

ミューオンとタウレプトンで超える 標準模型の壁（タウ編）

～超えない話もさせてほしい…～

早坂 圭司（新潟大学）

タウレプトン

- › 荷電レプトン = 電子の仲間
- › 3つ目の荷電レプトン
 - triton (third) = τριτωνの頭文字
- › 最も重いレプトン
 - πよりも重い (ミュオンはπより軽い)
 - = πを含む崩壊が可能

→多様な崩壊モード

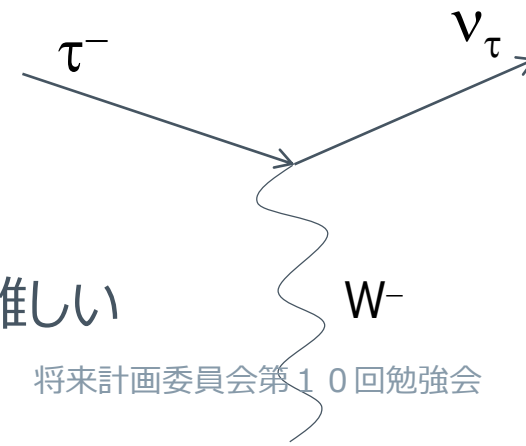
- › 崩壊は速い

$2.9 \times 10^{-13} \text{s}$ ($\mu: 2.2 \times 10^{-6} \text{s}$)

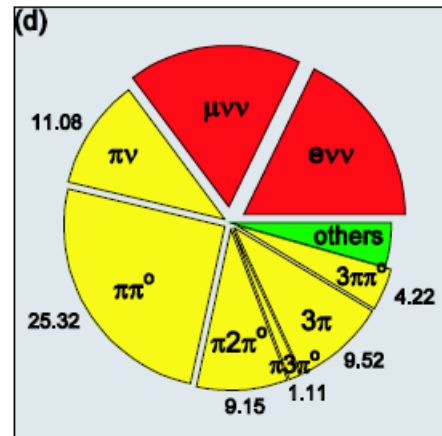
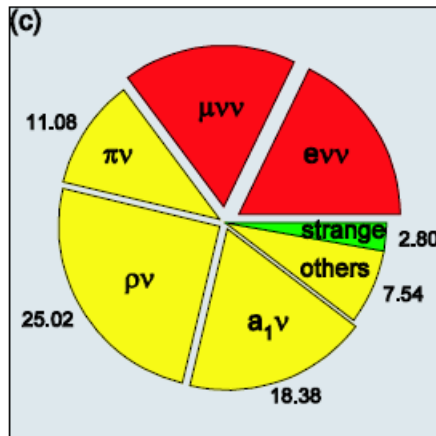
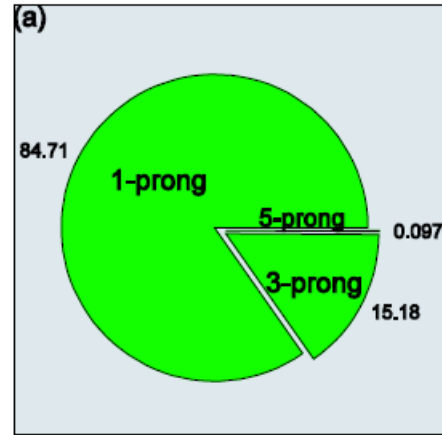
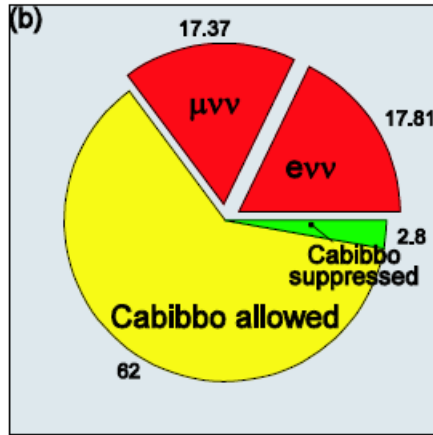
- › 弱い相互作用で崩壊
 - 崩壊モードは多彩 (ミュオンはせいぜい3種類)
 - 崩壊後 ニュートリノ が必ずある → 再構成が難しい

FERMIONS		
Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

<http://CPEPweb.org>



タウの崩壊



- i) leptonic 崩壊は 35%
 → 65%はニュートリノ 1個
 35%はニュートリノ 2個
- ii) 85%は1prong (charged track 1本) 1+3 prongで、99.9%
- iii) $\Delta S=1$ は3%以下
- iv) π^0 (=gamma 2本) 1つ以上、含む崩壊は~40%

タウの作り方とID

› 電子・陽電子散乱による対生成

- $\tau^+\tau^-$ ができる → 実際は $\tau^+\tau^-\gamma$ (ISR) も含む
- もう1つの τ と合わせてタウレプトン対事象としてID
 - › 欠損運動量、ハドロン+レプトン/ミューオン+電子

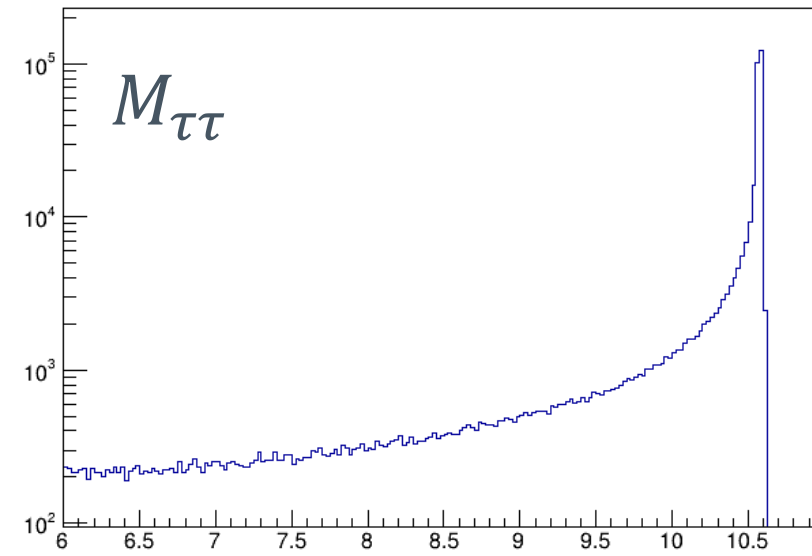
→ B factory (Belle/Belle II), tau-charm factory, ILC(?)

(BES IIIはタウレプトン質量測定以外はあきらめた？

<https://arxiv.org/pdf/1912.05983.pdf>)

› D_s 等の崩壊中に現れる τ

- LHCやfixed targetの実験
- IDはmassが完全に組めるneutrinoless LFV decay以外は難しそう



以下 Belle/Belle IIの
セットアップ
※ $\Upsilon(4S)$ 以外でも生成

τ 対事象の方向が決まらない…？

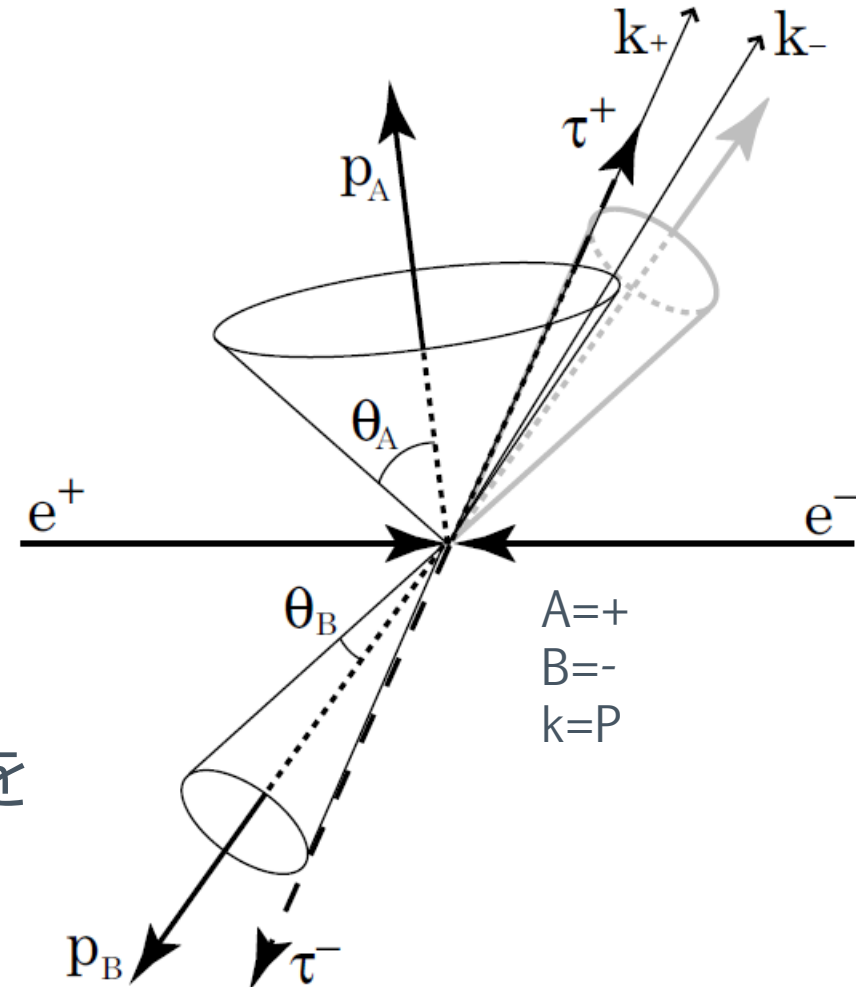
τ がハドロン崩壊しているとき

親 τ と娘 d との運動量の開き角は

$$\cos\theta_{\pm} = \frac{2E_{\tau}E_{d\pm} - M_{\tau}^2 - m_{d\pm}^2}{2P_{\tau}p_{d\pm}}$$

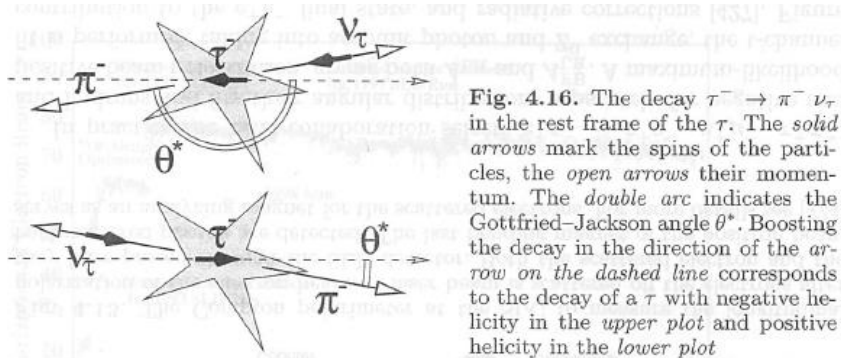
e^+e^- の重心系においては、
 τ^+ or τ^- のエネルギーは e^+ or e^- に等しい。従って、 τ の運動量の大きさも計算可能。
子供の運動量は測定可能。
片方はニュートリノ。

τ^+ と τ^- が back-to-back の関係を使うと少なくとも 2 方向まで絞ることが可能



τ の崩壊とhelicity

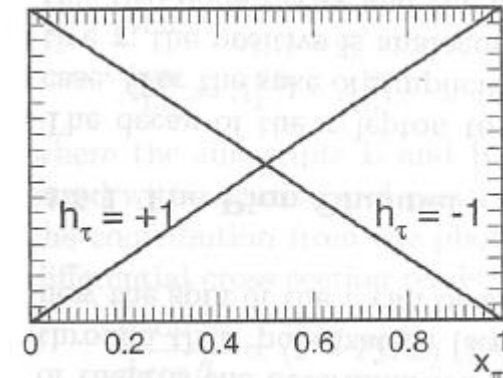
最も簡単な $\tau \rightarrow \pi \nu$ 崩壊



$$\frac{d\Gamma}{d \cos \theta^*} \propto \frac{1}{2} (1 + h_\tau \cos \theta^*).$$

逆に言うと τ のヘリシティはこの手の分布を通して見ることができる。

h_τ :ヘリシティ、 $x_\pi = E_\pi / E_{\text{beam}}$



$$\frac{d\Gamma}{dx_\pi} \propto 1 + h_\tau (2x_\pi - 1).$$

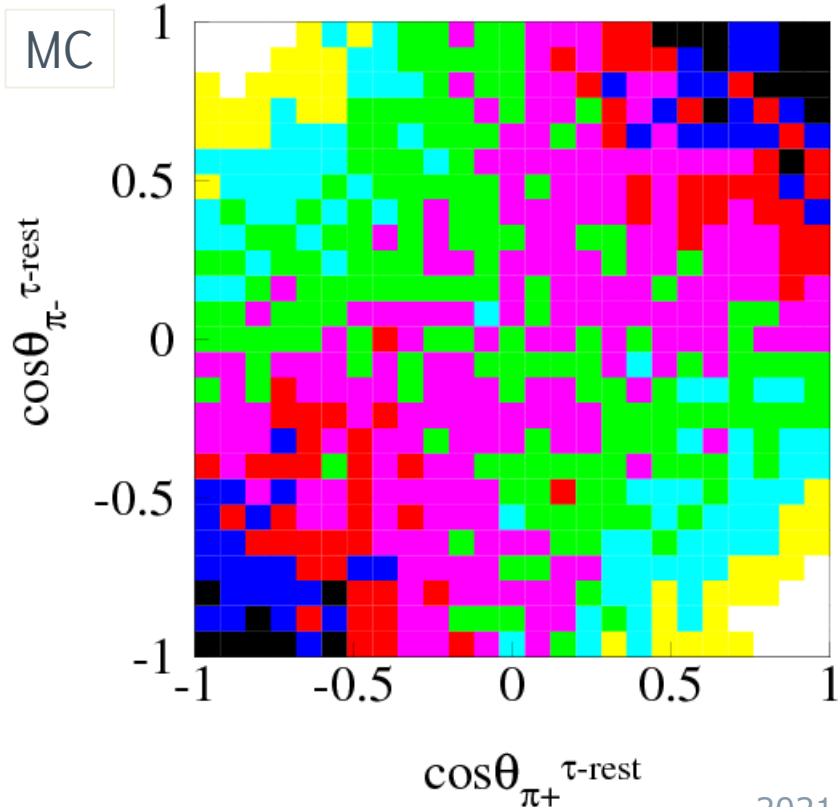
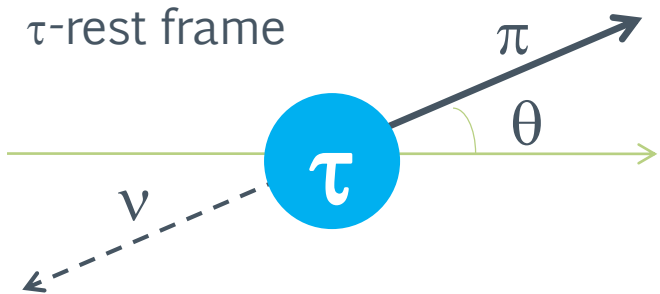
五分五分で混ざっていると
ただの平らな分布

