
タウレプトンの物理 ～近年の実験の進展状況～

早坂 圭司 (新潟大学・KEK)



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(ミューオンは 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

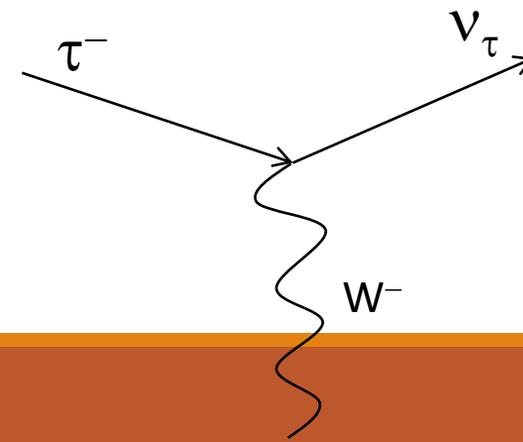
$2.9 \times 10^{-13} \text{s}$ (μ : $2.2 \times 10^{-6} \text{s}$)

弱い相互作用で崩壊

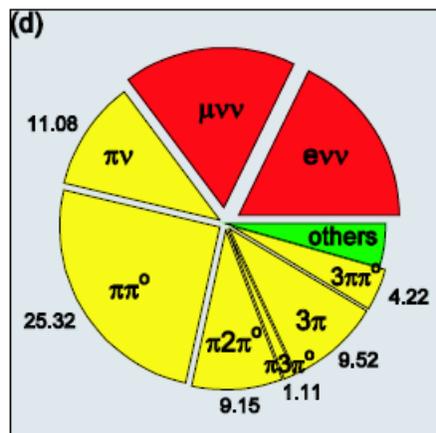
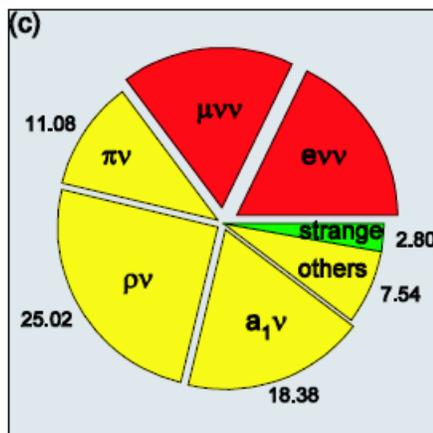
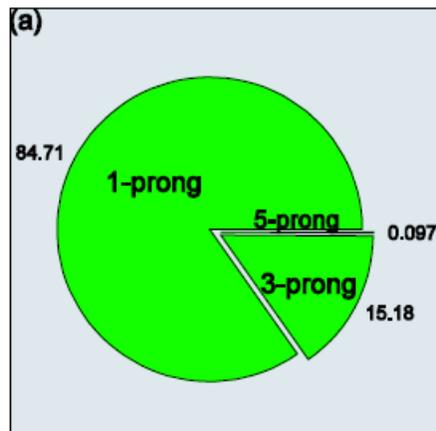
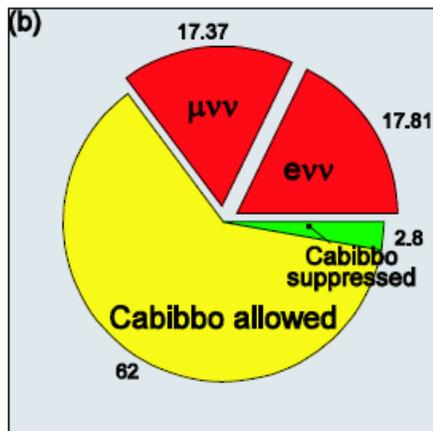
- 崩壊モードは多彩
(ミューオンはせいぜい3種類)
- 崩壊後ニュートリノが必ずある → 再構成が難しい

| 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

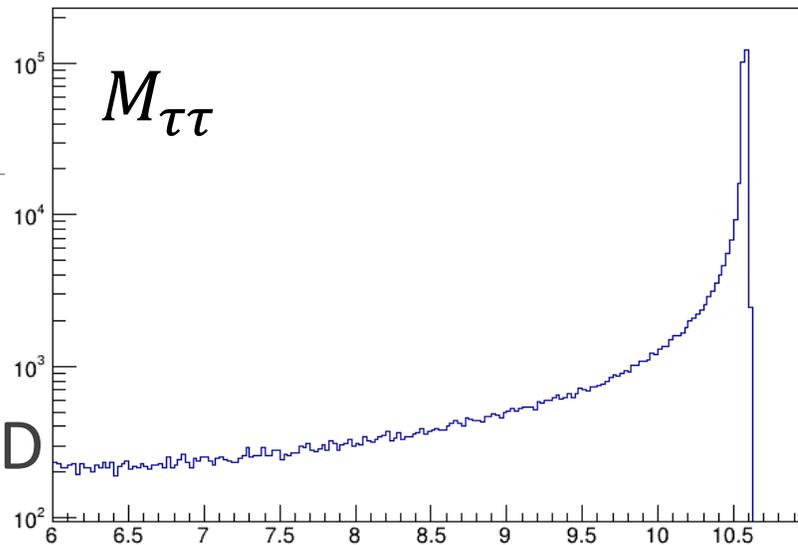


- i) leptonic 崩壊は35%
 →65%はニュートリノ1個
 35%はニュートリノ2個
- ii) 85%は1prong (charged track 1本) 1+3 prongで、99.9%
- iii) $\Delta S=1$ は3%以下
- iv) π^0 (=gamma 2本) 1つ以上、含む崩壊は~40%

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>)



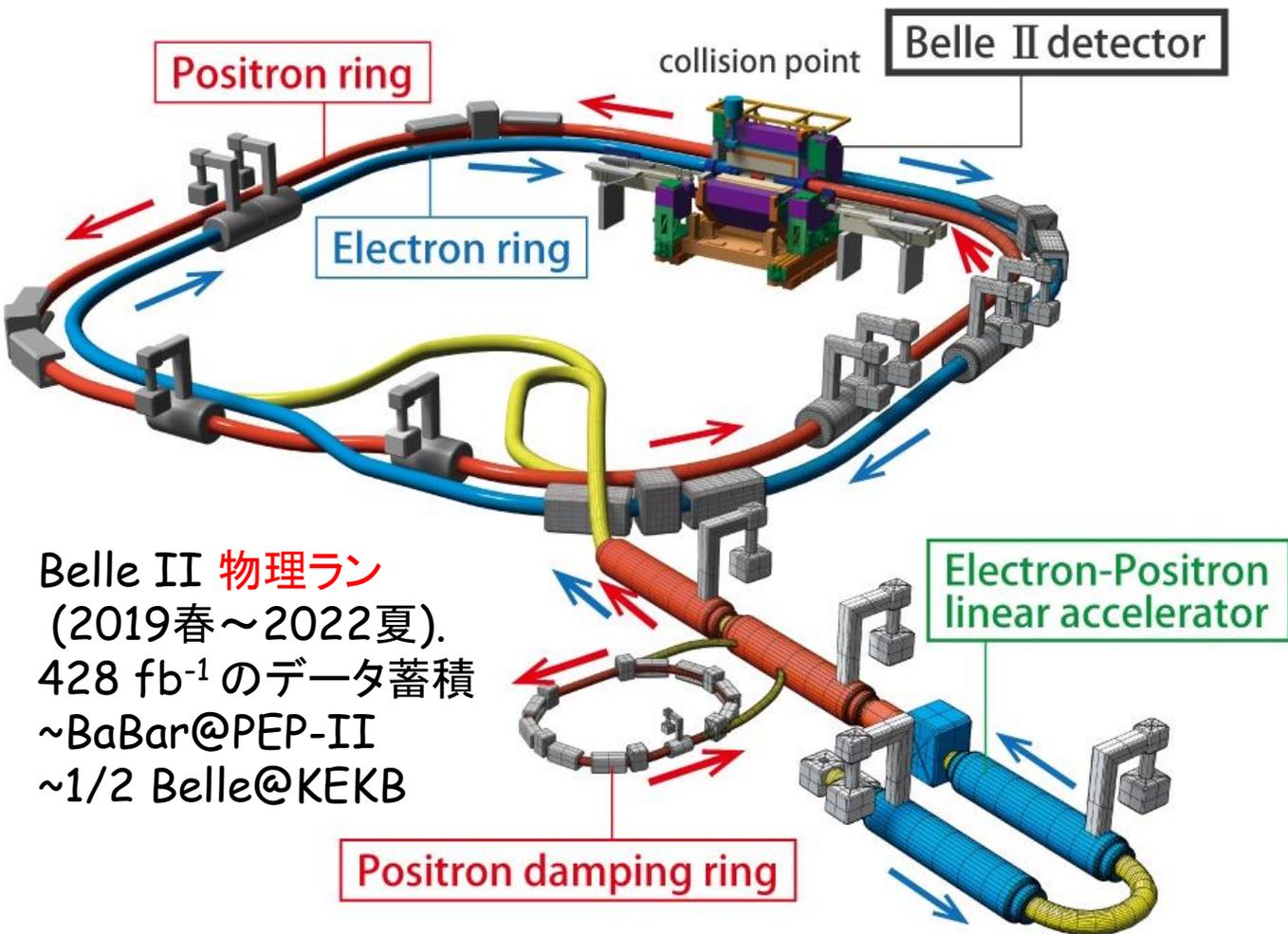
以下 Belle/Belle IIの
セットアップ
※ $\Upsilon(4S)$ 以外でも生成

