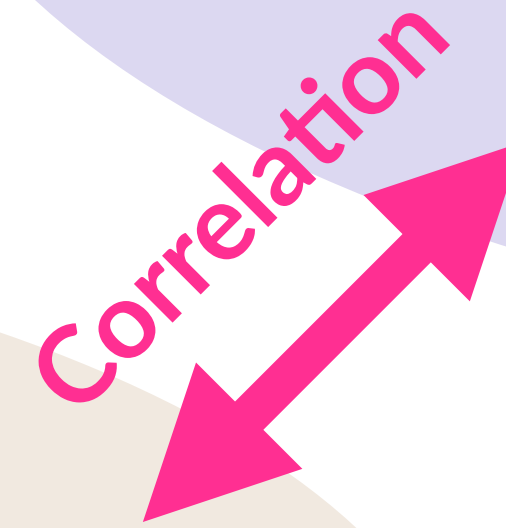
$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$



$K \rightarrow \pi X?$

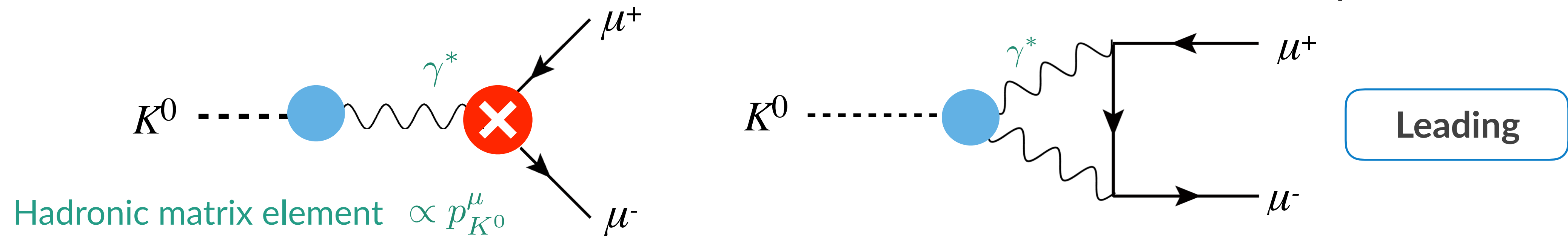


B anomalies

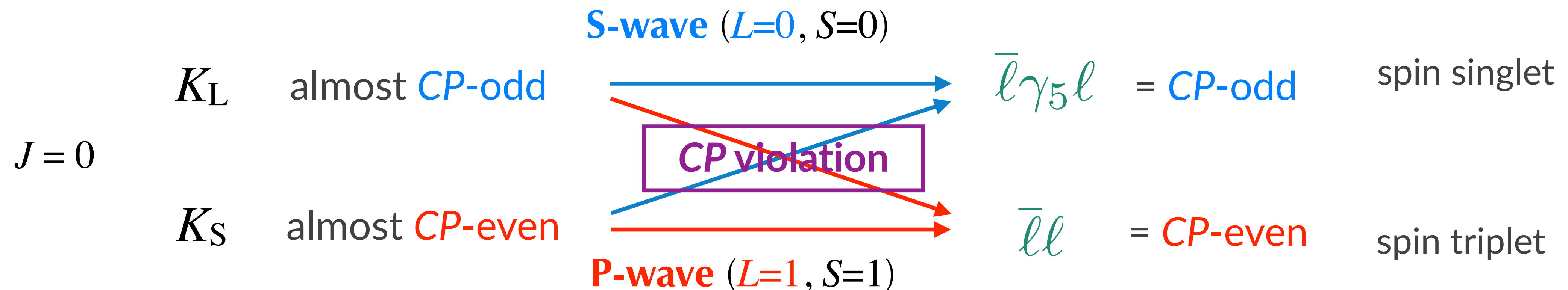


$$K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \text{ and } K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- Double-photon exchange is the leading contribution in $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$