A.Shtal: Physics with Tau Leptons
ISBN: 978-3-540-66267-9 (Print)
978-3-540-48458-5 (Online)

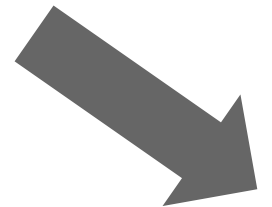
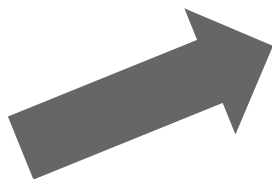
τ

$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu / \tau^+ \rightarrow \pi^+ \nu$ helicity angle

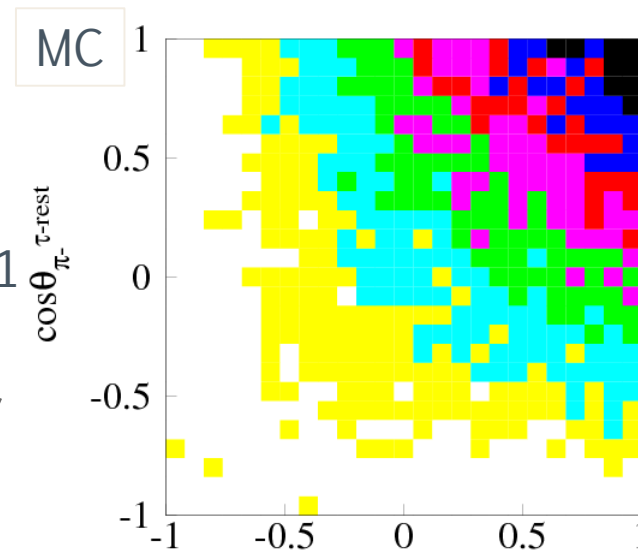
$$\frac{d\Gamma}{dx_\pi} \propto 1 + h_\tau (2x_\pi - 1).$$



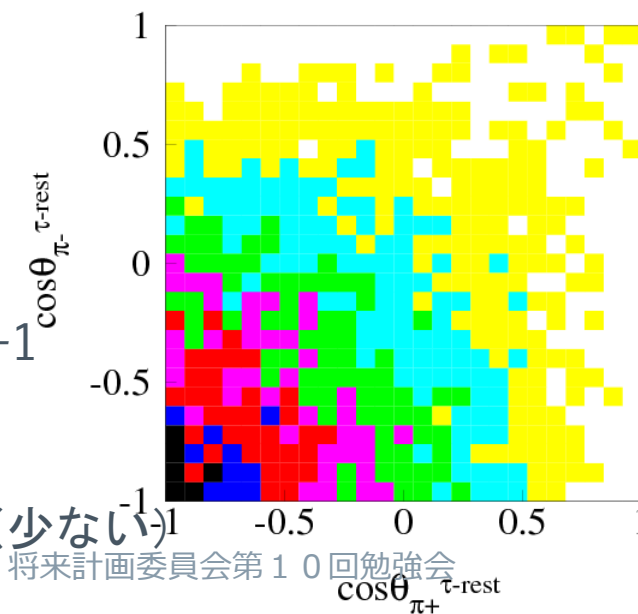
hel. of $\tau^- = 1$



hel. of $\tau^- = -1$



同様な
関係が
 x_π にも
ある。



x_π は
測定可

黒 (多い) \Leftrightarrow 白 (少ない)

タウレプトンで超える標準模型の壁

- › 標準模型には無い系
 - Tau Lepton Flavor Violation
 - CPV, EDM
- › 標準模型からずれる系（＝標準模型の精密検証）
 - Lepton Universality
 - Michel parameter (Lorentz Structure)
 - V_{us}
- › 壁を超えない研究テーマも…
 - 質量、寿命の測定
 - クリーンなハドロン物理研究環境: a_1, K_1, CVC, \dots
 - Isospinの破れ: Second class current search

Tau Lepton Flavor Violating decays

一番注目度が高い



Tau LFVのイントロ

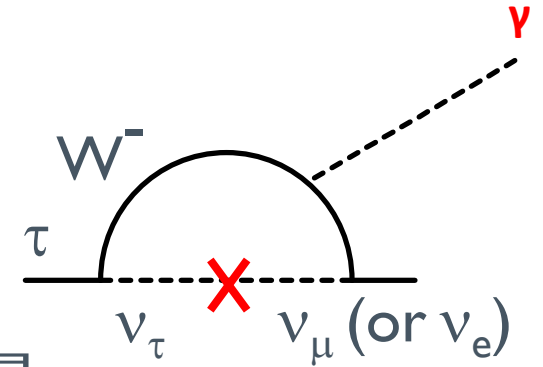
› (もう見飽きてるとは思いますが…)

› 標準模型ではレプトンフレーバは保存

→何かに裏打ちされた保存量ではない (経験則)

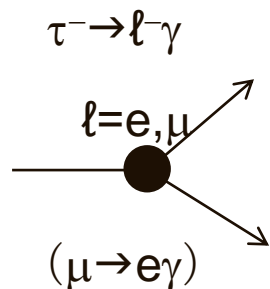
⇒ニュートリノ振動が発見されてるので疑似的な保存量

☆ただ、ニュートリノ振動が起源では実験的にはほとんど発見不可能

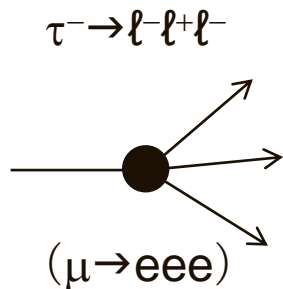


$$Br(\tau \rightarrow \ell \gamma)_{SM} \propto \left(\frac{\delta m_\nu^2}{m_W^2} \right)^2 \sim 10^{-40} \quad (\text{EPJC8 513(1999)})$$

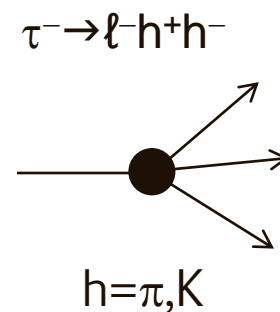
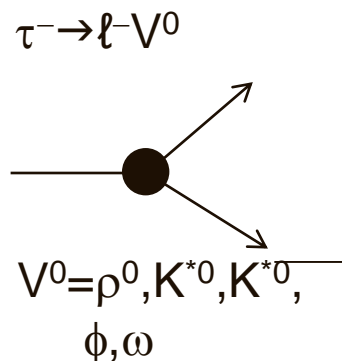
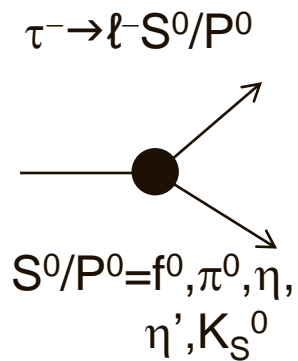
実験による発見は標準模型を超えた物理(BSM)の存在を示唆

τ LFVでは、どんなモードが考えられる？

一番あり得そうなモード



一番解析が楽なモード



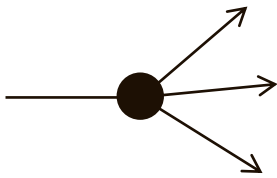
($\mu \rightarrow e$ conversion)

さらには...

μ LFV では考えられないような「ゲテモノ」も

$$\tau^- \rightarrow e^+ \mu^- \mu^-,$$

$$\mu^+ e^- e^-$$

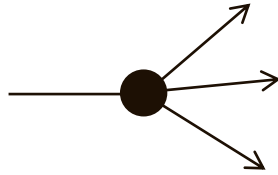


doubly LFV decay

total LF variation: 4

($\Delta(\tau \text{ number}):1, \Delta(\mu \text{ number}):2, \Delta(e \text{ number}):1$)

$$\tau^- \rightarrow \ell^+ h^- h^- \quad (h=\pi, K)$$

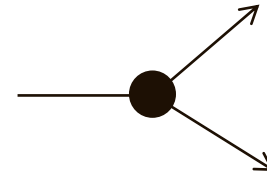


LNV decay

LNV:

lepton number violation

$$\tau \rightarrow h \Lambda / \bar{\Lambda} \quad (h=\pi, K)$$



LNV&BNV decay

BNV: Baryon number violation

τ

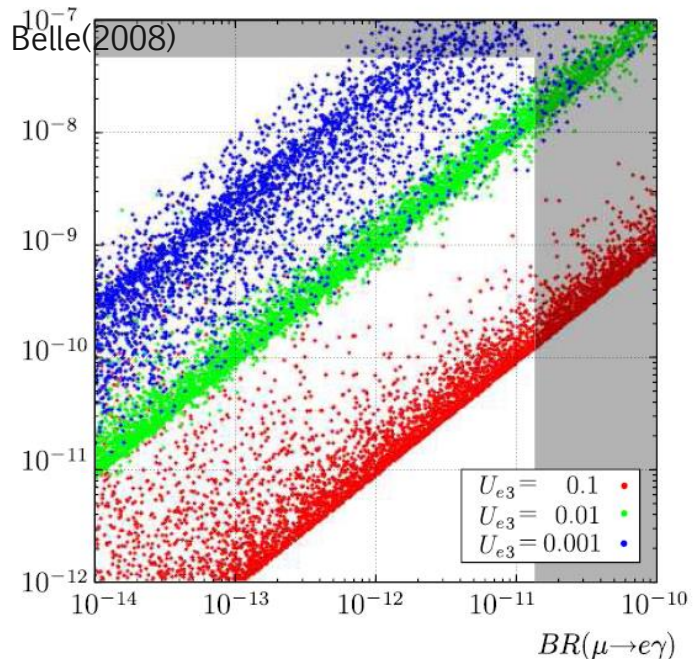
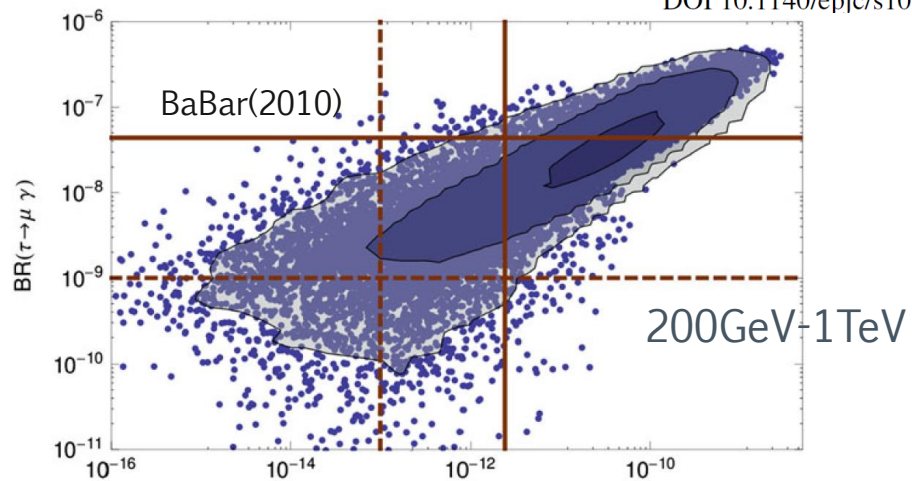
$\tau \rightarrow \mu \gamma$ の予言

Gianluca Blankenburg^{1,2}, Gino Isidori^{2,3,a}, Joel Jones-Pérez² SUSY SU(5) GUT

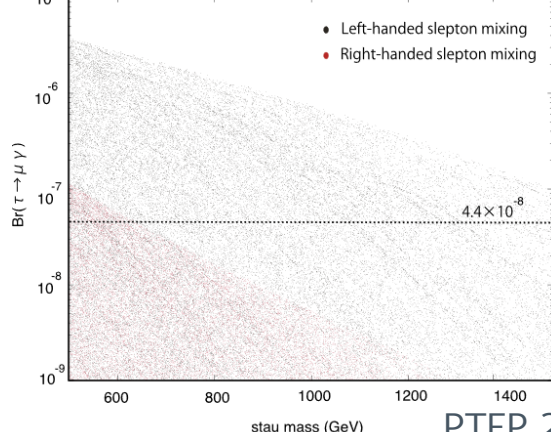
$U(3)^5$ flavor symmetry

MEG(2011) Eur. Phys. J. C (2012) 72:2126
DOI 10.1140/epjc/s10052-012-2126-7

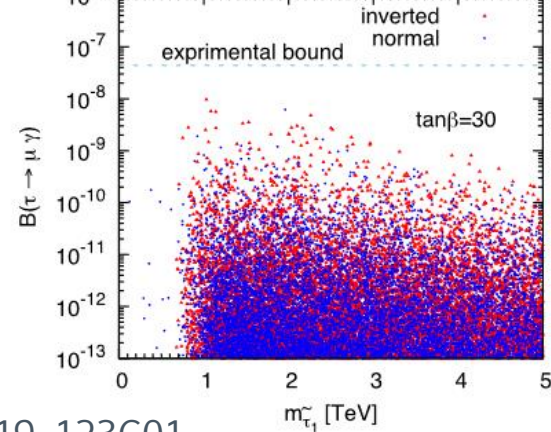
$BR(\tau \rightarrow \mu \gamma)$ MEGA(2002,1999)



Non-minimal SUSY SM



SUSY seesaw



$m_0, M_{1/2} < 1 \text{ TeV}, |A_0| < 3m_0, 3 < \tan \beta < 50$ and $\mu > 0$.