D_s 等の崩壊中に現れる τ

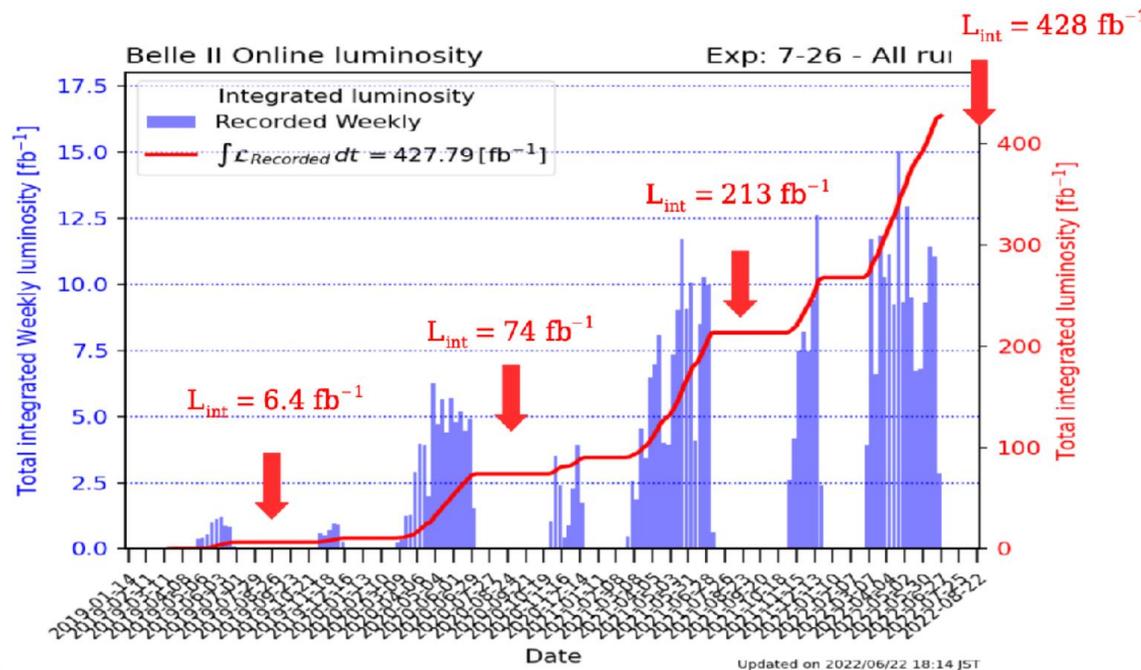
- LHCやfixed targetの実験
- IDはmassが完全に組めるneutrinoless LFV decay以外は難しそう

SuperKEKB加速器

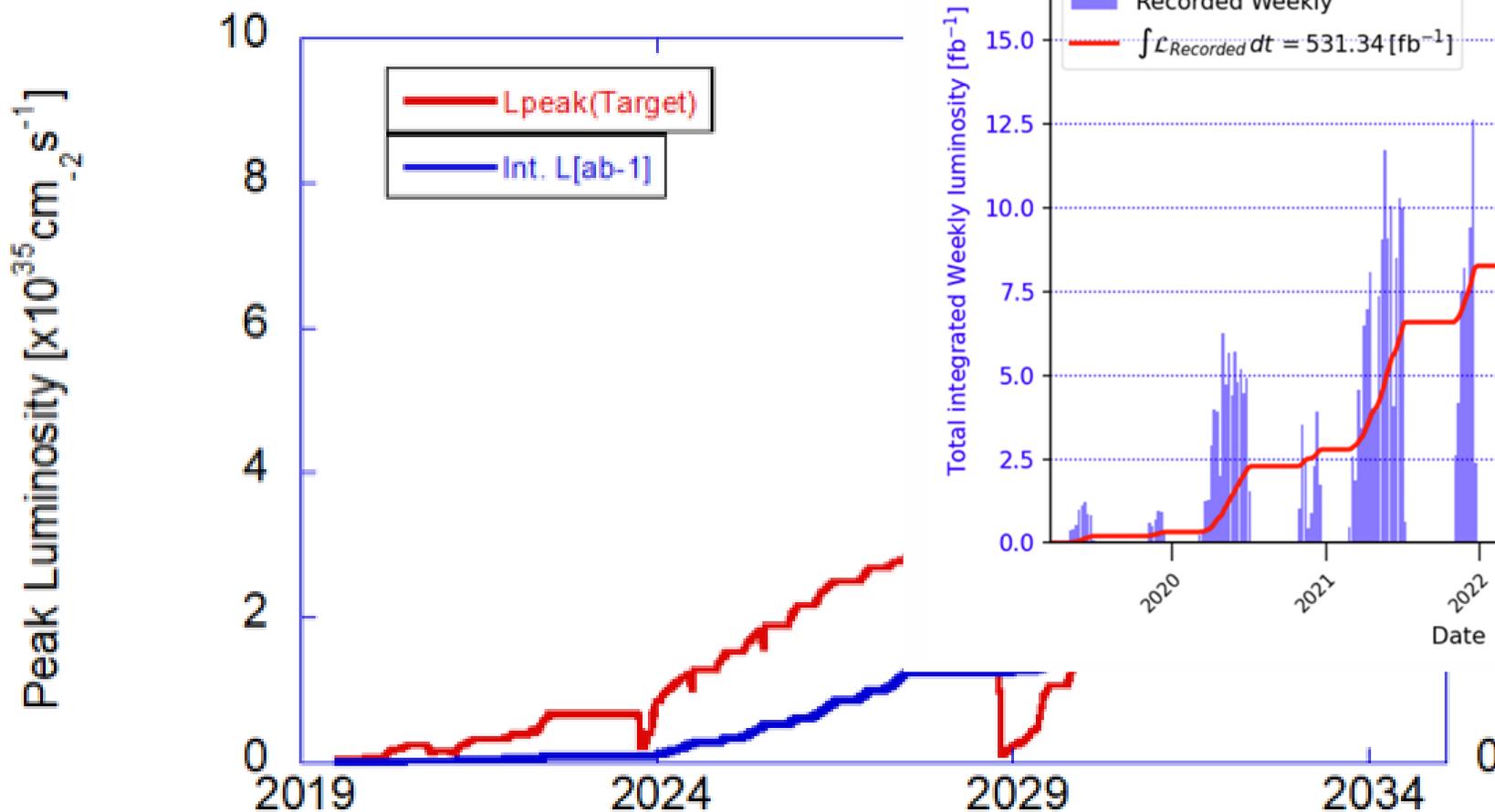
電子 (7.5 GeV) 陽電子 (4 GeV) 散乱
 $E_{CM} = 10.58 \text{ GeV} \sim Y(4S)$
 世界で一番新しい加速器 (散乱器)
 (LHC以降)
 $L(\text{design}, 2020) = 6.5 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{sec}$
 (cf. KEKB: $2 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{sec}$)



Belle II 物理ラン
 (2019春~2022夏).
 428 fb^{-1} のデータ蓄積
 ~BaBar@PEP-II
 ~1/2 Belle@KEKB