- Both CP-conserving and CP-violating contributions exist



Direct CP violation in $K_{L,S}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- New idea: **direct CP violation of $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$** coming from interference between K_L^0 and K_S^0 in neutral kaon beam [D'Ambrosio, TK, 1707.06999](#); [Dery, Ghosh, Grossman, Schacht, 2104.06427](#)



weak phase = 0

strong phase = photon loop:

$$K_L \rightarrow \gamma\gamma | \gamma\gamma \rightarrow \mu\mu$$

weak phase = $\text{Im} [V_{ts}^* V_{td}]$

strong phase = 0

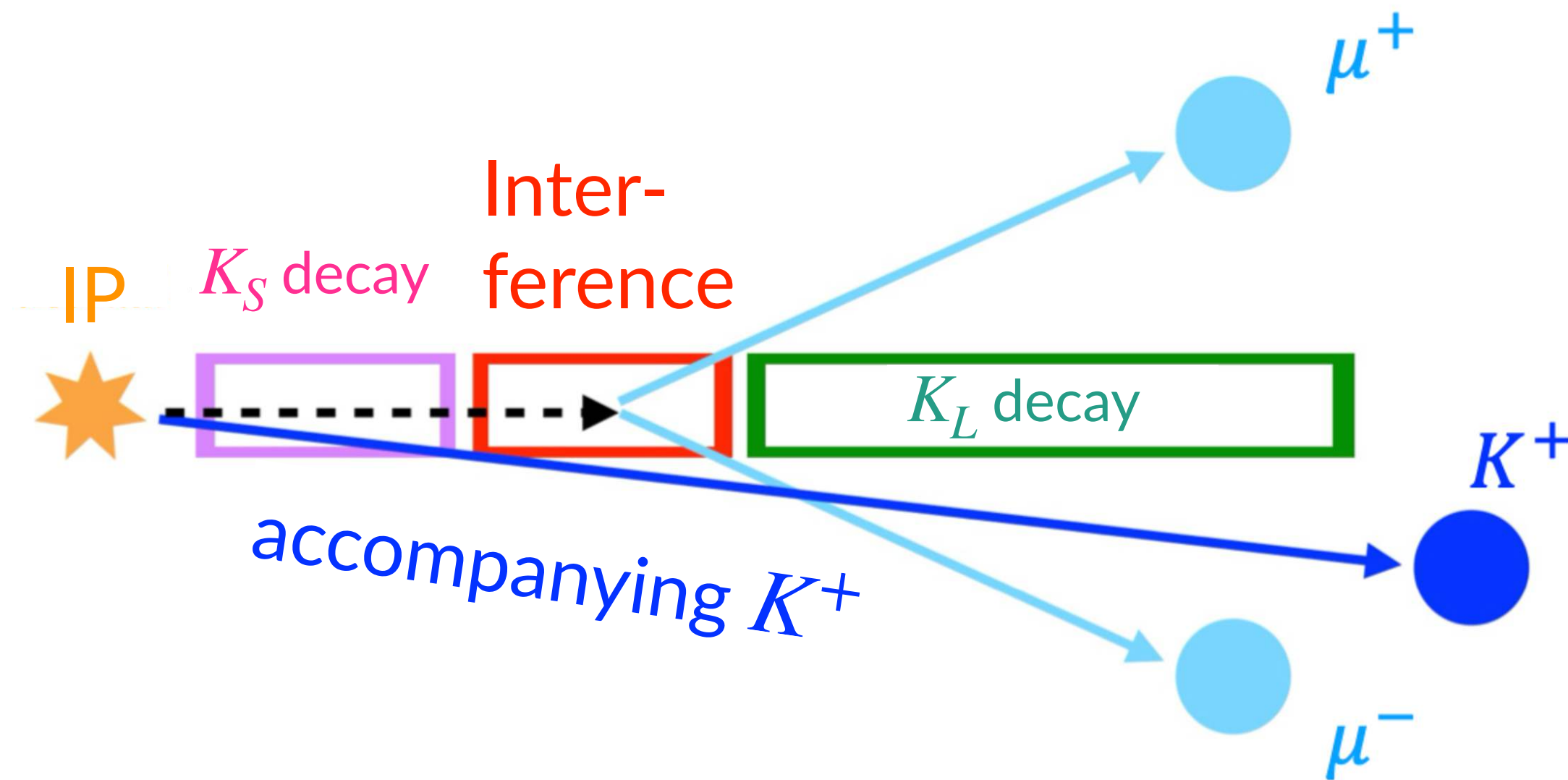
Two advantages:

1. Numerically large amplitude because of **the chiral anomaly (■)**
2. Theoretically clean due to **the optical theorem (⋮)**