Junji Hisano et al JHEP12(2009)030 doi:10.1088/1126-6708/2009/12/030

- MEG(2011)= Phys. Rev. Lett. 107, 171801 (2011)
- MEGA(2002)= Phys.Rev. D65, 112002 (2002)
- MEGA(1999)= Phys.Rev.Lett. 83, 1521 (1999)
- Belle(2008)= Phys. Lett. B666,16(2008)
- BaBar(2010)=Phys. Rev. Lett. 104, 021802 (2010)

τ

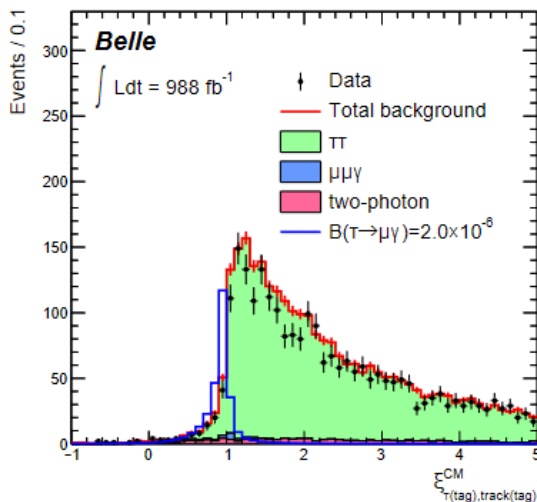
最近 $\tau \rightarrow \mu\gamma/e\gamma$ のBelleの結果が出ました

› $988\text{fb}^{-1} / N_{\tau\tau} = 9.12 \times 10^8$ ($\Upsilon(1S, 2S, 3S, 4S, 5S)\dots$)

※主なBGはSM崩壊の $\tau \rightarrow \mu\nu\nu/e\nu\nu$ にextra γ が加わったもの
→extra γ の起源の9割はISR, 残りはBeamBG

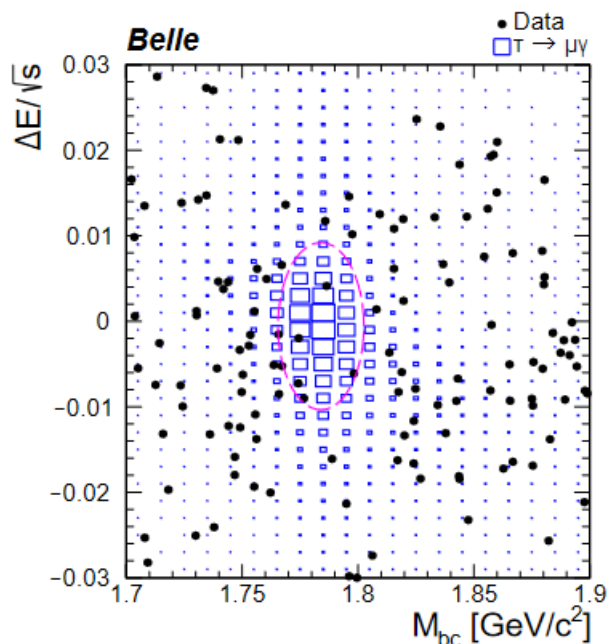
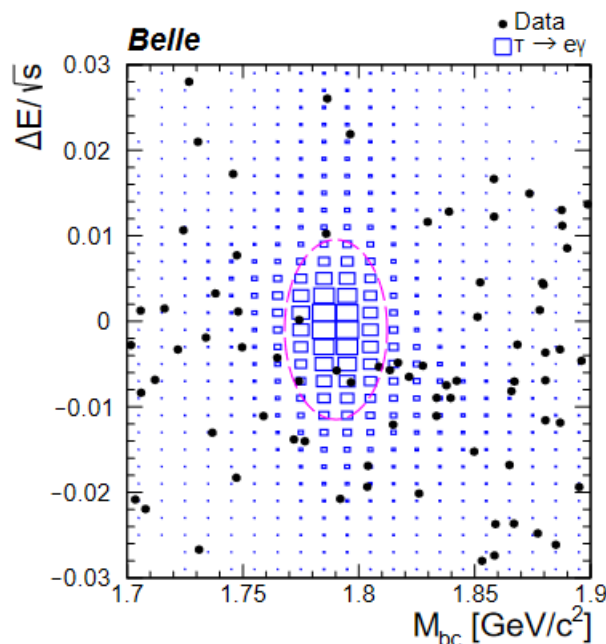
Targetの分岐比が $O(10^{-8})$ に対して $\text{BF}(\tau \rightarrow \ell \nu\nu) \sim 17\%$

KinematicalにISRが出ている事象を落とせないか？



新しい量：信号なら反対側の τ とその娘の開き角の \cos になる量。ただし、エネルギー運動量保存則をこねくりまわしてビーム重心系で2つの τ がBack-to-backになってないと矛盾する量→ISRがあると矛盾

結果

(a) $\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma$ 今回(988fb⁻¹)(b) $\tau^\pm \rightarrow e^\pm \gamma$ Belle(535fb⁻¹)BaBar(516fb⁻¹)

探索感度は
 ルミノシティの比の
 平方根よりは伸びている
 結果としては
 $\tau \rightarrow \mu \gamma$ に世界で最も強い
 制限を与えた

	expected	observed	expected	observed	expected	observed
$\tau \rightarrow \mu \gamma$	4.9	4.2	8.0	4.5	8.2	4.4
$\tau \rightarrow e \gamma$	6.4	5.6	12	12	9.8	3.3

Belle IIでは…

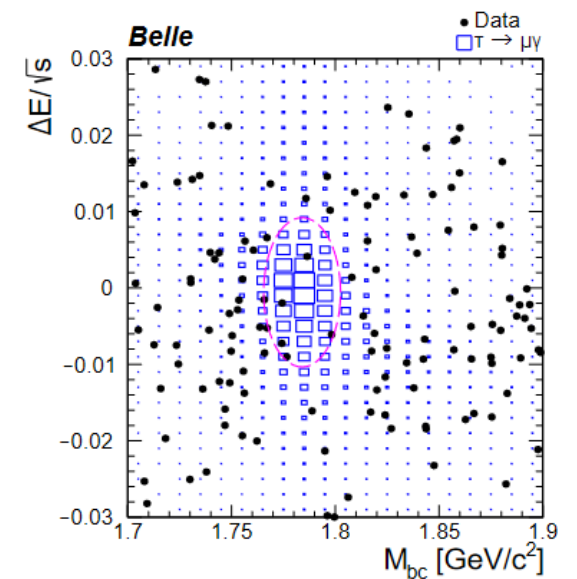
- › 50ab^{-1} (Belle の50倍) 収集予定
- › 「extra γ の起源の9割はISR, 残りはBeamBG」

BeamBGの割合が増える可能性が大

ISRももっと削る必要あり

Bhabha veto triggerが賢くなったので、 $e\gamma$ の方が低かった検出効率は改善されると期待

※ Belle II内ではいろいろアイデアが出ていて有効そうなカットも…



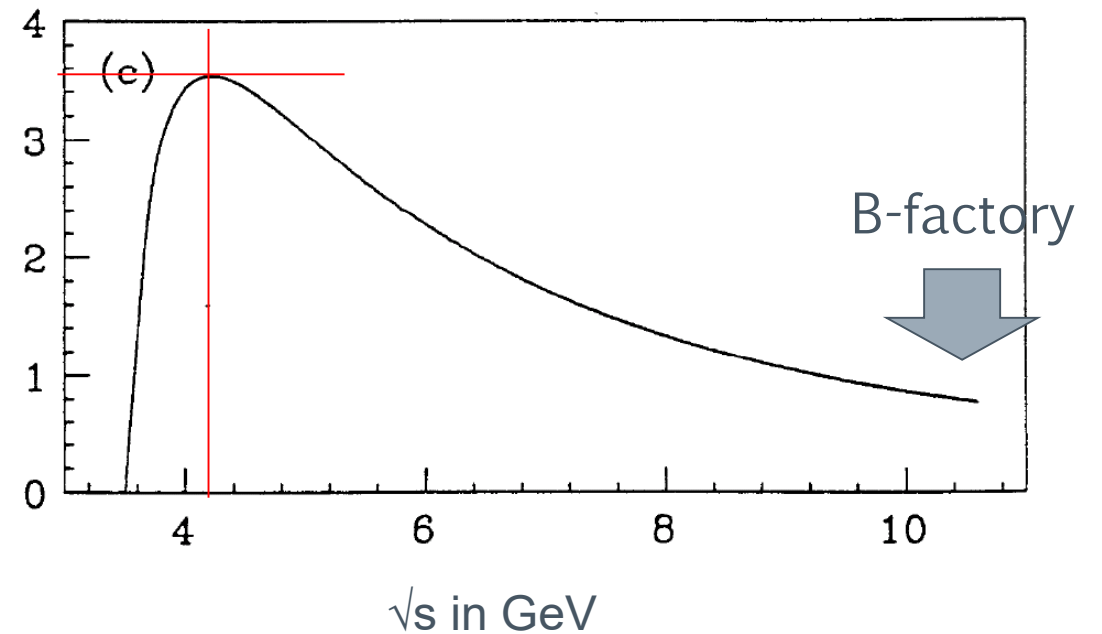
これが50倍

さらなるアイデアとして低いエネルギーでの運転

- › 3.6GeV 以上あればタウレプトン対は生成される。
- › 断面積が最大になるのは 4.25GeV ($\sigma(Y(4s)) \times 4$)

ISRがBGになるなら

ISRの出ない低エネルギーで
運転すればいいじゃない。



A.Stahl: tau physics near threshold

[Int.J.Mod.Phys.A 21 \(2006\) 5667-5674](#)

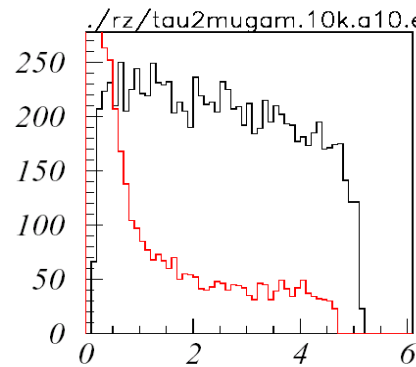
ISR エネルギー分布

重心系で見た γ のエネルギー(黒)と

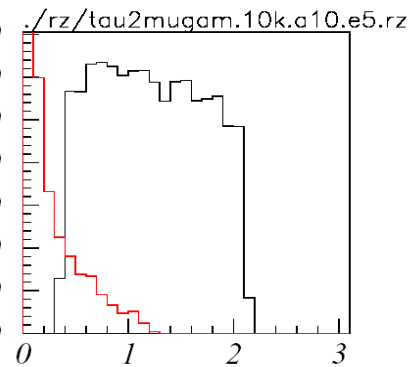
$\tau \rightarrow \mu \nu \nu$ BGのISR γ のエネルギー(赤)

$Y(4s)$

$\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$



mu gam: Plab gam (gen)

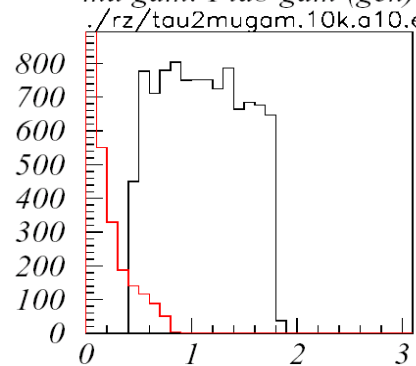


mu gam: Plab gam (gen)

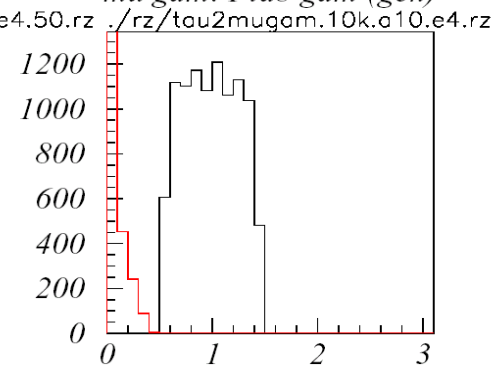
$\sqrt{s} = 5.0 \text{ GeV}$

maximum σ

$\sqrt{s} = 4.5 \text{ GeV}$



mu gam: Plab gam (gen)



mu gam: Plab gam (gen)