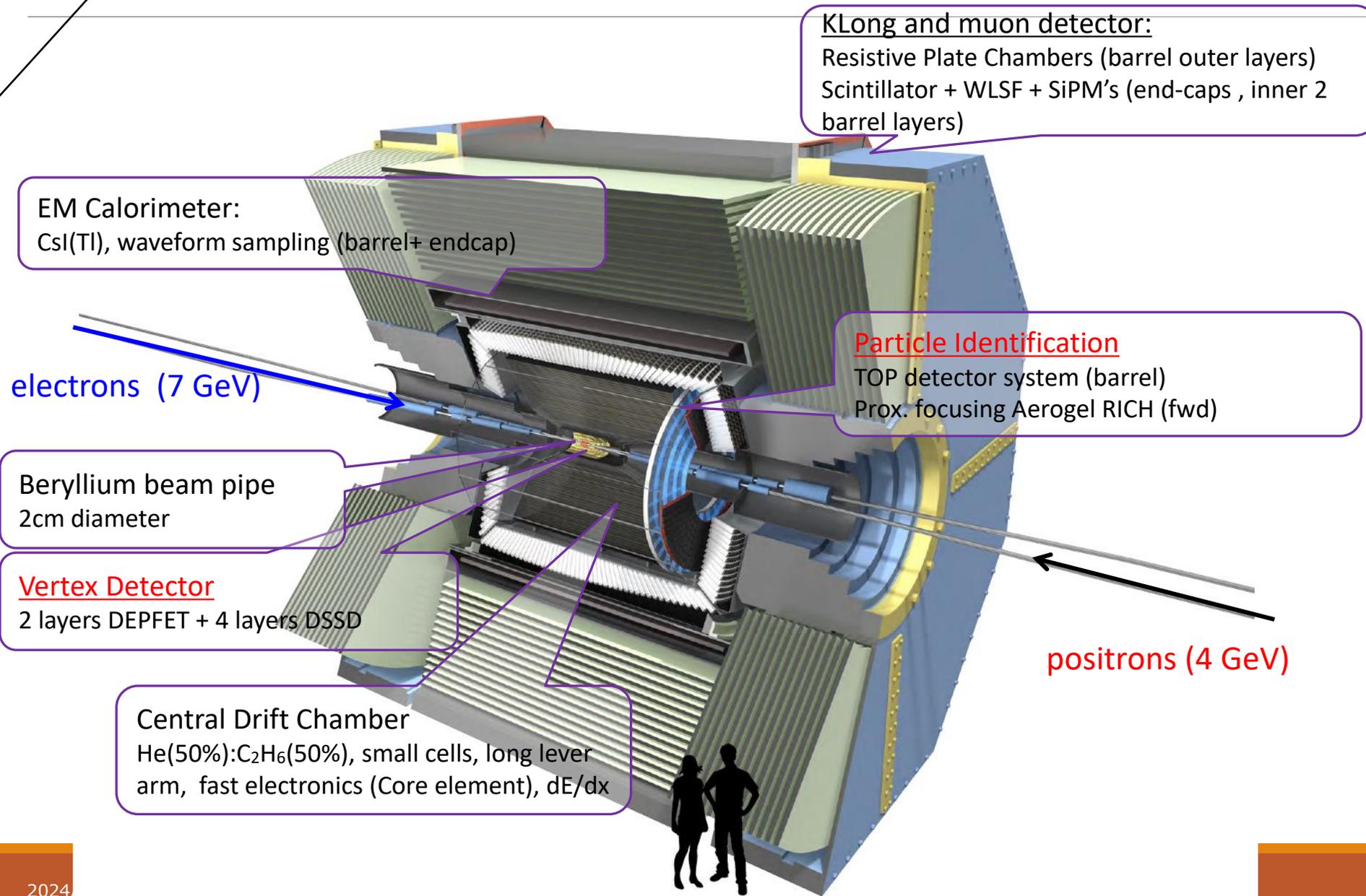


今後の予



電気代急騰もあって、2022年夏よりロングシャットダウン中でした。今年から再開。今は加速器調整中。来週あたりから物理ラン開始。最終的には 50ab^{-1} のデータを収集予定。(10年くらい)

Belle II検出器



Belle 検出器からのアップグレード
ハイレートに対応
+非対称性低下に対応
+PID:総とつかえ

Bファクトリー？

τ physics at B factories

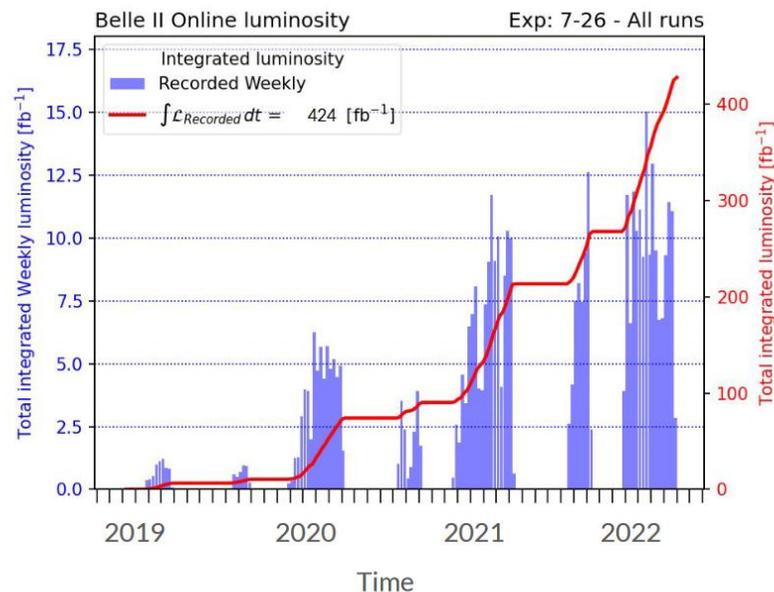
- Belle/Belle II are general purpose detectors: B and D physics, quarkonium, τ -physics, dark sector, ...
- colliding electrons and positrons around $\sqrt{s} \approx 10.58 \text{ GeV}/c^2$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S)) = 1.05\text{nb}$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-) = 0.919\text{nb}$$

- Belle: $988 \text{ fb}^{-1} \rightarrow \sim 908$ million τ pairs
- Belle II: $424 \text{ fb}^{-1} \rightarrow \sim 390$ million τ pairs
- clean collision environment
- large solid angle coverage ($> 90\%$)
 - well known missing mass and energy
- good track reconstruction, particle identification

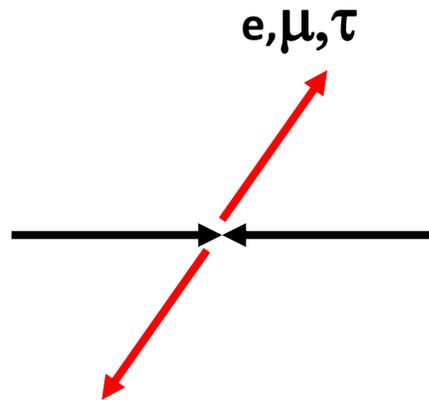
最近はBファクトリー
というよりは
フレーバファクトリー
という言葉が
使われ始めている。



Bファクトリーで生成されるイベント

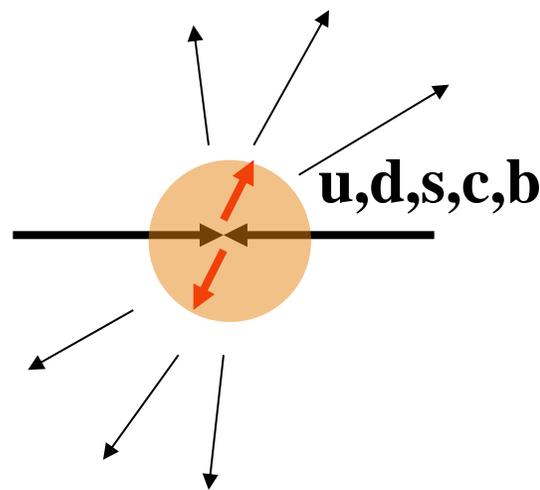
Bファクトリーで生成されるのは $B\bar{B}$ だけではない！

レプトン



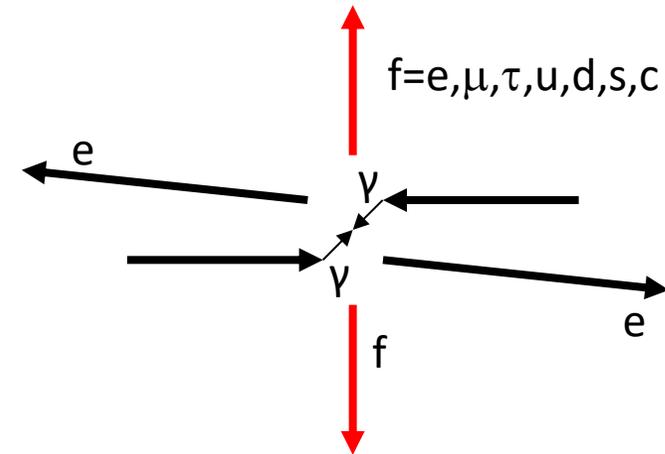
$ee \rightarrow ee$ はBhabha過程と呼ばれる。一緒に γ が生成される過程はradiativeという形容詞がつく (Radiative Bhabha = $ee \rightarrow ee\gamma$)