$K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ interference

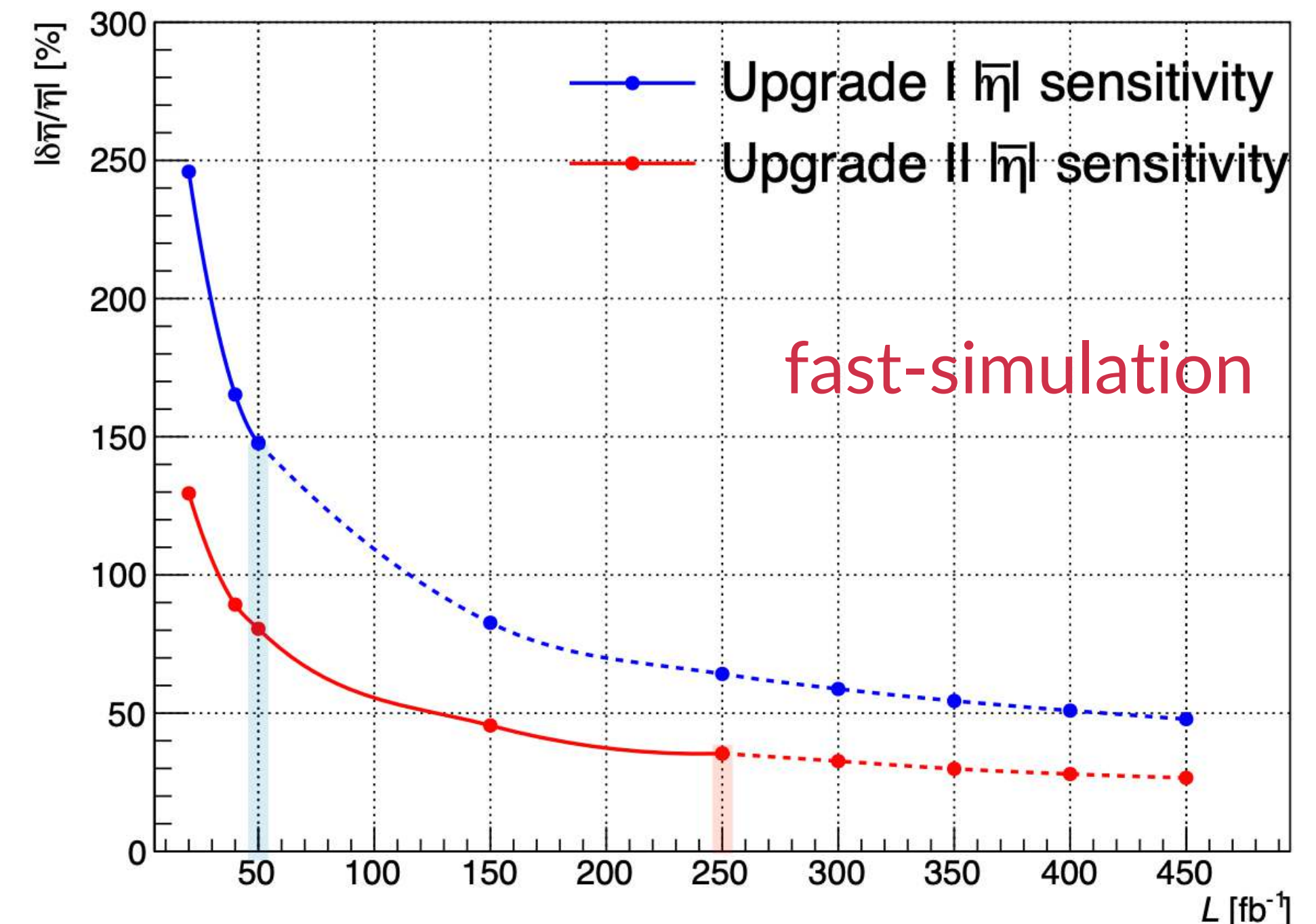
D'Ambrosio, TK, [1707.06999](#);
Dery, et al, [2104.06427](#)

- $K_L - K_S$ interference in $K_0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ provides CP asymmetry A_{CP} , which can determine $A^2 \lambda^5 |\bar{\eta}|$ with very theoretically clean way



LHCb can measure $A^2 \lambda^5 |\bar{\eta}|$ from $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ at $\sim 35\%$