$\sqrt{s} = 4.0 \text{ GeV}$

4.0 GeVなら
完全に分け
られてる。
4.5 GeVでも
Purityよさそう

後は加速器がどれくらいルミノシティ出せるか

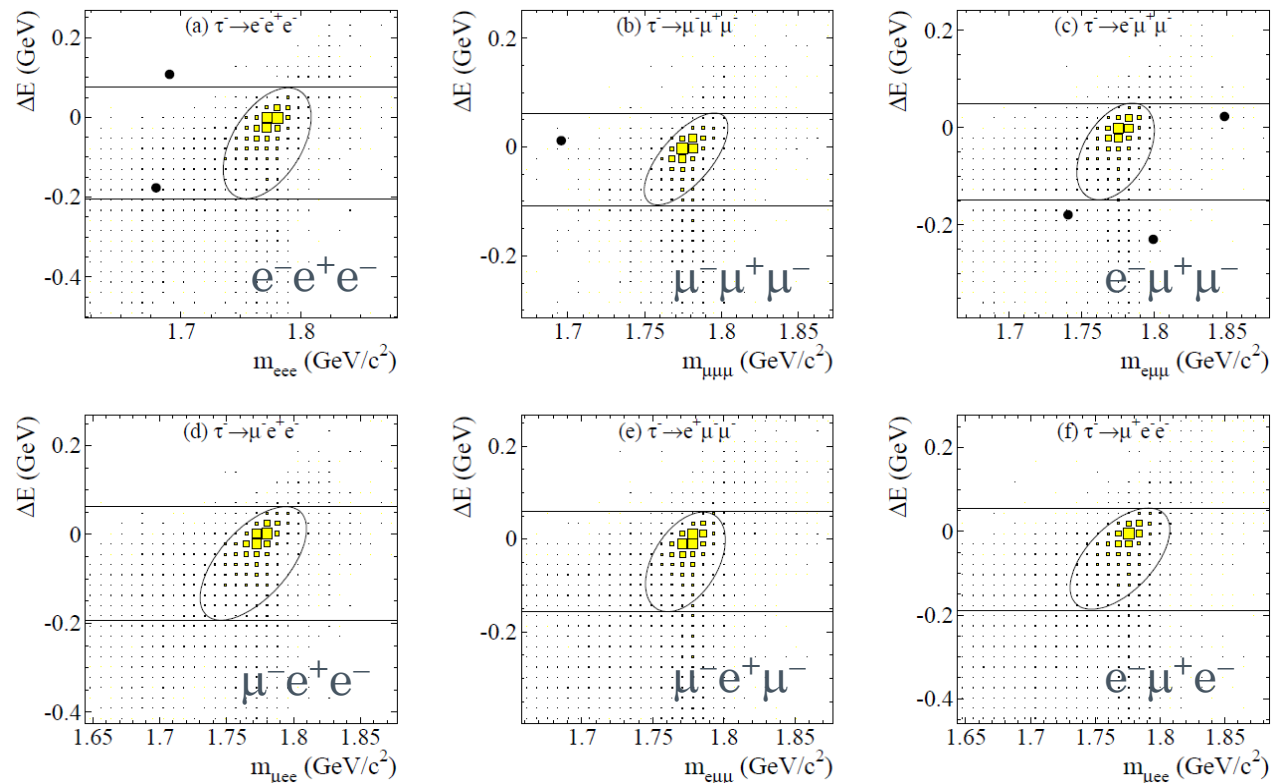
一方 $\tau \rightarrow \ell \ell' \ell''$

› 782fb⁻¹のBelleの結果

☺相当キレイ

この解析では使わなかったが
有効なカットもまだある。

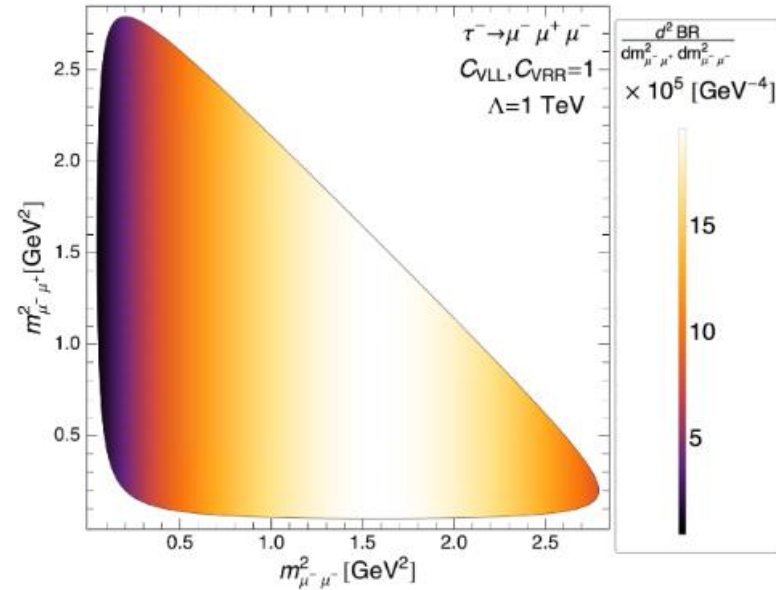
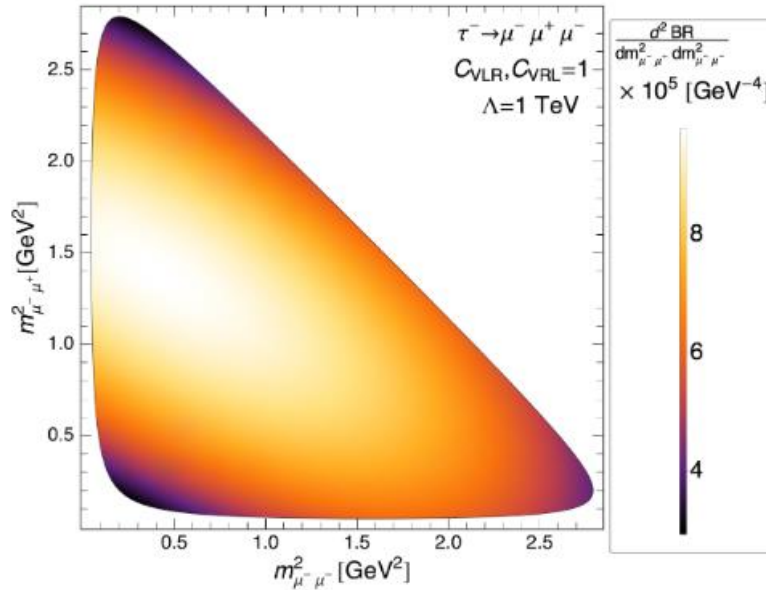
Belle IIでも感度高く解析可能



Mode	ε (%)	N_{BG}^{EXP}	σ_{syst} (%)	UL ($\times 10^{-8}$)
$e^-e^+e^-$	6.0	0.21 ± 0.15	9.8	2.7
$\mu^- \mu^+ \mu^-$	7.6	0.13 ± 0.06	7.4	2.1
$e^- \mu^+ \mu^-$	6.1	0.10 ± 0.04	9.5	2.7
$\mu^- e^+ e^-$	9.3	0.04 ± 0.04	7.8	1.8
$\mu^- e^+ \mu^-$	10.1	0.02 ± 0.02	7.6	1.7
$e^- \mu^+ e^-$	11.5	0.01 ± 0.01	7.7	1.5

τ → μμμの寄与の仕方と区別

3つμがあるのでDalitz analysisが可能



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{eff}}^{(4\ell)} = & -\frac{1}{\Lambda^2} \{ C_{\text{SLL}} (\bar{\mu} P_L \tau) (\bar{\mu} P_L \mu) + C_{\text{SRR}} (\bar{\mu} P_R \tau) (\bar{\mu} P_R \mu) \\
 & + C_{\text{VLL}} (\bar{\mu} \gamma^\mu P_L \tau) (\bar{\mu} \gamma_\mu P_L \mu) \\
 & + C_{\text{VRR}} (\bar{\mu} \gamma^\mu P_R \tau) (\bar{\mu} \gamma_\mu P_R \mu) \\
 & + C_{\text{VLR}} (\bar{\mu} \gamma^\mu P_L \tau) (\bar{\mu} \gamma_\mu P_R \mu) \\
 & + C_{\text{VRL}} (\bar{\mu} \gamma^\mu P_R \tau) (\bar{\mu} \gamma_\mu P_L \mu) + \text{H.c.} \}. \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

10個くらいあれば区別つきそう (?)
 (50ab⁻¹で、検出効率7%, Br=2x10⁻⁹で10個)
 PHYSICAL REVIEW D **89**, 095014 (2014)

Model-discriminating power of lepton flavor violating τ decays

ILCで有利かも？

Z. Phys. C 68, 25–28 (1995)

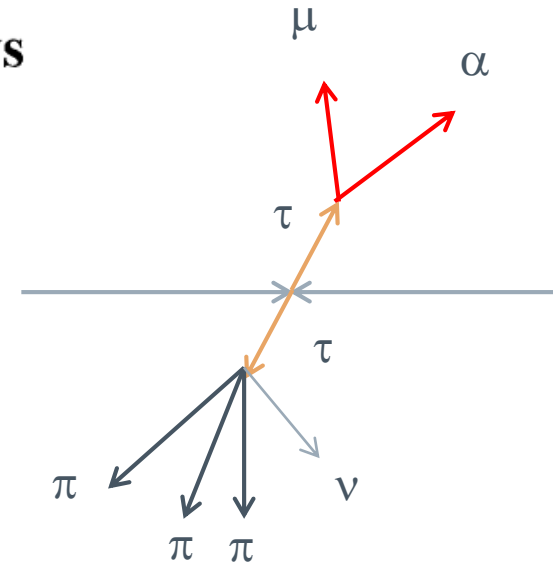
A search for the lepton-flavour violating decays

$$\tau \rightarrow e\alpha, \tau \rightarrow \mu\alpha$$

ARGUS Collaboration

472 pb^{-1}

α は検出器内では崩壊しない未知の中性粒子
 τ 静止系ではレプトンの運動量がモノクロマティックになることを利用して信号をextract
でも τ の静止系は作れない...



$\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$ を利用

なんで 3πν decay なの？

- 普通に考えると π の質量は140MeV なので、3つ π を持ってきても だいたい420MeVで τ の質量には遠く及ばない。
- でも実は τ → 3 π ν 崩壊はほぼ τ → a₁ ν からきている。

a₁(1260) $I^G(J^{PC}) = 1^-(1^{++})$

See also our review under the a₁(1260) in PDG 06, Journal of Physics G33 1 (2006).

a ₁ (1260) MASS	1230 ± 40 MeV
a ₁ (1260) WIDTH	250 to 600 MeV
D-wave/S-wave AMPLITUDE RATIO IN DECAY OF a ₁ (1260) → ρπ	-0.062 ± 0.020 (S = 2.3)

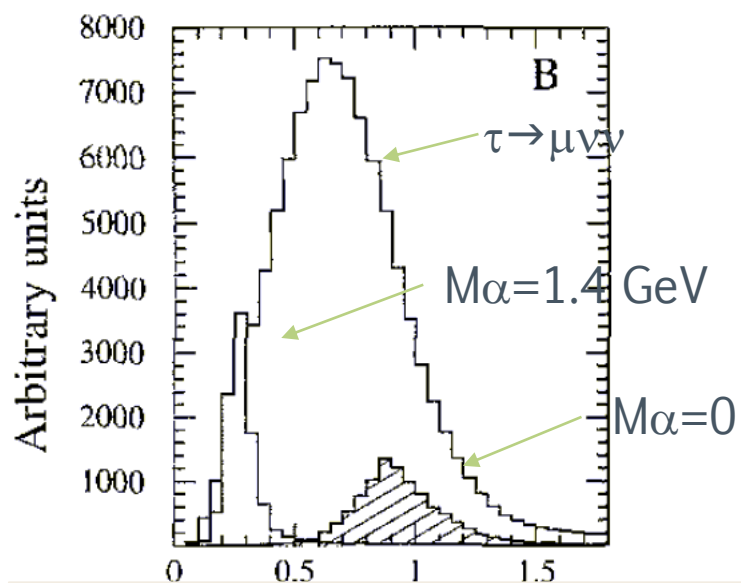
Decay Modes

Mode	Fraction (Γ _i / Γ)	Scale Factor/ Conf. Level	P (MeV/c)
Γ ₁ π ⁺ π ⁻ π ⁰			576
Γ ₂ π ⁰ π ⁰ π ⁰			577

- a₁ の質量はほぼ 1.2 GeVなのでタウの質量の 70%程度。これなら a₁ の向きはほぼタウの向きだと思って差し支えないのではないか？くわえてBr(τ→πππν) は結構大きい (~10%)

信号と背景事象

› 主な背景事象は $\tau \rightarrow \mu \nu \nu$. ($\nu \nu$ もやっぱり見えない)



μ の運動量 (「擬」タウ静止系)

p_{lab} [GeV/c]

2021/5/31

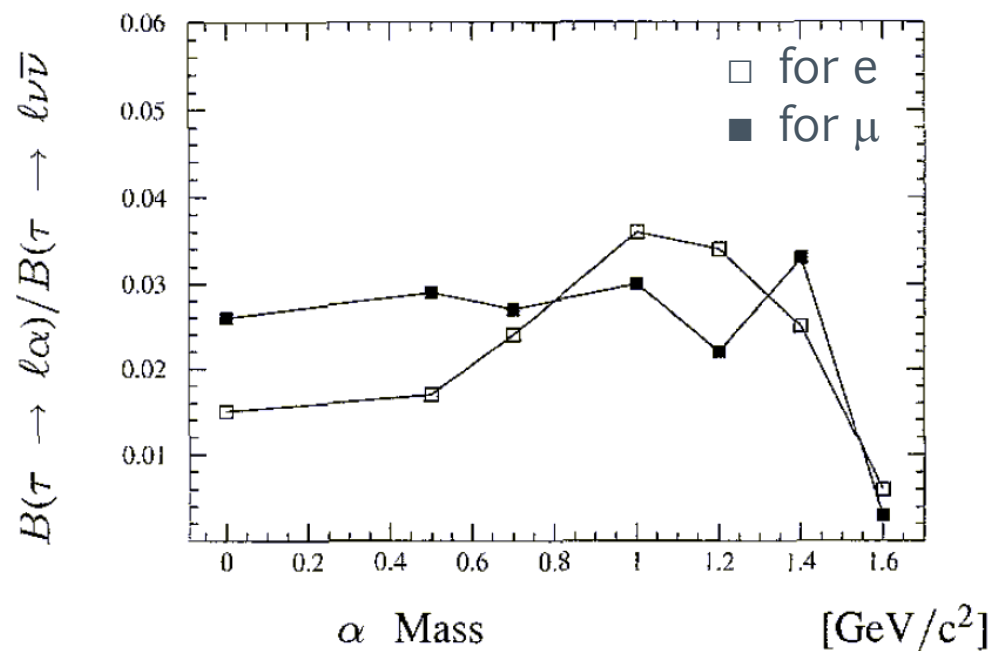
向きを a_1 , エネルギーを \sqrt{s} から決めた
4元運動量を τ の運動量として、

(反対側の τ の4元運動量を求めて)

τ 静止系でレプトンの運動量を求める。
タウの4元運動量の再現が不完全な分
分布に広がりができる。

→高エネルギーなら狭くなって
感度がよくなる? = ILC向き?