クォーク



$\sigma(\mu\mu) \sim \sigma(d\bar{d}) \sim \sigma(c\bar{c}) \sim \sigma(b\bar{b}) \sim \sigma(\tau\tau) \sim 1\text{nb}$
 $\sigma(\text{bhabha}) \sim 120 \times \sigma(\tau\tau)$
 $\sigma(eeee) \sim 40 \times \sigma(\tau\tau)$, $\sigma(ee\mu\mu) \sim 20 \times \sigma(\tau\tau)$,
 $\sigma(eeuu) \sim 10 \times \sigma(\tau\tau)$

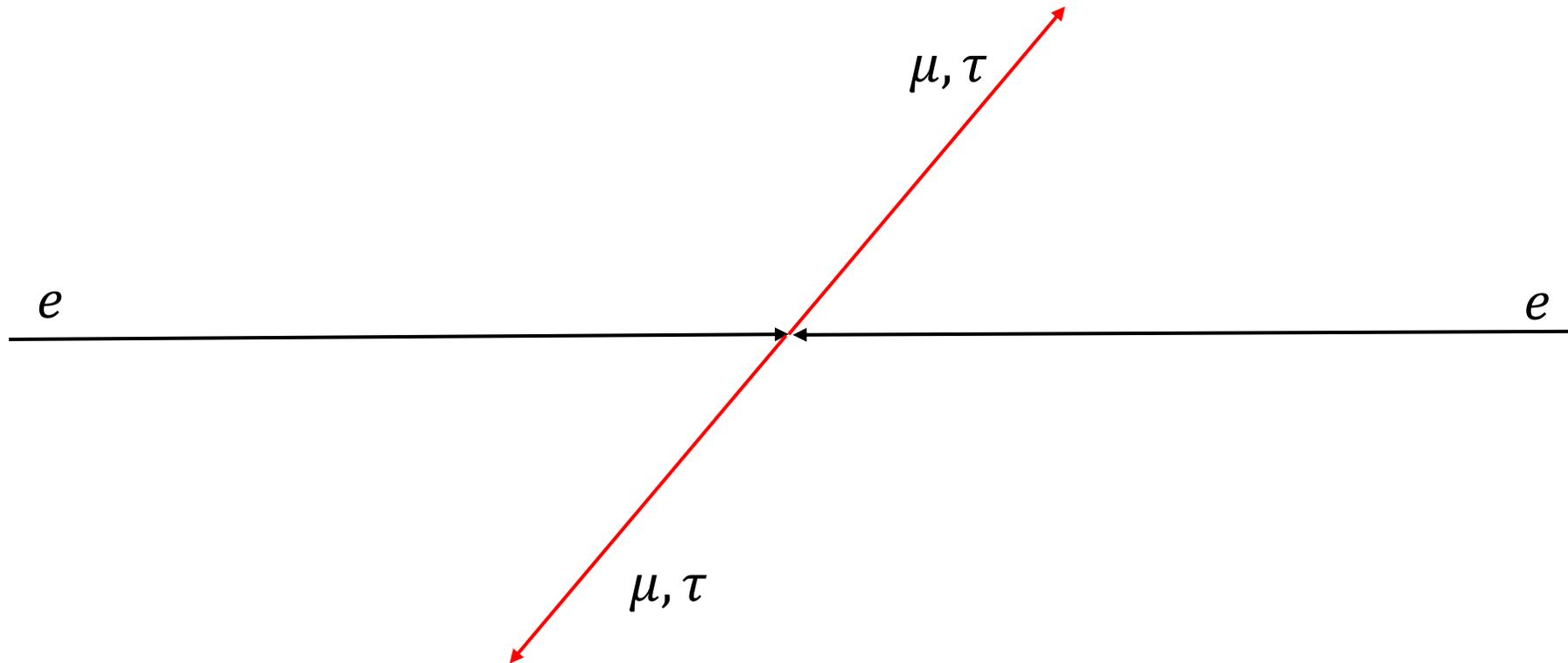
2光子過程 ($ee \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow eeff$)



B以外の素粒子も十分大量に

Initial State Radiation (ISR)

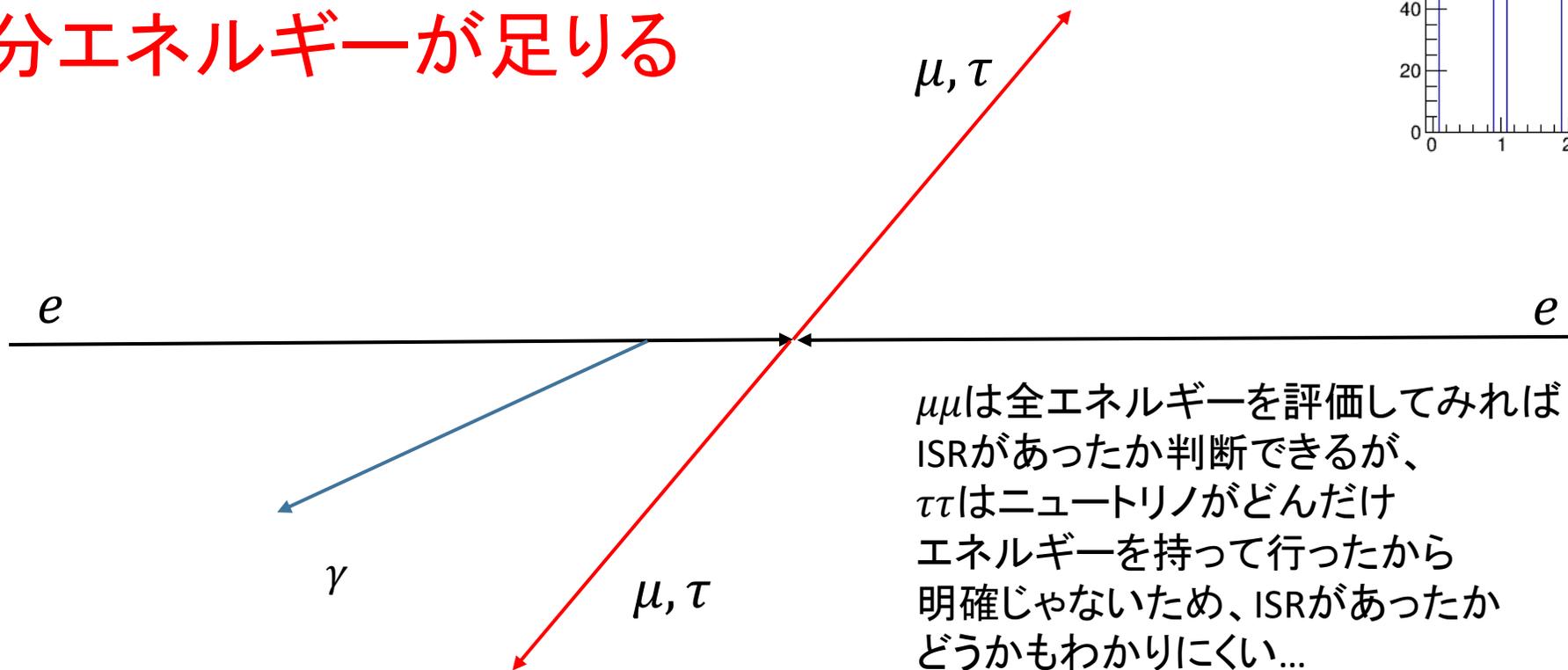
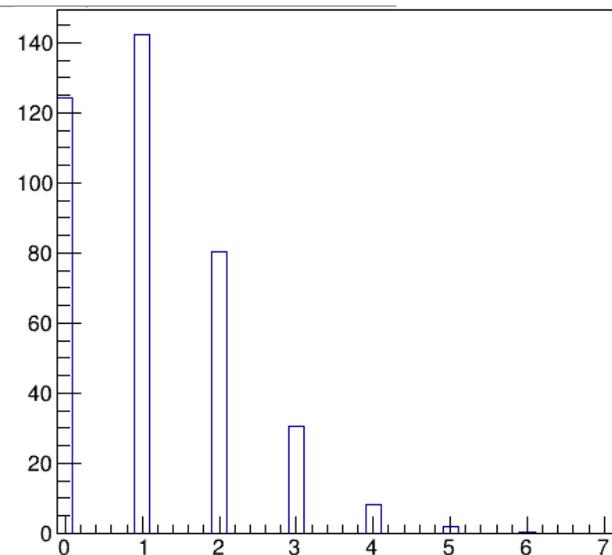
$\tau\tau$ とか $\mu\mu$ とかはBファクトリーのエネルギー
10.6GeVに比べると十分に軽い



Initial State Radiation (ISR)