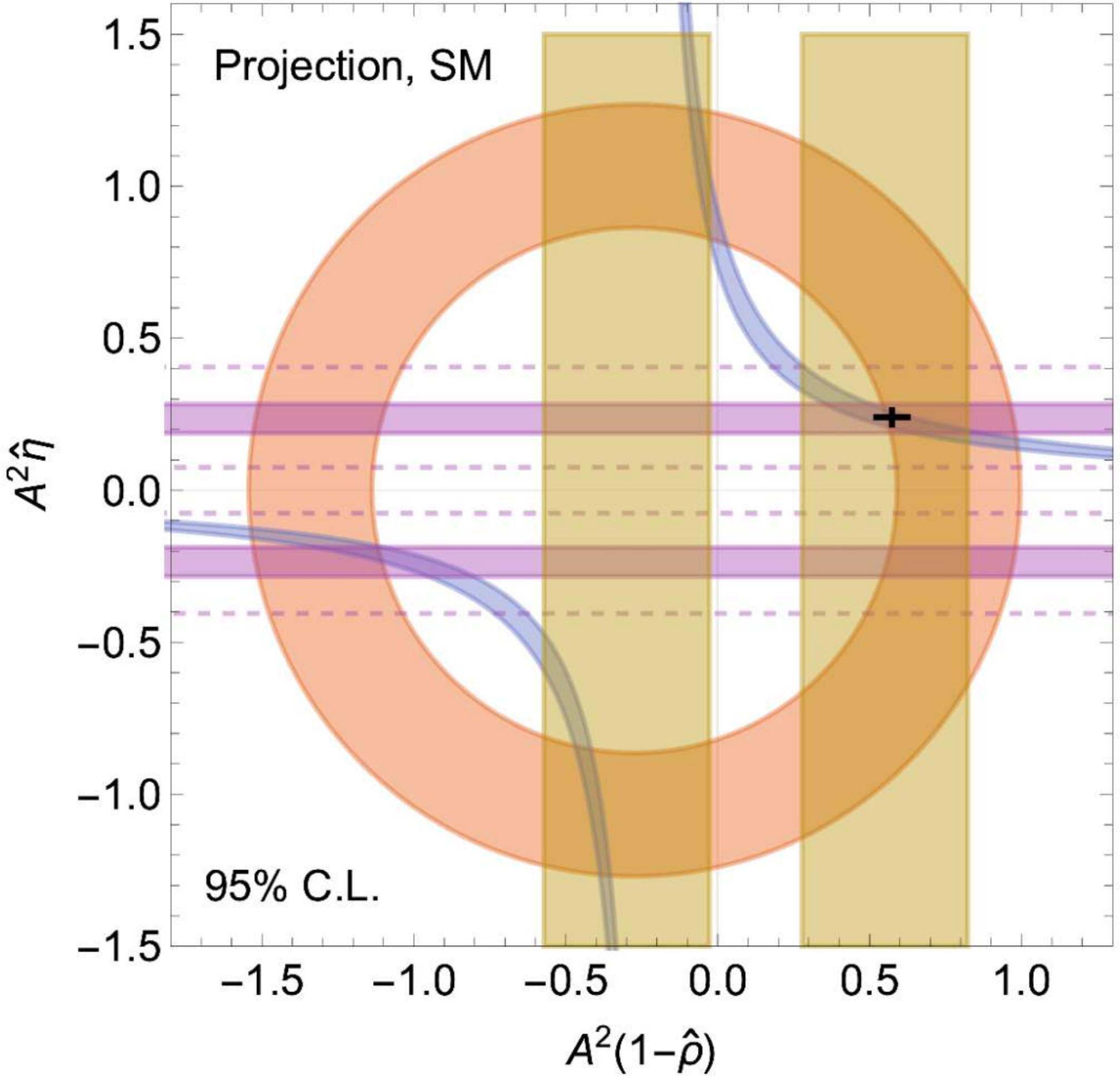
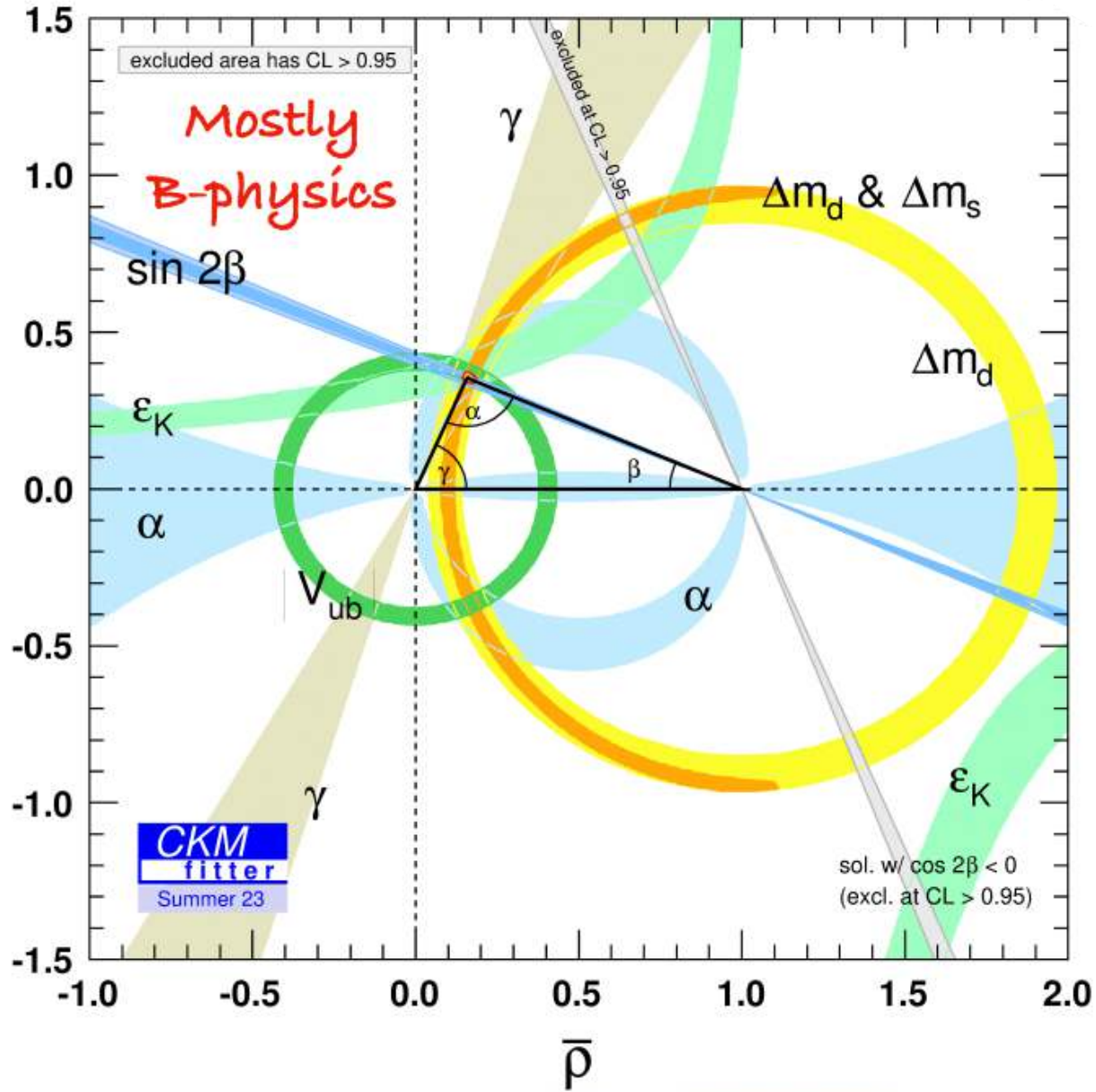
D'Ambrosio, TK, et al, [2507.13445](#)