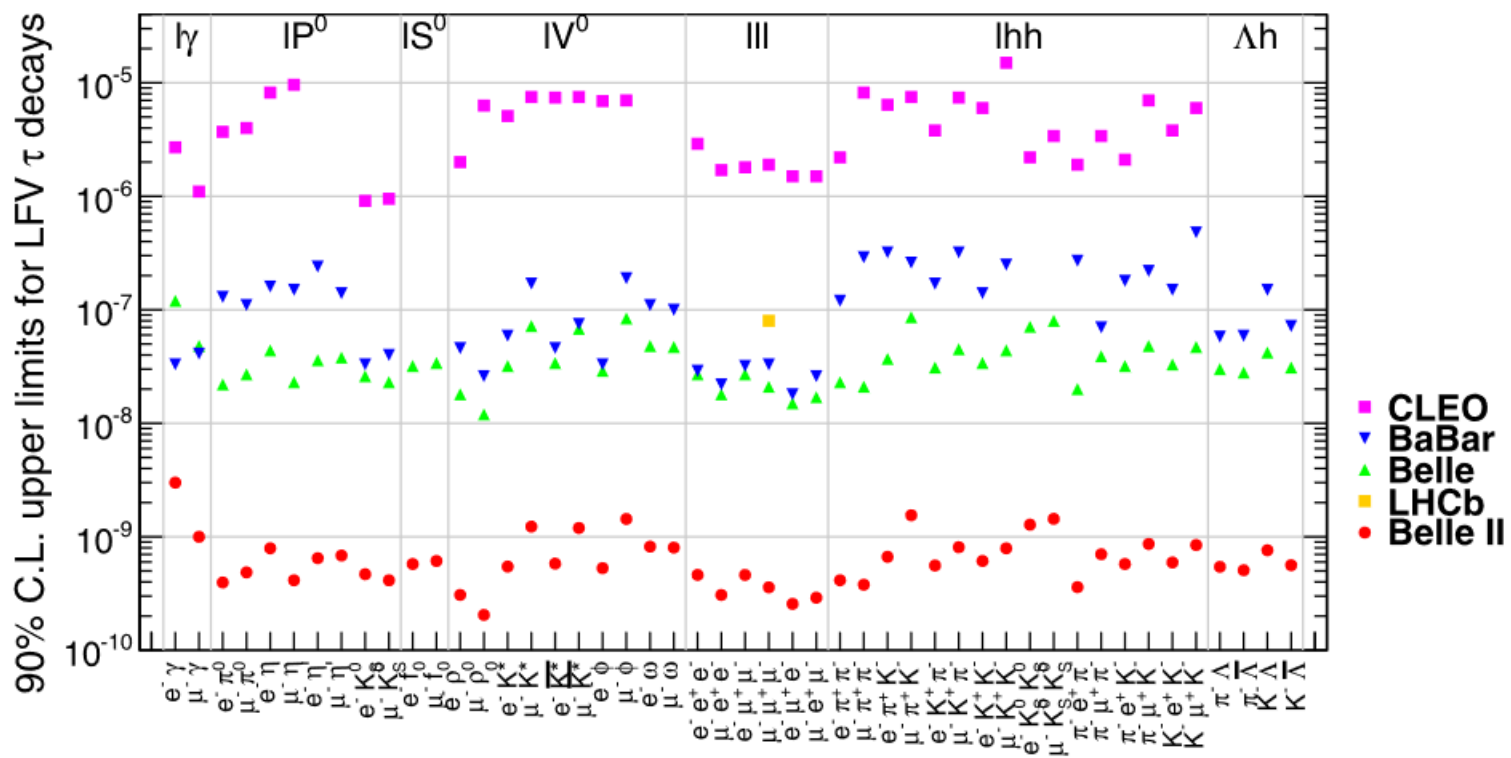
結果



472pb⁻¹ data:
=4×10⁵ τ -pair
Br($\tau \rightarrow \mu\nu\nu/e\nu\nu$)=17%
UL<0.004 @95%CL

BelleもBaBarもまだやってない...
Belle/Belle IIで動きはある。

Belle IIの予想



› 10年くらいで1桁は改善する予定 (どこまで棄却できるか)

Tau CPV, EDM



CPV in tau decays

- › L F V 同様レプトンセクターにCPVは見えていません
→発見 = B S Mの存在

一つの予言としてWの代わりにスカラー粒子が飛んだときにC P Vが起きえる

- › どんなモードで？

→ $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm K_S^0 \nu$ (Phys. Rev. Lett. 107, 131801 (2011))

- › どのような形でC P Vを見るのか？

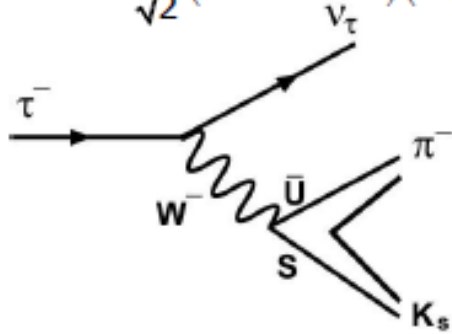
→ τ^+ と τ^- の崩壊で角度分布の違いを見る

CPV search in $\tau \rightarrow \pi K_S^0 \nu$

-Effective Hamiltonian

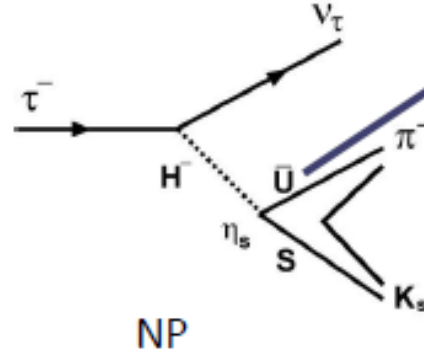
SM

$$H_{SM} = \sin \theta_c \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\nu} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \tau) (\bar{s} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) u)$$



Scalar Boson

$$H_{NP} = \sin \theta_c \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\nu} (1 + \gamma_5) \tau) (\bar{s} (\eta_s + \eta_p \gamma_5) u)$$



複素結合定数

$$J_\mu^{K\pi} = \langle K(p_1) \pi(p_2) | \bar{s} \gamma_\mu u | 0 \rangle$$

$$= (p_1 - p_2)^\nu T_{\nu\mu} F(Q^2) + Q_\mu F_s(Q^2)$$

$$T_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - \frac{Q_\mu Q_\nu}{Q^2}$$

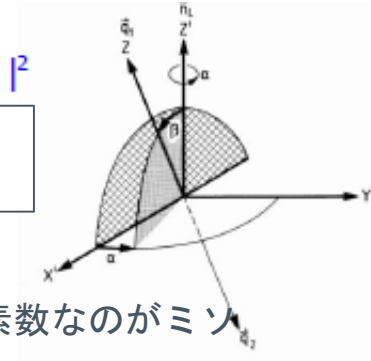
形状因子: F (ベクター) $F_s(Q^2) \rightarrow F_s(Q^2) = F_s(Q^2) + \frac{\eta_s}{m_\tau} F_H(Q^2)$
 F_s (スカラー)

$$F_H(Q^2) \equiv \langle K(p_1) \pi(p_2) | \bar{s} u | 0 \rangle$$

微分崩壊率とCPV

$$\frac{d\Gamma(\tau^-)}{dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta} = [A(Q^2) - B(Q^2)(3\cos^2\Psi - 1)(3\cos^2\beta - 1)] \cdot |F|^2 + m_\tau^2 |F_s|^2 - C(Q^2) \cos\beta \cos\psi \cdot \text{Re}(FF_s^*(\eta_s))$$

CPVがここに現れる



$Q^2 = M_{K\pi}^2$, $A(Q^2), B(Q^2), C(Q^2)$: known function.

β : direction of K_s in $K_s\pi$ rest frame

Ψ : direction of τ in the $K_s\pi$ rest frame.

(θ : direction of $K_s\pi$ system in the τ rest frame. Correlated with Ψ)

※ η が複素数なのがミソ

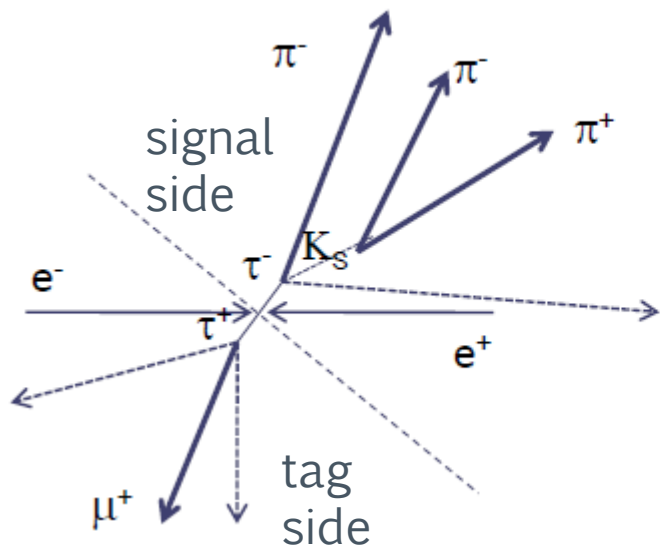
$$A_i^{\text{CP}} = \frac{\iiint_{Q_{1,i}^2}^{Q_{2,i}^2} \cos\beta \cos\psi \left(\frac{d\Gamma_{\tau^-}}{d\omega} - \frac{d\Gamma_{\tau^+}}{d\omega} \right) d\omega}{\frac{1}{2} \iiint_{Q_{1,i}^2}^{Q_{2,i}^2} \left(\frac{d\Gamma_{\tau^-}}{d\omega} + \frac{d\Gamma_{\tau^+}}{d\omega} \right) d\omega} \simeq \langle \cos\beta \cos\psi \rangle_{\tau^-}^i - \langle \cos\beta \cos\psi \rangle_{\tau^+}^i$$

実験的に測るのはこっち

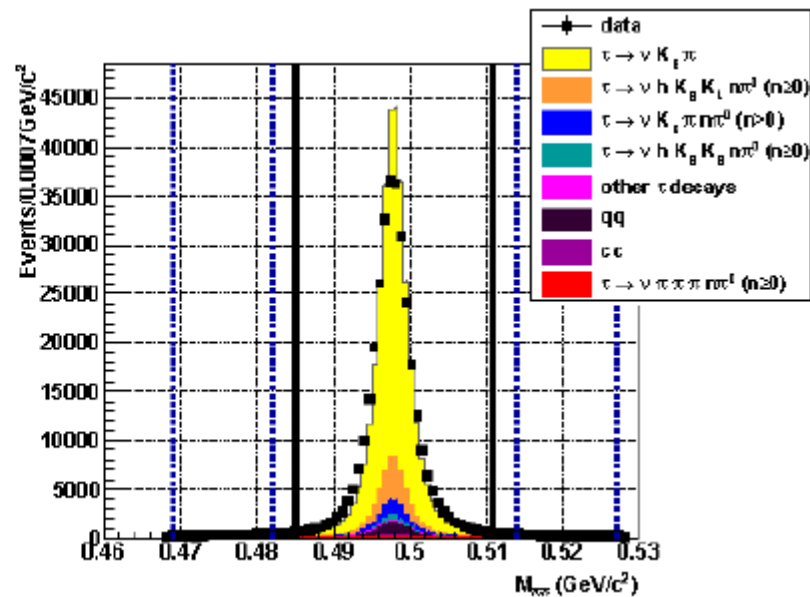
with $d\omega = dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta$.

使ったデータと選別条件

› Belle実験で収集された 700 fb^{-1}



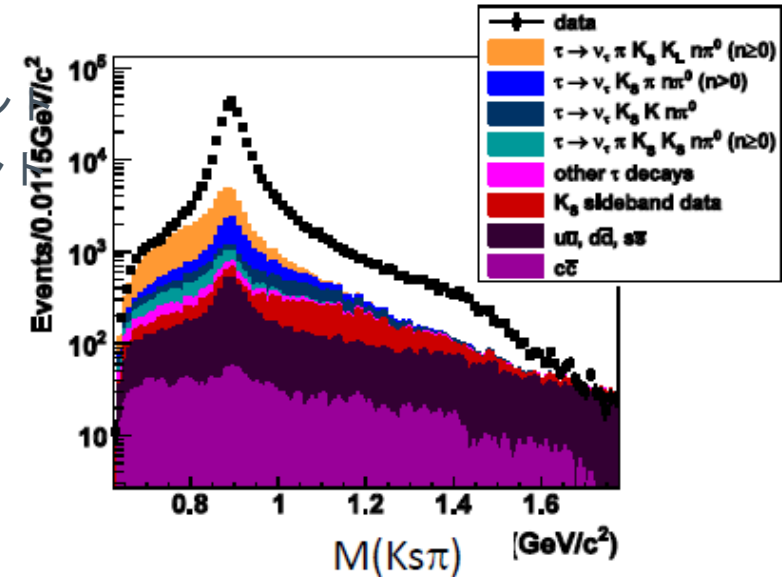
荷電粒子4本 (3 - 1)
 K_s^0 がある。(質量、飛距離)、 πD
 tag sideはレプトニック崩壊



K_s^0 候補の質量分布
 → K_s^0 じゃないBGはほとんどない

CPV 評価に使ったイベント

- $\tau^+ \rightarrow K_S \pi^+ \nu_\tau$: $(162,168 \pm 403)$ イベント
- $\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau$: $(161,982 \pm 403)$ イベント
- **Background:** total $(22.1 \pm 3.6)\%$
 - ✓ $\tau^- \rightarrow K_S K_L \pi \nu_\tau$: $(9.5 \pm 3.2)\%$
 - ✓ $\tau^- \rightarrow K_S \pi \pi^0 \nu_\tau$: $(3.7 \pm 1.2)\%$
 - ✓ $e^+e^- \rightarrow qq$: $(3.4 \pm 1.0)\%$