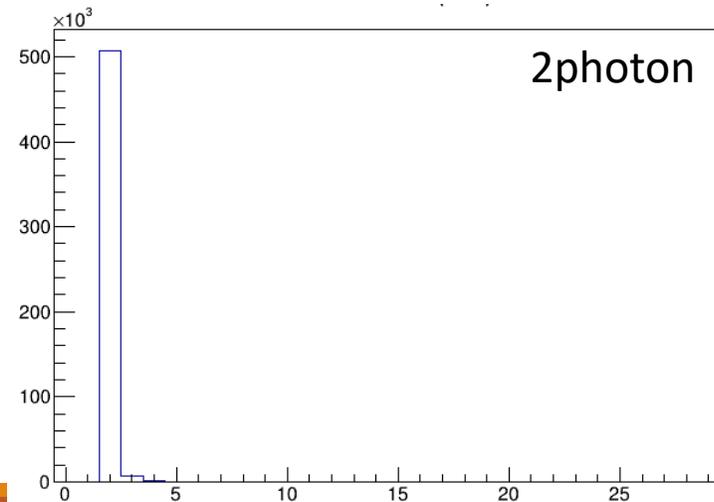
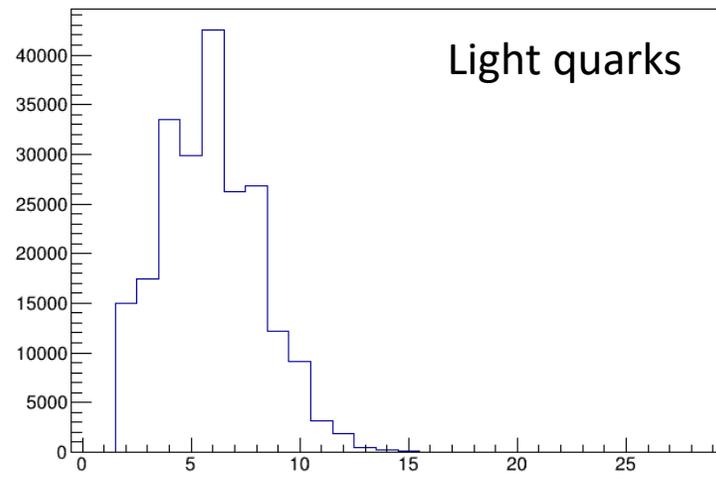
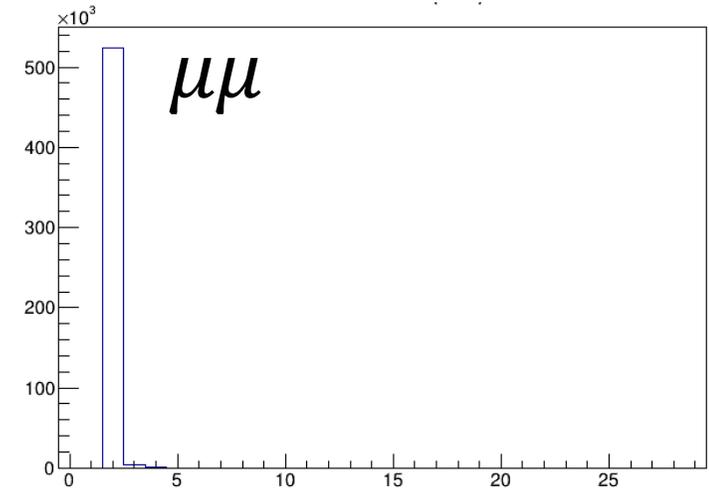
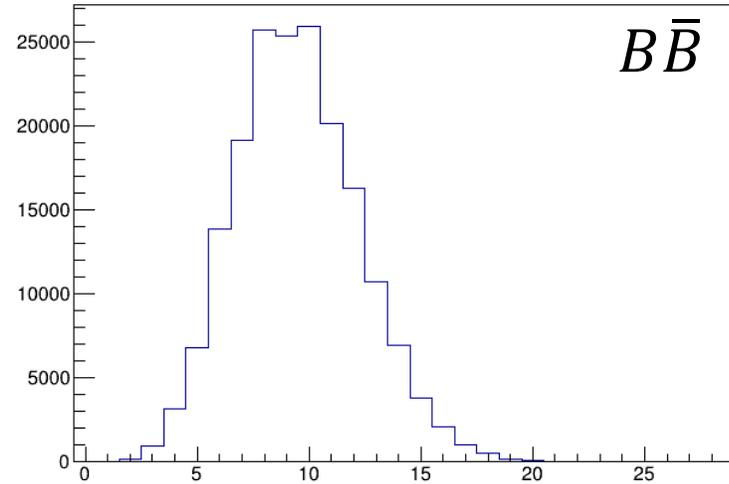
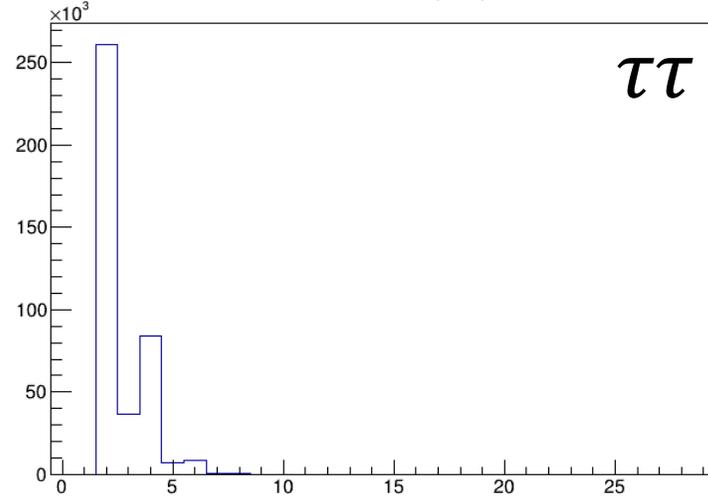
$\tau\tau$ とか $\mu\mu$ とかはBファクトリーのエネルギー
10.6GeVに比べると十分に軽い