Kaon unitarity triangle

Avital Dery [2504.12386](https://arxiv.org/abs/2504.12386)

(bd) unitarity triangle



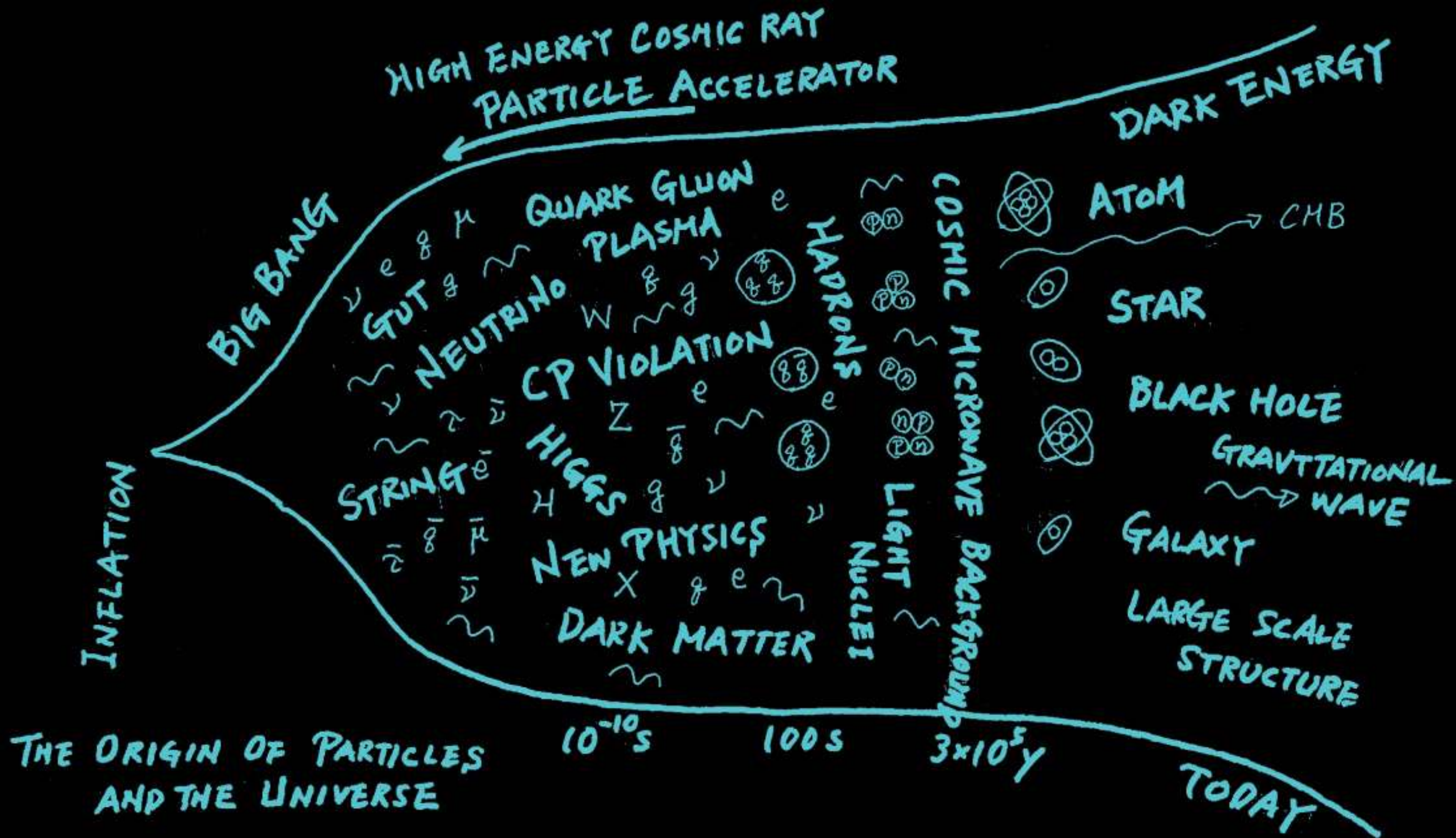
- Projected $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- ϵ_K
- $K_L \rightarrow \mu \mu$, assuming $A_{LD} > 0$
- Projected $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ at KOTOII, assuming SM
- - - Projected $A_{CP}(K^0 \rightarrow \mu \mu)$ at LHCb, assuming SM

まとめ

- 素粒子にも味（フレーバー）がある
- フレーバーの精密測定で標準模型を超える新物理を非常に精度良く探ることができる
- 実験により、奇妙なシグナル（**B中間子のレプトン普遍性の破れ**）が報告されており、新物理の兆候かもしれない
- B中間子の謎にはバリオンを用いて探索可能



Backup slides



新物理解釈

Iguro, TK, Watanabe, [2405.06062](#)

- フレーバーアノマリーはTeV レプトクォーク模型と相性が良い

	Spin	Charge	Operators	R_D	R_{D^*}	LHC	Flavor [NP signals]	
	0	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, 1/2)$	O_{S_L}	✓	✓	$b\tau\nu$	$B_c \rightarrow \tau\nu, F_L^{D^*}, P_\tau^{D^*}, M_W$	
LQ	0	$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, 1/3)$	O_{V_L}, O_{S_L}, O_T	✓	✓	$\tau\tau$	$\Delta M_s, P_\tau^D, B \rightarrow K^{(*)}\nu\nu$	
LQ	0	$(\mathbf{3}, \mathbf{2}, 7/6)$	$O_{S_L}, O_T, (O_{V_R})$	✓	✓	$b\tau\nu, \tau\tau$	$P_\tau^{D^*}, M_W, Z \rightarrow \tau\tau, d_N$	EDM
LQ	1	$(\mathbf{3}, \mathbf{1}, 2/3)$	O_{V_L}, O_{S_R}	✓	✓	$b\tau\nu, \tau\tau$	$\Delta M_s, R_{K^{(*)}}, B_s \rightarrow \tau\tau, d_N$	EDM
LQ	1	$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{2}, 5/6)$	O_{S_R}	✓	2σ	$\tau\tau$	$B_s \rightarrow \tau\tau, B_u \rightarrow \tau\nu, M_W$	