CP rate-asymmetry (Observed level)

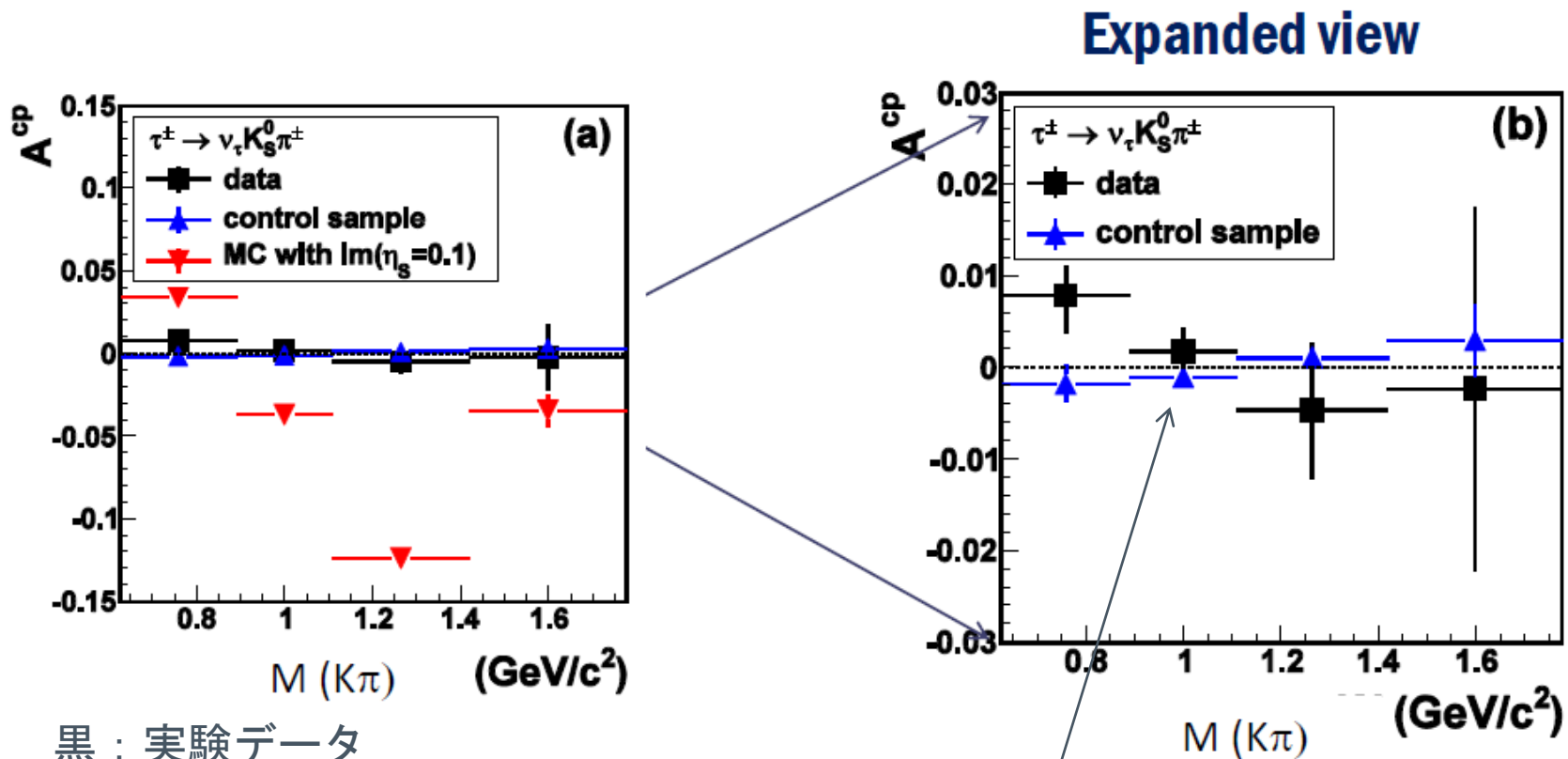
$$A_{CP} = \frac{N(\tau^+ \rightarrow K_S \pi^+ \nu_\tau) - N(\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau)}{N(\tau^+ \rightarrow K_S \pi^+ \nu_\tau) + N(\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau)} = (0.07 \pm 0.25)\%$$

▶ ちゃんとした評価をするには補正が必要

補正？

- › 検出器 $\rightarrow O(10^{-3})$
 - 4π 覆っていないことの補正
 - 全ての方向で感度が均一ではないことの補正
- › F-B asymmetry (γ -Zの干渉) $\rightarrow O(10^{-4})$
 - Lab系 (測定) とCM系 (評価) の違い
- › $\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$ が役立つ
 - K_S^0 はない($\Delta S=0$)が終状態は信号と同じ
 - $\Rightarrow \tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$ のAcpを測定して補正

結果



- 黒：実験データ
- 青：サイドバンドのデータ
- 赤：CPVを入れたMCイベント

$$A_{cp} = (1.8 \pm 2.1(stat) \pm 1.4(sys)) \times 10^{-3}$$

これも特に問題はないのでBelle IIでやれば感度はあがる

ηに焼きなおす

- > $|\text{Im}(\eta_s)| < (0.012-0.026)$ at 90 %C.L.
 - 範囲があるのは形状因子の強い相互作用由来の相対位相がわからないから。(角度を動かして評価)

■ Application: In the 3HDM

$$\eta_s \equiv \frac{m_\tau m_s}{M_{H^\pm}^2} X^* Z$$

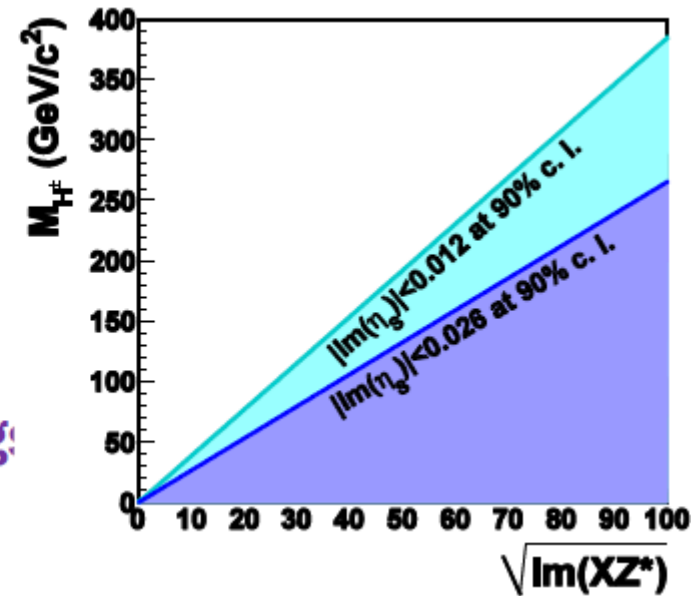
M_{H^\pm} : mass of lightest charged Higgs in MHDM

Z : complex coupling constant btw Higgs and lepton.

X : complex coupling constant btw Higgs and down-type quark

■ The result $(\text{Im}(\eta_s) < 0.026)$ limits the coupling:

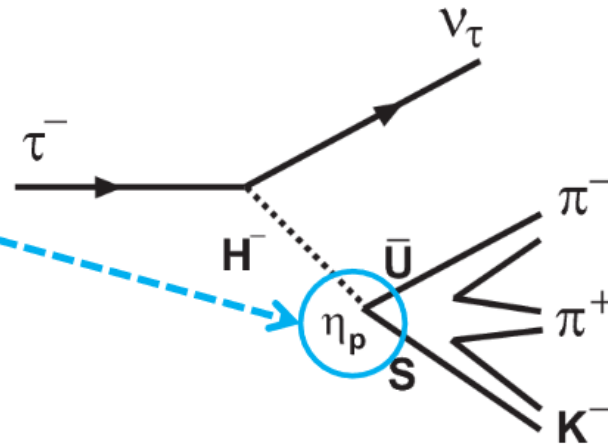
$$|\text{Im}(XZ^*)| \leq 0.15 \frac{M_H^2}{(1\text{GeV})^2}$$



CPV in $\tau \rightarrow K\pi\pi\nu$

$\tau \rightarrow K_S\pi\nu$ と同じ感じだが、今度はスカラーではなく擬スカラーが

$$F_4 \rightarrow \tilde{F}_4 = F_4 + \frac{f_H}{m_\tau} \eta_p$$



K $\pi\pi$ 静止系での
Kと π のなす平面の
法線ベクトルと
CM系でのK $\pi\pi$ 系の方向
のなす角を β とすると
 $\cos\beta > 0 < 0$ の非対称性
の $\tau^+/-$ での差を見ると
CPVが見える。

また、K $\pi\pi$ 静止系での
Kの向きを γ とすると
 $\sin\gamma\sin\beta$

$\sin\gamma\cos\beta$ もCPを破る

Belle 1, BaBarでは
解析されていない

→BGがすごい/Belle IIのPIDに期待

$$J^\mu \equiv \langle K^-(p_1)\pi^-(p_2)\pi^+(p_3) | \bar{s}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)u | 0 \rangle$$

$$= [F_1(s_1, s_2, Q^2)(p_1 - p_3)_\nu + F_2(s_1, s_2, Q^2)(p_2 - p_3)_\nu] T^{\mu\nu}$$

$$+ iF_3(s_1, s_2, Q^2)\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} p_{1\nu}p_{2\rho}p_{3\sigma} + \tilde{F}_4(s_1, s_2, Q^2)Q^\mu$$

τ

BaBarの τ CPVの結果

› こいつがやっかい



BaBarの τ CPVの結果

Phys. Rev. D85 (2012) 031102

› 500fb⁻¹ のデータでアシンメトリーを評価（数だけ）

$$A_Q = \frac{\Gamma(\tau^+ \rightarrow \pi^+ K_S^0 \bar{\nu}_\tau) - \Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- K_S^0 \nu_\tau)}{\Gamma(\tau^+ \rightarrow \pi^+ K_S^0 \bar{\nu}_\tau) + \Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- K_S^0 \nu_\tau)} \quad A_Q = (0.33 \pm 0.01)\% \text{ in SM due to CPV in } K^0 - \bar{K}^0 \text{ mixing.}$$

こうは言ってるけど、任意の数の π^0 を含むという解析をしている！

$$A_Q = (-0.36 \pm 0.23 \pm 0.11)\% \\ 2.8 \sigma \text{ from SM prediction}$$

› 標準模型の期待値とほぼ同じ大きさで符号反対の結果を得た。

(Belleの解析は K^0 のCPVは見ない解析)

何がやっかいなのか？

› $\tau \rightarrow K\pi\nu$, $\tau \rightarrow K\pi\pi\nu$ で効くのは
それぞれスカラー、擬スカラー。

› 任意の数の π^0 を含んだ解析は
どんな物理を見ているのか？

(もちろん、pureに K_S^0 のCPVの効果は見ている。)

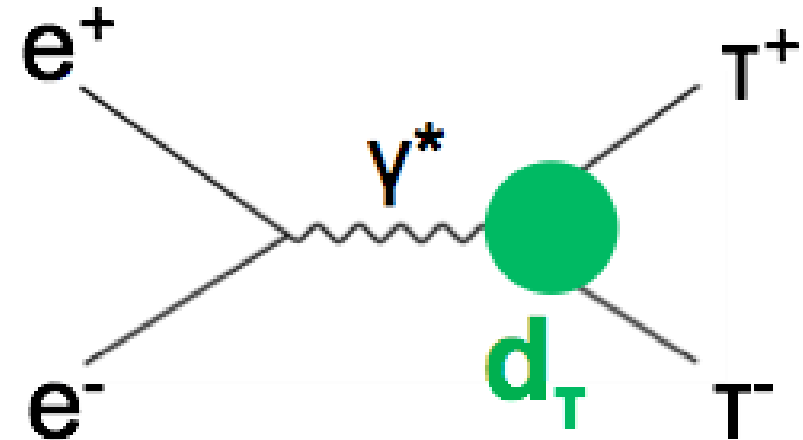
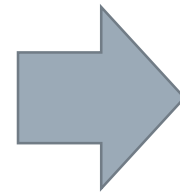
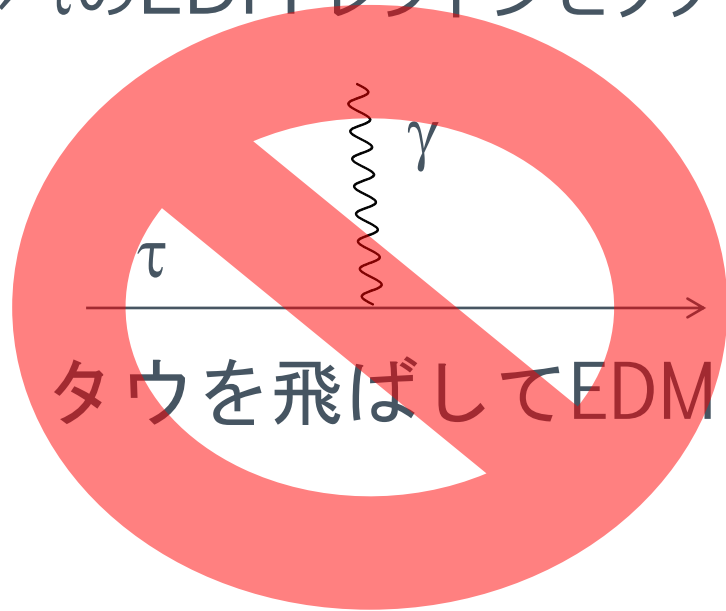
とはいえ決着は着けないといけなないので

Belle IIでも進行中

→どこが効いてるのかさらに検証する必要あり

タウの電気双極子モーメントの測定(1)

τのEDM レプトンセクター-T-Violation CPV保存を過程すればCP-Violation



ττ事象の生成過程で
→生成断面積？
→より感度の高いoptimal
observable

タウの電気双極子モーメントの測定(2)