ぶつかる前に γ 出しても
十分エネルギーが足りる



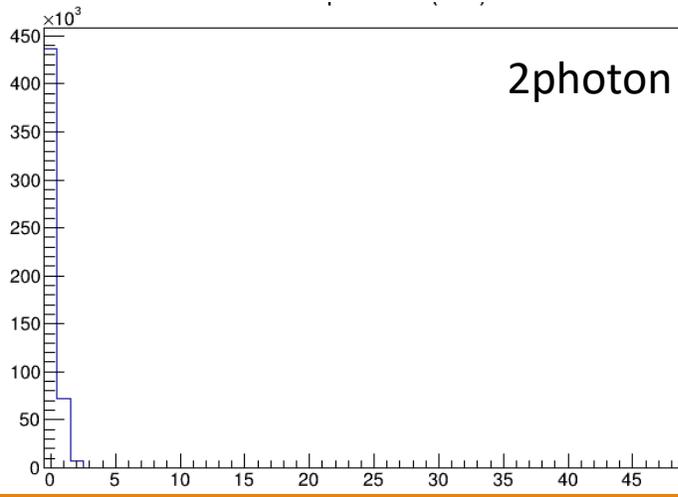
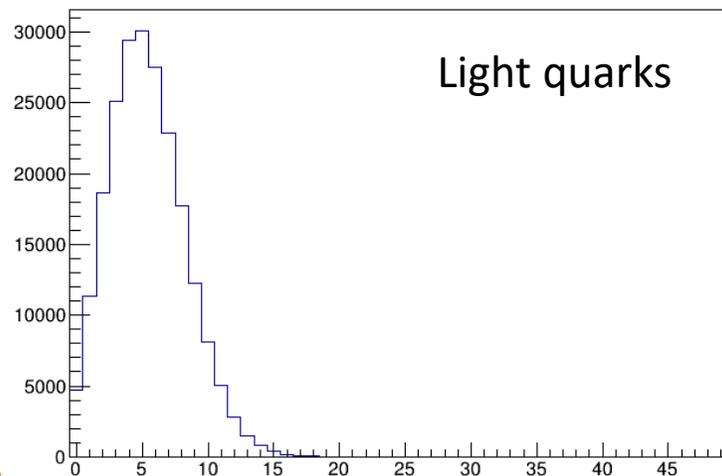
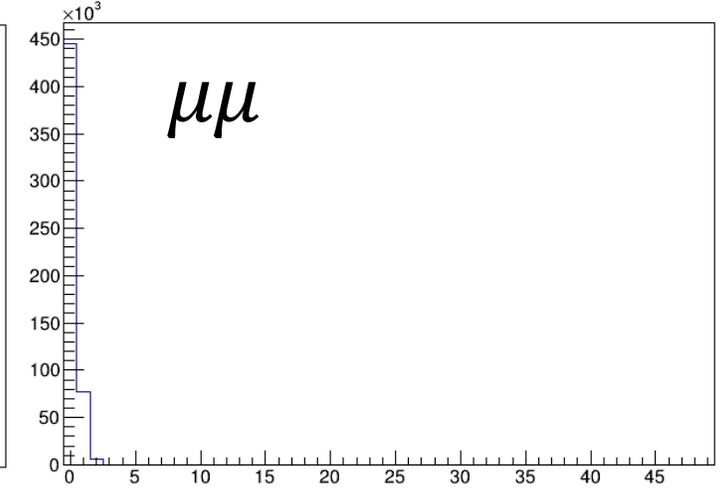
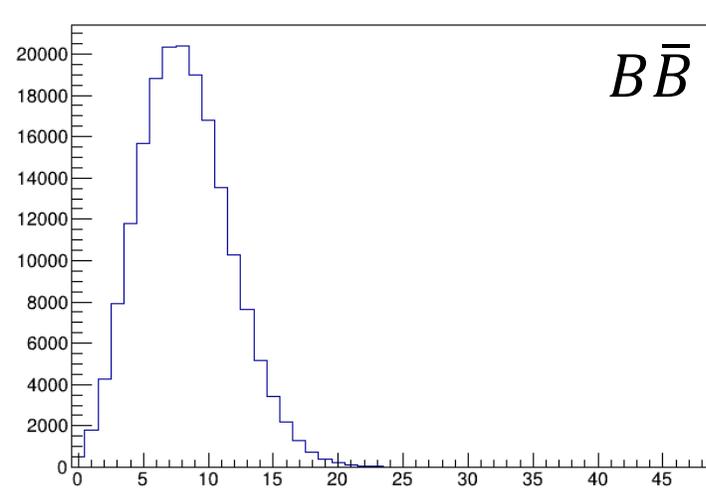
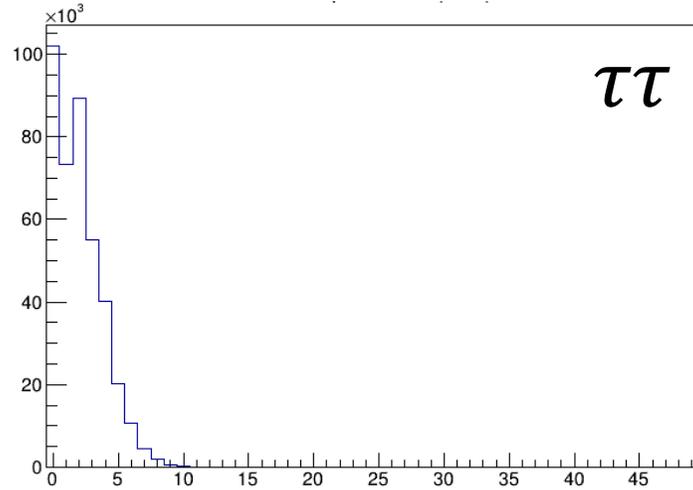
実際どう見えているのか？(1)

荷電粒子の本数 No. of tracks (MC)



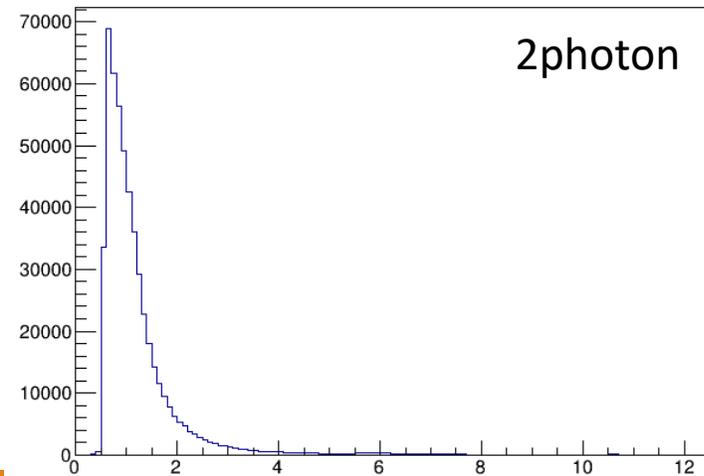
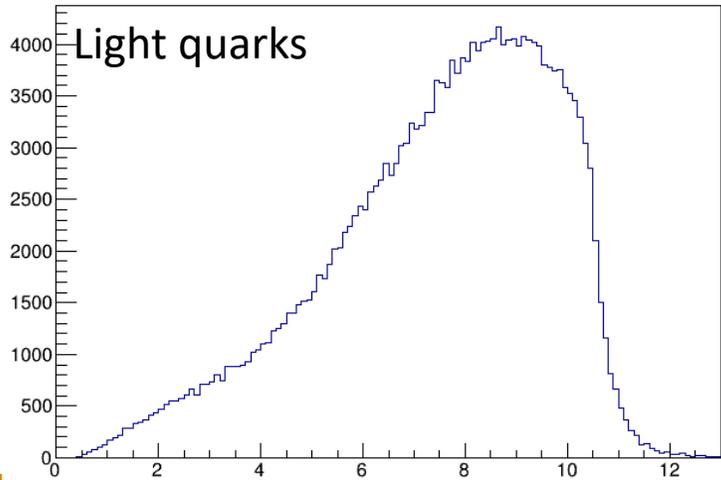
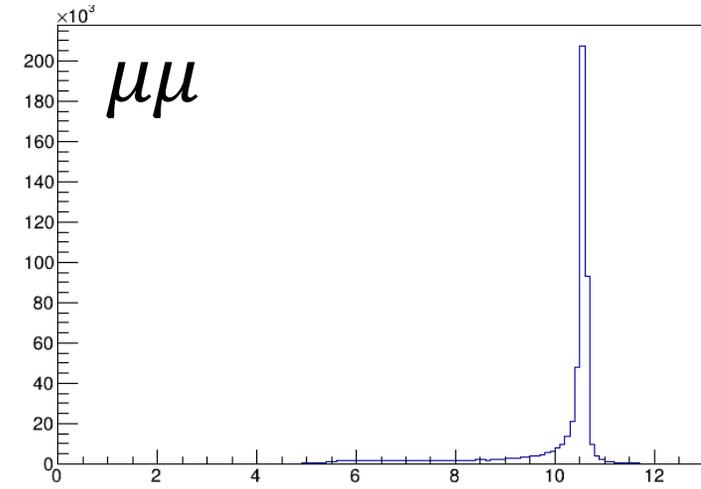
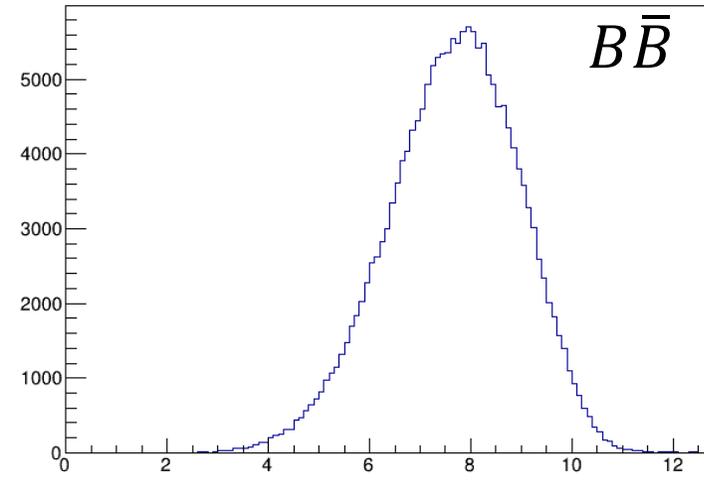
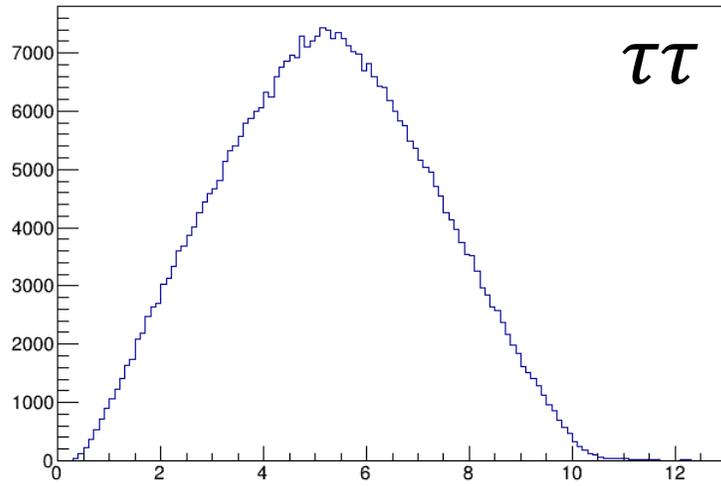
実際どう見えているのか？(2)