Leptoquark (LQ)

ただし、レプトクォークを含むUV理論の構築は簡単ではない

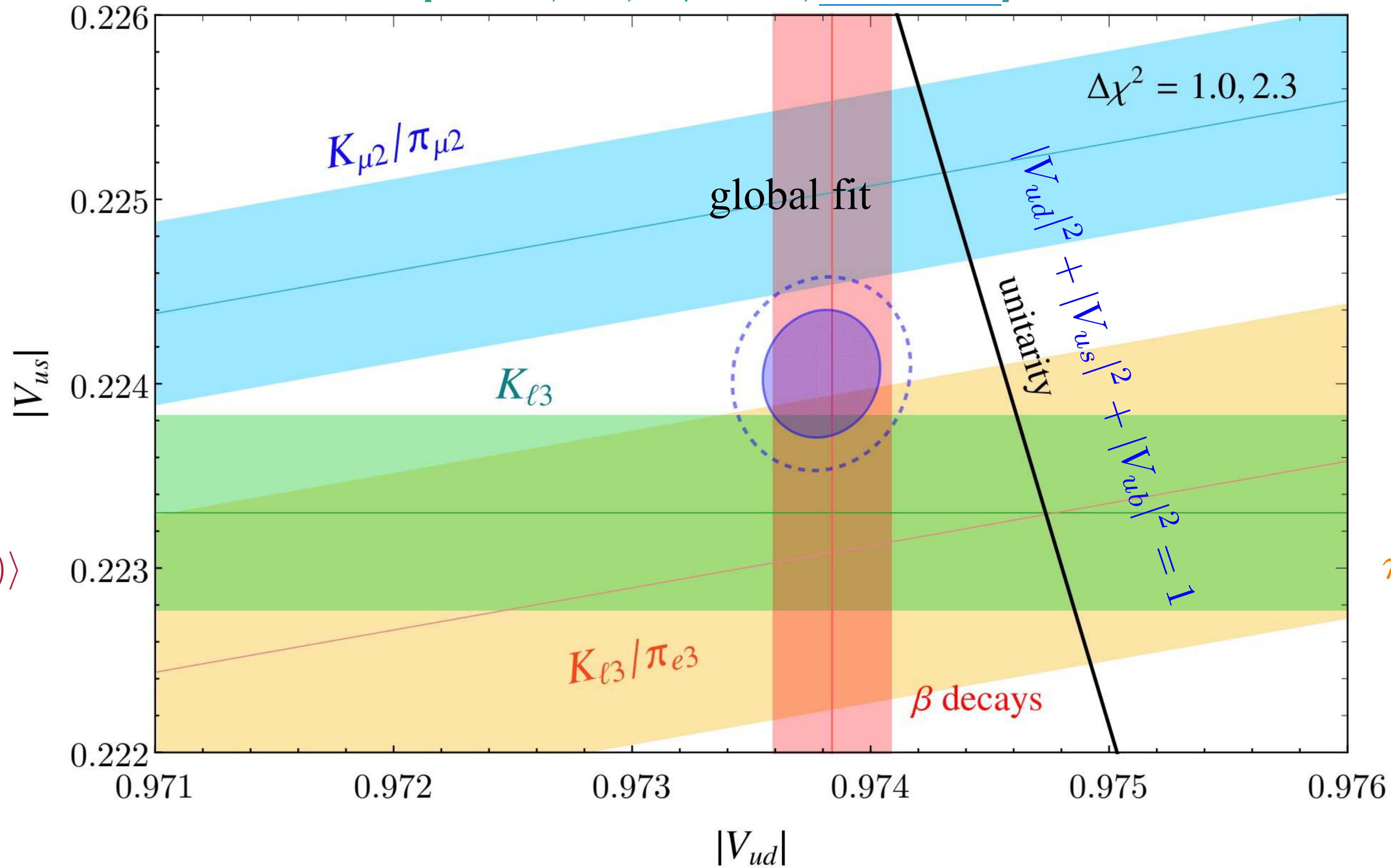
LQ vs EDM

Predicted EDMs from the B anomaly [Iguero, TK, 2307.11751](#)