Optimal Observable による測定

- ττ事象生成の振幅は

$$\mathcal{M}_{prod}^2 = \mathcal{M}_{SM}^2 + Re(d_\tau)\mathcal{M}_{Re}^2 + Im(d_\tau)\mathcal{M}_{Im}^2$$

$$\mathcal{M}_{SM}^2 = \frac{e^4}{k_0^2} [k_0^2 + m_\tau^2 + |k|^2(\hat{k}\hat{p})^2 - S_+S_-|k|^2(1 - (\hat{k}\hat{p})^2)] \quad p : e^+ \text{ の運動量}$$

$$+ 2(\hat{k}S_+)(\hat{k}S_-)(|k|^2 + (k_0 - m_\tau)^2(\hat{k}\hat{p})^2) \quad k : \tau^+ \text{ の運動量}$$

$$- 2k_0(k_0 - m_\tau)(\hat{k}\hat{p})((\hat{k}S_+)(\hat{p}S_-) + (\hat{k}S_+)(\hat{p}S_-)) \quad S_\pm : \tau^\pm \text{ のスピン}$$

$$+ 2k_0^2(\hat{p}S_+)(\hat{p}S_-)$$

$$\mathcal{M}_{Re}^2 = 4\frac{e^3}{k_0}|k|[-(m_\tau + (k_0 - m_\tau)(\hat{k}\hat{p})^2)(S_+ \times S_-)\hat{k}$$

$$+ k_0(\hat{k}\hat{p})(S_+ \times S_-)\hat{p}]$$

$$\mathcal{O}_{Re} = \frac{\mathcal{M}_{Re}^2}{\mathcal{M}_{SM}^2}$$

を定義して

$$\langle \mathcal{O}_{Re} \rangle \propto \int \mathcal{O}_{Re} d\sigma \propto \int \mathcal{O}_{Re} \mathcal{M}_{prod}^2 d\phi$$

$$= \int \mathcal{M}_{Re}^2 d\phi + \underbrace{Re(d_\tau)}_{\text{EDM}} \int \frac{(\mathcal{M}_{Re}^2)^2}{\mathcal{M}_{SM}^2} d\phi$$

オフセット

EDM

感度

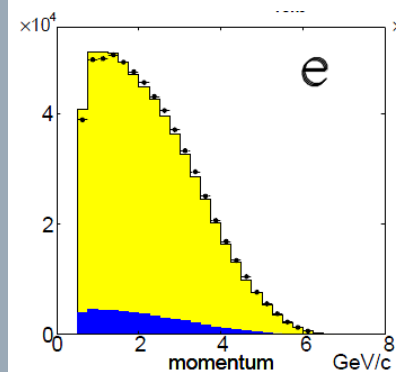
からEDMを測定する
(オフセット, 感度はMCで評価)

τ

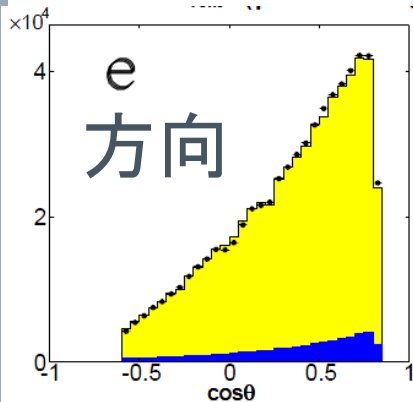
タウの電気双極子モーメントの測定(2)

> 30fb^{-1} , $\tau \rightarrow e\nu\nu, \mu\nu\nu, \pi\nu, \rho\nu$

但し、bhabha, di-muon事象を避けるため、 $\tau \rightarrow e\nu\nu/\tau \rightarrow e\nu\nu$, $\tau \rightarrow \mu\nu\nu/\tau \rightarrow \mu\nu\nu$ は使わない

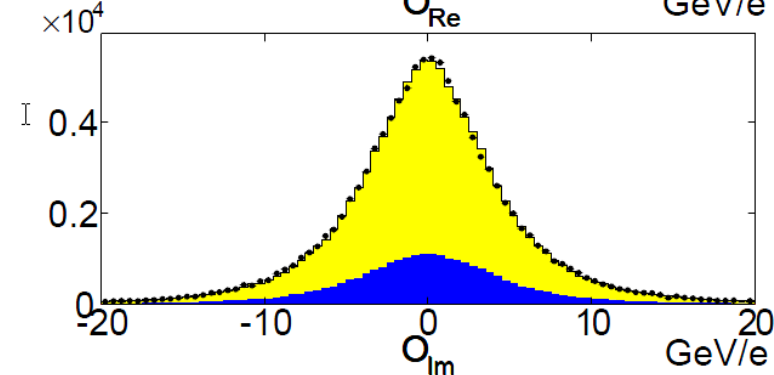
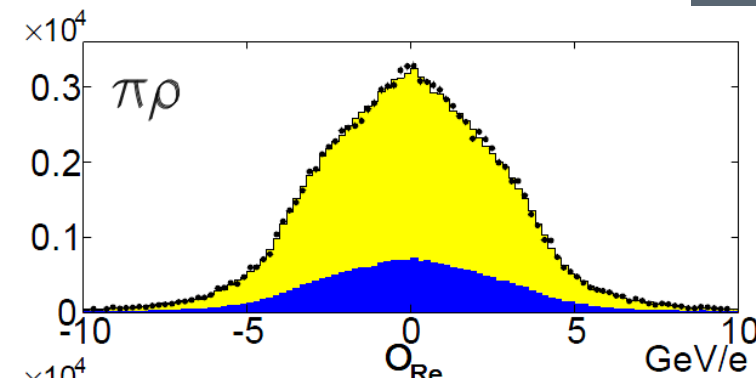
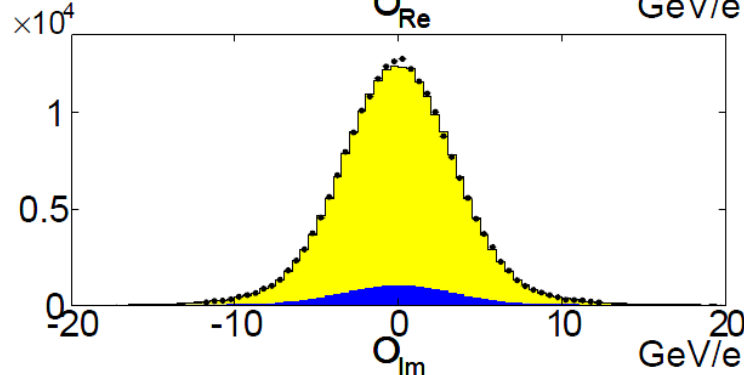
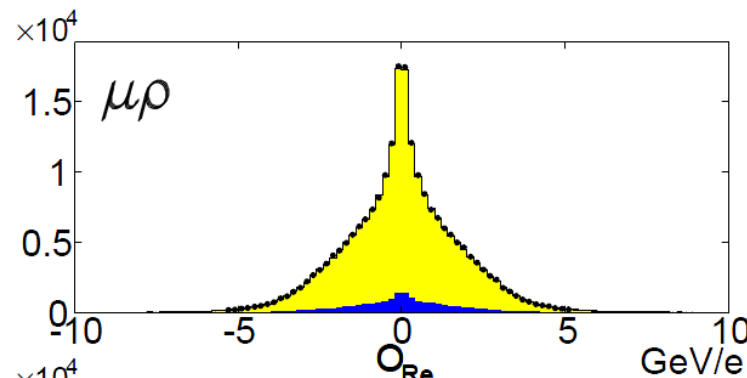


運動量

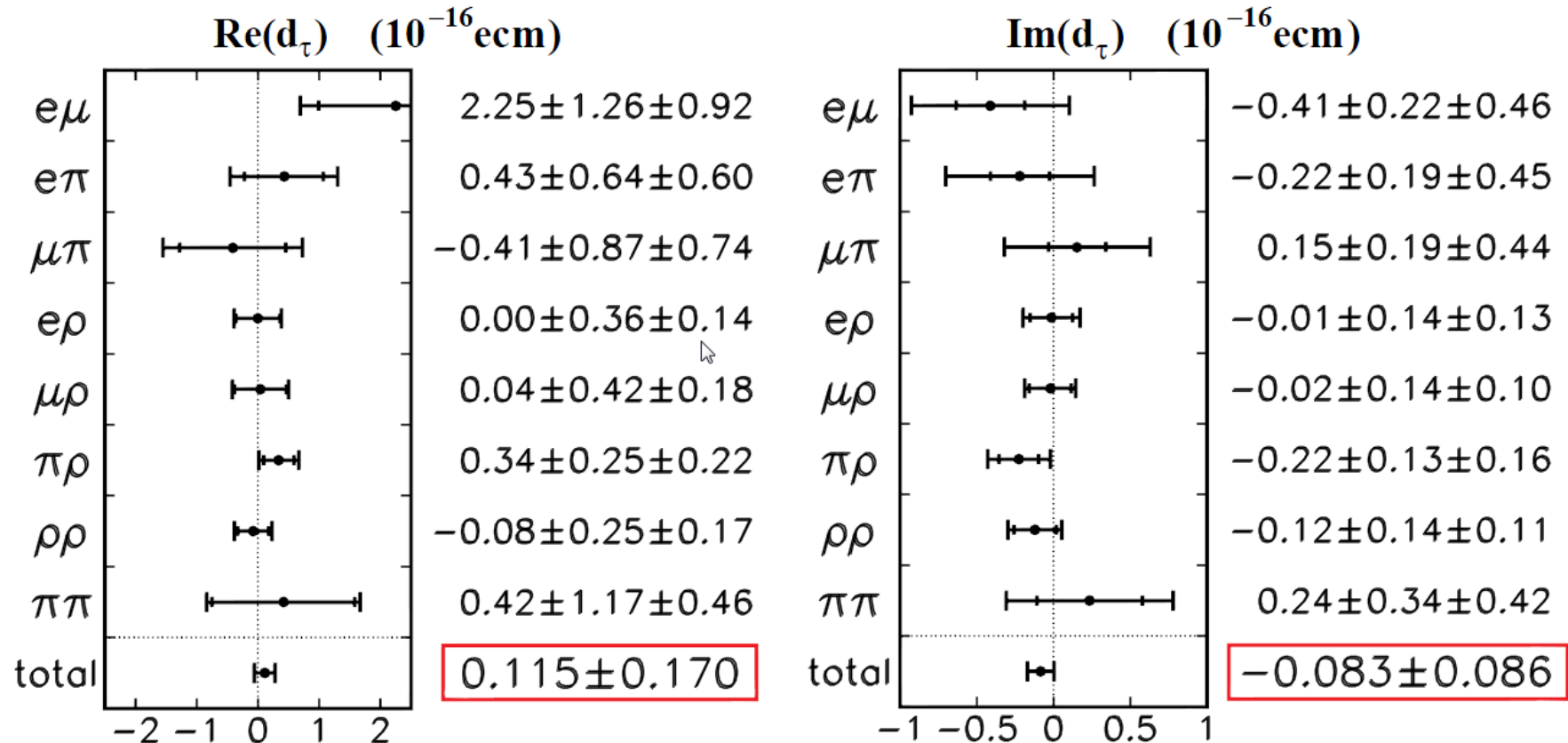


方向

データと
MCの
違いが
系統誤差
として
効いて
くる



タウの電気双極子モーメントの測定(4)



$|Re(d_\tau)| < 4.0 \times 10^{-17} \text{ e cm}, |Im(d_\tau)| < 2.2 \times 10^{-17} \text{ e cm},$

フルデータを使った最新の解析結果がもうすぐ出ます！

Belle IIでは…

- › 単純には統計が上がれば感度もあがる
- › Belleの結果ではlow momentum trackに対するトリガーシミュレーションの再現性がネック
- › シミュレーション頼りのところがあるので、十分なシミュレーションデータが確保できるかが課題（時間的にも容量的にも）

Lepton Universality



Lepton universality(1)

レプトンのレプトニック崩壊の分岐比（部分幅）の公式

$$\Gamma(\lambda \rightarrow \nu_{\lambda\rho}\bar{\nu}_{\rho}(\gamma)) = \frac{B(\lambda \rightarrow \nu_{\lambda\rho}\bar{\nu}_{\rho})}{\tau_{\lambda}} = \frac{G_{\lambda} G_{\rho} m_{\lambda}^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_{\rho}^2}{m_{\lambda}^2}\right) R_W^{\lambda} R_{\gamma}^{\lambda}$$

$$G_{\rho} = \frac{g_{\rho}^2}{4\sqrt{2}M_W^2}, \quad f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \ln x,$$

$$R_W^{\lambda} = 1 + \frac{3}{5} \frac{m_{\lambda}^2}{M_W^2}, \quad R_{\gamma}^{\lambda} = 1 + \frac{\alpha(m_{\lambda})}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2 \right).$$

普通は G_{λ} （親粒子）と G_{ρ} （娘粒子）は同一視するのだが、
敢えて別にしておく

Lepton universality(2)

› $\mu \rightarrow e \nu \nu, \tau \rightarrow \mu \nu \nu, \tau \rightarrow e \nu \nu$ の分岐比から

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right) = 1.0010 \pm 0.0015, \quad \left(\frac{g_\tau}{g_e}\right) = 1.0029 \pm 0.0015, \quad \left(\frac{g_\mu}{g_e}\right) = 1.0019 \pm 0.0014.$$

› もしくは $\tau \rightarrow \pi \nu, \tau \rightarrow K \nu$ の分岐比から

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{B(\tau \rightarrow h \nu_\tau)}{B(h \rightarrow \mu \bar{\nu}_\mu)} \frac{2m_h m_\mu^2 \tau_h}{(1 + \delta R_{\tau/h}) m_\tau^3 \tau_\tau} \left(\frac{1 - m_\mu^2/m_h^2}{1 - m_h^2/m_\tau^2}\right)^2 \quad \begin{array}{l} \delta R_{\tau/\pi} = (0.16 \pm 0.12)\% \\ \delta R_{\tau/K} = (0.90 \pm 0.22)\% \end{array}$$

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_\pi = 0.9961 \pm 0.0027 \quad \left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_K = 0.9860 \pm 0.0070$$

めでたしめでたし？

どこまで 1 に近づけるか？

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_{\tau+\pi+K} = 1.0000 \pm 0.0014$$

Leptonic decayは...