光子の本数($E > 100\text{MeV}$)



実際どう見えているのか？(3)

検出された粒子のエネルギーの総和(重心系)



タウのいいところ・わるいところ

荷電粒子の本数がクォーク事象に比べて少ない

(光子の数も少ない)のでクォーク事象と区別しやすい 一方で、タウの崩壊では必ず(*)ニュートリノを伴うので、タウの完全再構成は不可能

- ほぼ1 prongなので、親タウの情報はあまりない。

(エネルギーが低いのもニュートリノが検出されないせい)

Bファクトリーの $\sqrt{s}=10.6$ GeVに比べてタウペア3.5GeVはかなり低いのでタウは高運動量で生成される。(Y(4S)じゃないエネルギーのときもタウのデータはとれる)

(B中間子はほぼ止まってる)→どっちのタウの子か分離しやすい

タウの方向はよくわかんない

*SMの範囲内で

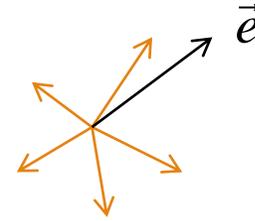


Thrust と thrust軸

とある軸に対して
運動量を射影

$$T = \frac{\sum |\vec{p}_i \cdot \vec{e}|}{\sum |\vec{p}_i|}$$

見えている荷電粒子
光子全ての和

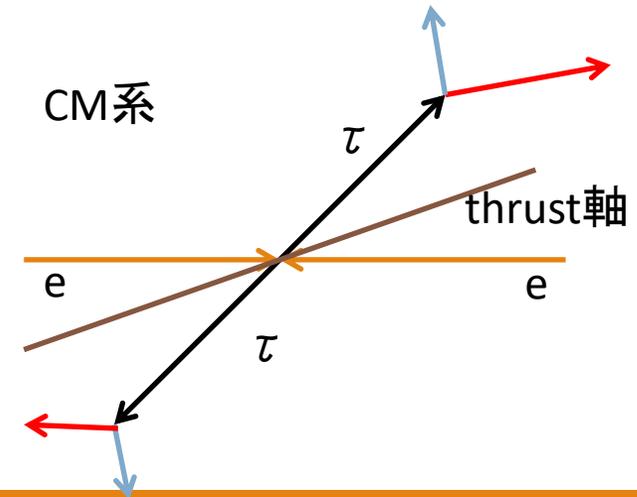


いろいろな \vec{e} に対して T を計算して
最も大きな T を与える \vec{e} を向きとして
大きさを T とするベクトルを Thrust vector
と呼ぶ。

→見えている荷電粒子、光子が
一番運動量を落とす方向

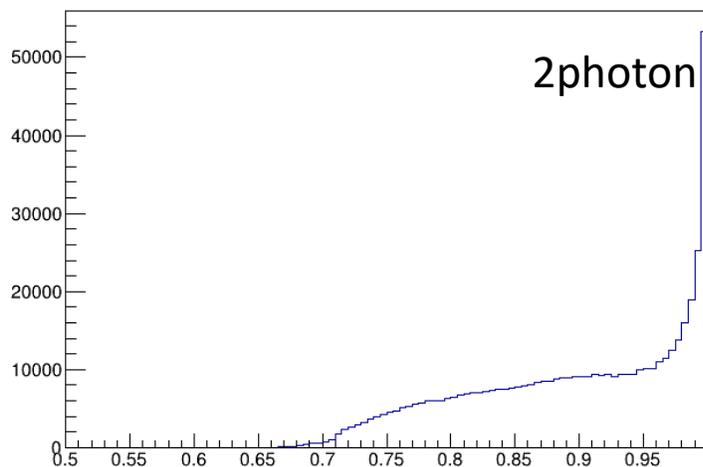
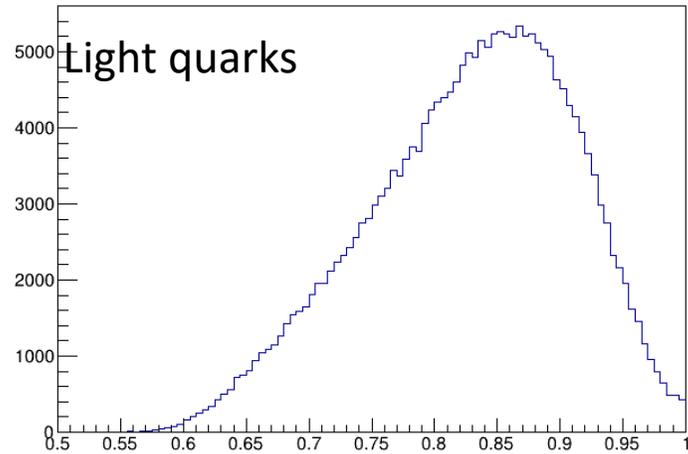
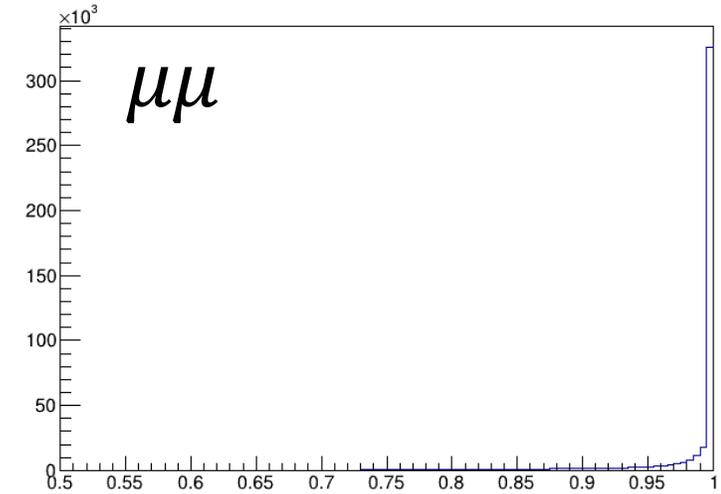
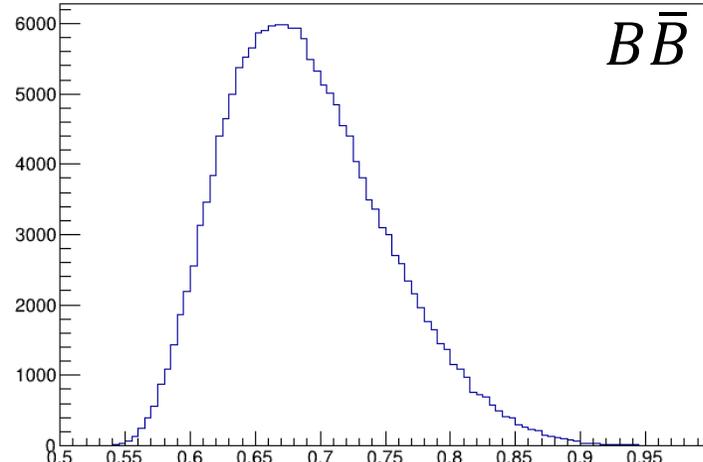
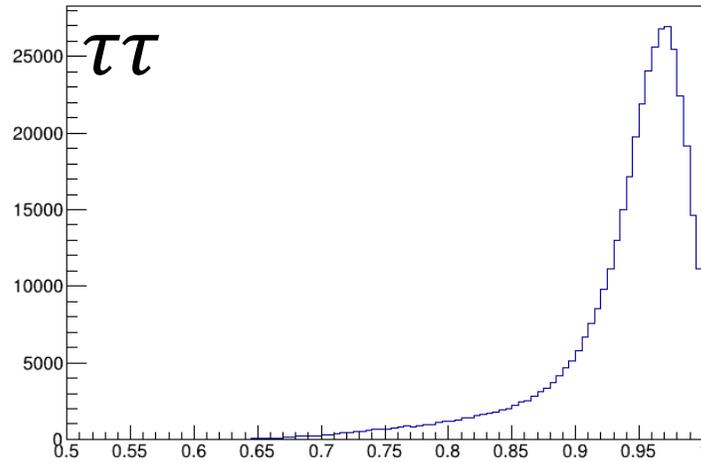
似たような概念に、acoplanarityと
sphericityがある。

τ 対事象は、ニュートリノが
あって、 τ の方向が決められない
ので、その“代用品”として便利



実際どう見えているのか？(4)

検出された粒子のエネルギーの総和(重心系)



タウ事象の特徴(まとめ)

trackの本数 (photonの数)

Bhabha, $\mu\mu \lesssim 2\text{photon} \lesssim \tau\tau \ll q\bar{q}$

Total energy (逆の相関: 欠損運動量)

$2\text{photon} \ll \tau\tau < q\bar{q} < \text{Bhabha}, \mu\mu$

size of thrust vector

$q\bar{q} < \tau\tau < \text{Bhabha}, \mu\mu$

※欠損運動量: ビームエネルギーから観測された運動量を差し引いたもの
レプトンコライダーならではの情報
同様に欠損エネルギー、欠損質量がある。

タウ事象は、タウ自身を再構成できないために、
上記のような条件から、タウ事象からその他の事象を棄却

τ 対事象の方向が決まらない...?