	$ dn $ [ecm]	$ dp $ [ecm]	$ de $ [ecm]	comment
Vector U_1 LQ	$< 7 \times 10^{-27}$	$< 1 \times 10^{-26}$	$< 1 \times 10^{-32}$	dn and dp must be opposite sign
Scalar R_2 LQ	$\mathcal{O}(10^{-26\sim 27})$	$\mathcal{O}(10^{-26\sim 27})$	$< 4 \times 10^{-32}$	can be the same sign
Other LQs	—	—	—	no correlation
Current limit	$< 1.8 \times 10^{-26}$	$< 2.1 \times 10^{-25}$	$< 4.1 \times 10^{-30}$	
Future prospects	$\mathcal{O}(10^{-27\sim 28})$	$\mathcal{O}(10^{-29})$	$\mathcal{O}(10^{-31})$	

Global fit of $|V_{ud}|$ and $|V_{us}|$

[Crivellin, Kirk, TK, Mescia, [2212.06862](#)]



$K_{\ell 3}$
 $K_{L,S}^0 \rightarrow \pi^+ \ell \bar{\nu}$
 $K^- \rightarrow \pi^0 \ell \bar{\nu}$
 $(\ell = e, \mu)$

Error budgets:

LO: data, **FFs**

$\langle \pi(p') | \bar{s} \gamma_\mu u | K(p) \rangle$

NLO: Isospin breaking correction

$K_{\mu 2}/\pi_{\mu 2}$

$\frac{K^- \rightarrow \mu \bar{\nu}}{\pi^- \rightarrow \mu \bar{\nu}}$

Error budgets:

LO: **FFs**

$\langle 0 | \bar{s} \gamma_\mu \gamma_5 u | K(p) \rangle$

NLO: data, radiative correction

$\pi_{e 3} : \pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$

Error budgets:

LO: data

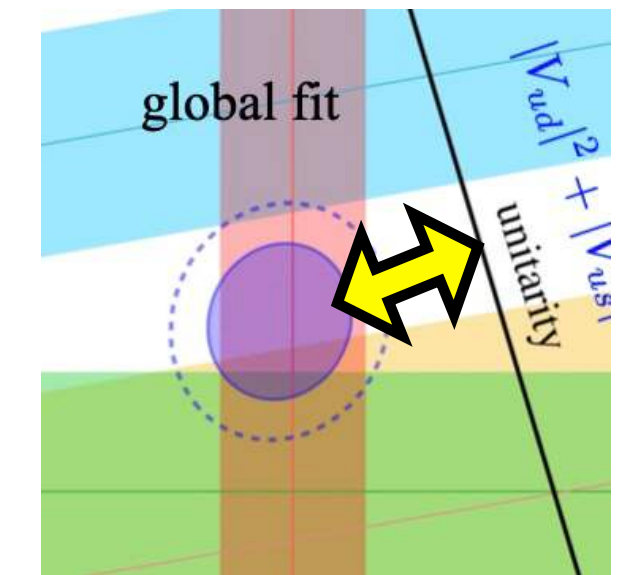
Uncertainty from

$|V_{ub}|$ is negligible

Significance of Cabibbo-Angle Anomaly (CAA)

■ Global fit (including with correlations) [Crivellin, Kirk, TK, Mescia, [2212.06862](#)]

our result $\left\{ \begin{array}{l} |V_{ud}|_{\text{global}} = 0.973\,79(25), \text{ w/ bottle UCN best} \\ |V_{us}|_{\text{global}} = 0.224\,05(35), \quad \rho(V_{ud}, V_{us}) = 0.09 \end{array} \right.$



the single most precise data $\left\{ \begin{array}{ll} \tau_n^{\text{bottle}} = 877.75(36)\text{sec} & |V_{ud}|_n^{\text{bottle}} = 0.974\,13(43) \\ \tau_n^{\text{beam}} = 887.7(2.2)\text{sec} & |V_{ud}|_n^{\text{beam}} = 0.968\,66(131) \end{array} \right.$

Long-standing 4σ inconsistency (neutron lifetime anomaly)

neutron-lifetime data dependence (bottle vs beam)

test of unitarity

$\Delta_{\text{CKM}}^{\text{global}} \equiv |V_{ud}|_{\text{global}}^2 + |V_{us}|_{\text{global}}^2 + |V_{ub}|^2 - 1 = \left\{ \begin{array}{l} -1.51(53) \times 10^{-3} \text{ (w/ bottle UCN best),} \\ -2.34(62) \times 10^{-3} \text{ (w/ in-beam best),} \end{array} \right.$

-2.8σ (UCN) and -3.8σ level (in-beam) deviations from SM [TK, Tobioka, [2308.13003](#)]