› 未だにLEPが強い

$$\Gamma(\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau) / \Gamma_{\text{total}}$$

 Γ_3 / Γ

To minimize the effect of experiments with large systematic errors, we exclude experiments which together would contribute 5% of the weight in the average.

VALUE (%)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
17.39 ± 0.04				OUR FIT
17.33 ± 0.05				OUR AVERAGE
17.319 ± 0.070 ± 0.032	54k	¹ SCHAEL	05C ALEP	1991-1995 LEP runs
17.34 ± 0.09 ± 0.06	31.4k	ABBIENDI	03 OPAL	1990-1995 LEP runs
17.342 ± 0.110 ± 0.067	21.5k	² ACCIARRI	01F L3	1991-1995 LEP runs
17.325 ± 0.095 ± 0.077	27.7k	ABREU	99X DLPH	1991-1995 LEP runs

$$\Gamma(e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) / \Gamma_{\text{total}}$$

 Γ_5 / Γ

To minimize the effect of experiments with large systematic errors, we exclude experiments which together would contribute 5% of the weight in the average.

VALUE (%)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
17.82 ± 0.04				OUR FIT
17.82 ± 0.05				OUR AVERAGE
17.837 ± 0.072 ± 0.036	56k	¹ SCHAEL	05C ALEP	1991-1995 LEP runs
17.806 ± 0.104 ± 0.076	24.7k	² ACCIARRI	01F L3	1991-1995 LEP runs
17.81 ± 0.09 ± 0.06	33.1k	ABBIENDI	99H OPAL	1991-1995 LEP runs
17.877 ± 0.109 ± 0.110	23.3k	ABREU	99X DLPH	1991-1995 LEP runs

Low energyは...

$$\Gamma(\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau) / \Gamma(e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)$$

 Γ_3 / Γ_5

Standard Model prediction including mass effects is 0.9726.

VALUE (units 10 ⁻²)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
97.62 ± 0.28				OUR FIT
97.9 ± 0.4				OUR AVERAGE
97.96 ± 0.16 ± 0.36	731k	¹ AUBERT	10F BABR	467 fb ⁻¹ E _{cm} ^{ee} = 10.6 GeV
97.77 ± 0.63 ± 0.87		² ANASTASSOV	97 CLEO	E _{cm} ^{ee} = 10.6 GeV
99.7 ± 3.5 ± 4.0		ALBRECHT	92D ARG	E _{cm} ^{ee} = 9.4-10.6 GeV

Belle IIでも遂行中

Michel parameters, V_{us}

あとCVCも（時間があれば）



Lorentz StructureとMichel parameters

- › Tau Leptonic decayの相互作用ラグランジアンを一般化してW以外の効果を評価する

$$\mathcal{M}(\tau \rightarrow \tau \nu_\tau \nu_\ell) = \frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_{\substack{N=S,V,T \\ i,j=L,R}} g_{ij}^N [\bar{\ell}_i \Gamma^N \nu_\ell] [\bar{\nu}_\tau \Gamma_N \tau_j]$$

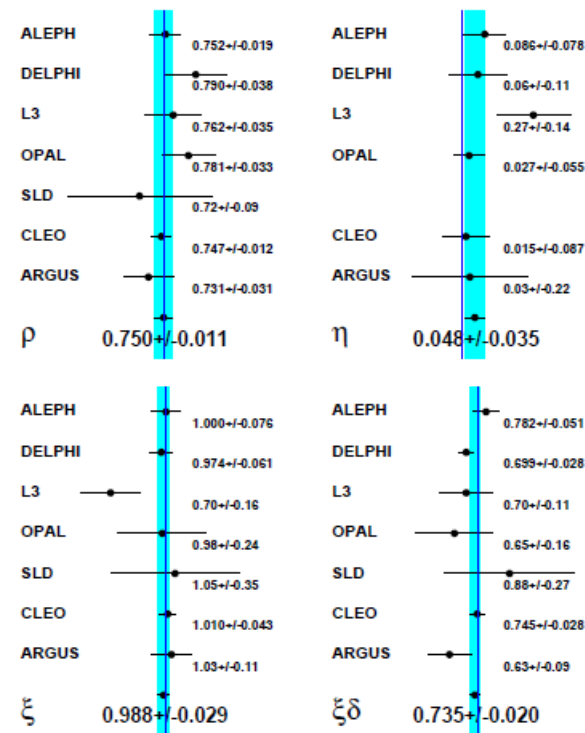
これからdifferential decay widthを計算すると $x = \frac{E_\ell}{E_{max}}, x_0 = \frac{m_\ell}{E_{max}}$

$$\frac{d\Gamma(\tau^\pm)}{d\Omega dx} = \frac{4G_F^2 m_\tau E_{max}}{(2\pi)^4} \sqrt{x^2 - x_0^2} \left[x(1-x) + \frac{2}{9} \rho (4x^2 - 3x - x_0^2) \right. \\ \left. + \eta x_0 (1-x) \mp \frac{1}{3} P_\tau \cos \theta_\ell \xi \sqrt{x^2 - x_0^2} \left\{ 1 - x + \frac{2}{3} \delta (4x - 4 + \sqrt{1 - x_0^2}) \right\} \right]$$

ρ, η, ξ, δ をMichel parameterと呼び標準模型だと $\rho = \frac{3}{4}, \eta = 0, \xi = 1, \delta = \frac{3}{4}$

現状

Michel par.	Measured value	Experiment	SM value
ρ (e or μ)	$0.747 \pm 0.010 \pm 0.006$ 1.2%	CLEO-97	3/4
η (e or μ)	$0.012 \pm 0.026 \pm 0.004$ 2.6%	ALEPH-01	0
ξ (e or μ)	$1.007 \pm 0.040 \pm 0.015$ 4.3%	CLEO-97	1
$\xi\delta$ (e or μ)	$0.745 \pm 0.026 \pm 0.009$ 2.8%	CLEO-97	3/4
ξ_h (all hadr.)	$0.992 \pm 0.007 \pm 0.008$ 1.1%	ALEPH-01	1



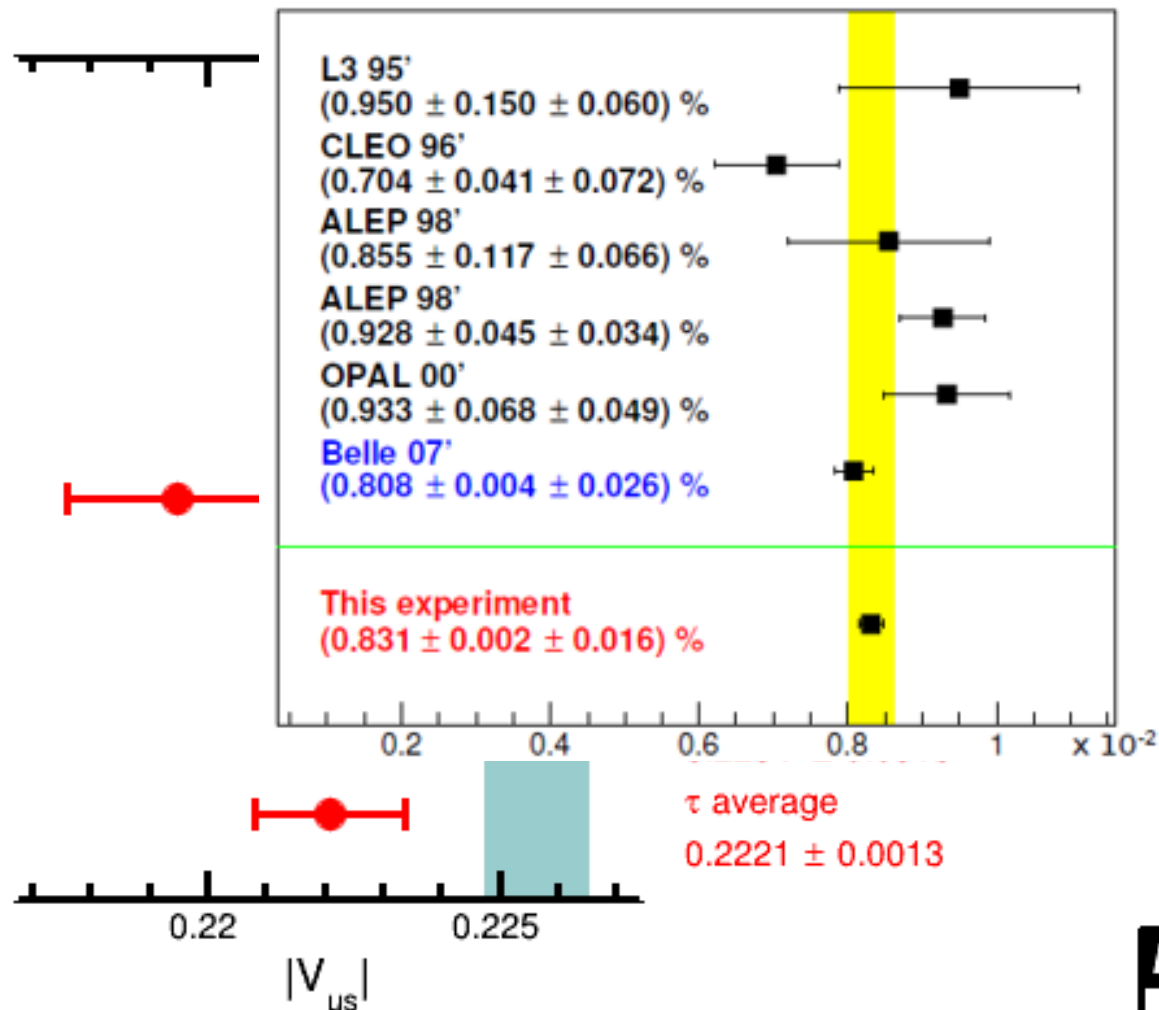
例えばType II 2HDM だと $\eta = \frac{m_\mu m_\tau}{2} \left(\frac{\tan^2 \beta}{M_H^2} \right)^{-1}$

Belleで進行中（だけど、かなり精密な理解がないとバイアスを生む）

V_{us} の測定

› どうも τ で
 V_{us} を測ると
Kで測ったのと
違った結果に
なる (小さい)
単純な1prong以外で
何かあるのか？

(何がずれると合うのかは未検証)



標準模型を超えない話

› Conserved Vector Current (CVC)

τ が偶数個の π に崩壊する現象は

$e^+e^- \rightarrow n \pi$ と非常によく似ている。

$$\tau^- \nu \rightarrow W^- \rightarrow \rho^-$$

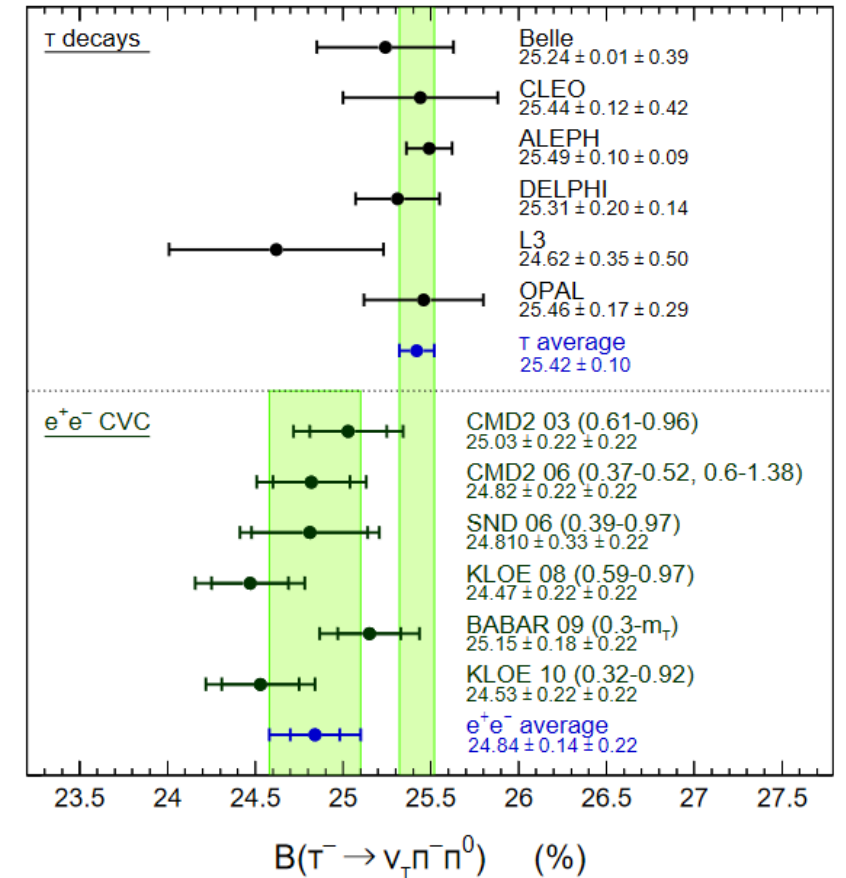
$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \rho^0$$

Tau leptonが発見された直後はこの関係から分岐比がすぐに予言された

最近では精密に計算できるようになったが、

どうも合わない…

Belleの主な誤差への寄与は π^0 の再構成
→ Belle IIだともっと精密にできそう



まとめ

- › タウレプトンを使って多彩な物理が楽しめます
 - LFV, CPV, Lepton Universality, Lorentz Structure, V_{us} , ...
- › 今のところB-factoryが最強です
 - LFV (特に 3μ) はうかうかしてられないかも
 - Belleで前例のあるものはルミノシティに応じた改善が期待できそう。
 - Belleでやってないのはアイデアが必要かも
- › 次の10年で止まってしまうのは困るので、ILCかどこかで続けられるスタディは必要