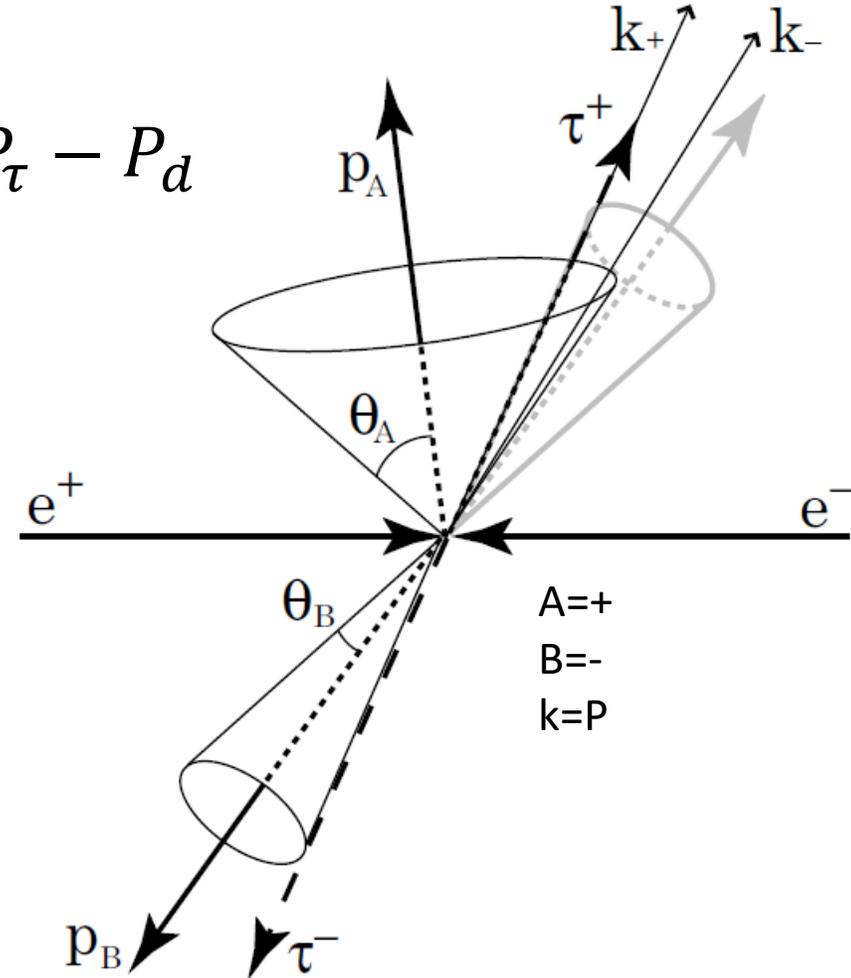
τ がハドロン崩壊しているとき (= ν 1個)

親 τ と娘 d との運動量の開き角は

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

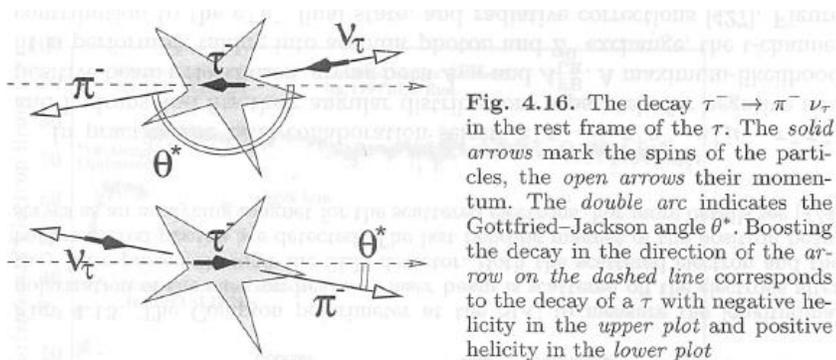
e^+e^- の重心系においては、 τ^+ or τ^- のエネルギーは e^+ or e^- に等しい。従って、 τ の運動量の大きさも計算可能。子供の運動量は測定可能。
片方はニュートリノ。

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

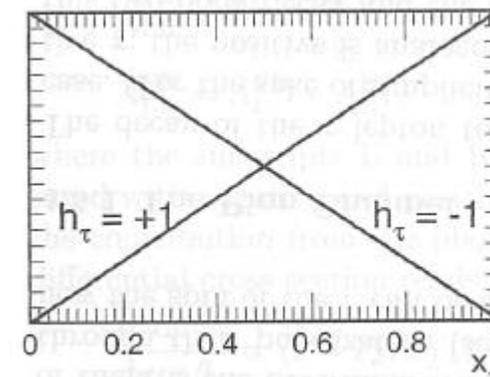
最も簡単な $\tau \rightarrow \pi \nu$ 崩壊



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

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、 $x_\pi = E_\pi/E_{\text{beam}}$



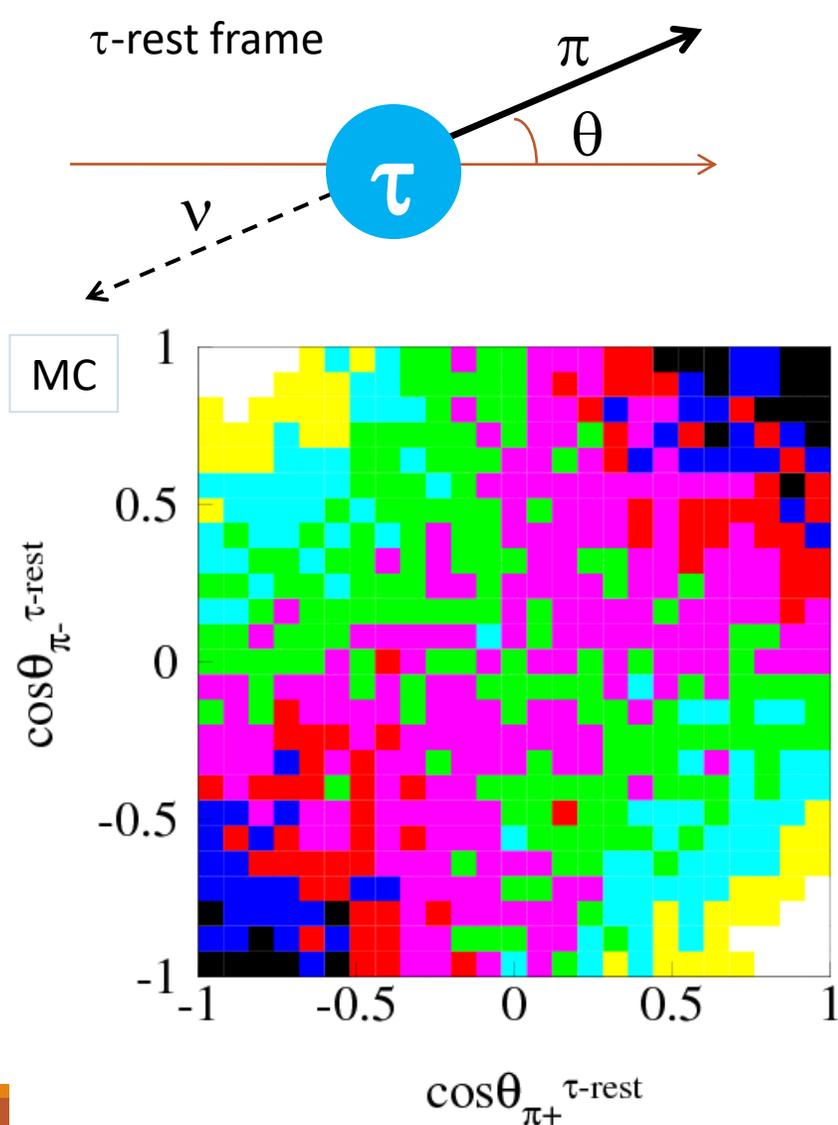
$$\frac{d\Gamma}{dx_\pi} \propto 1 + h_\tau (2x_\pi - 1).$$

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)

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

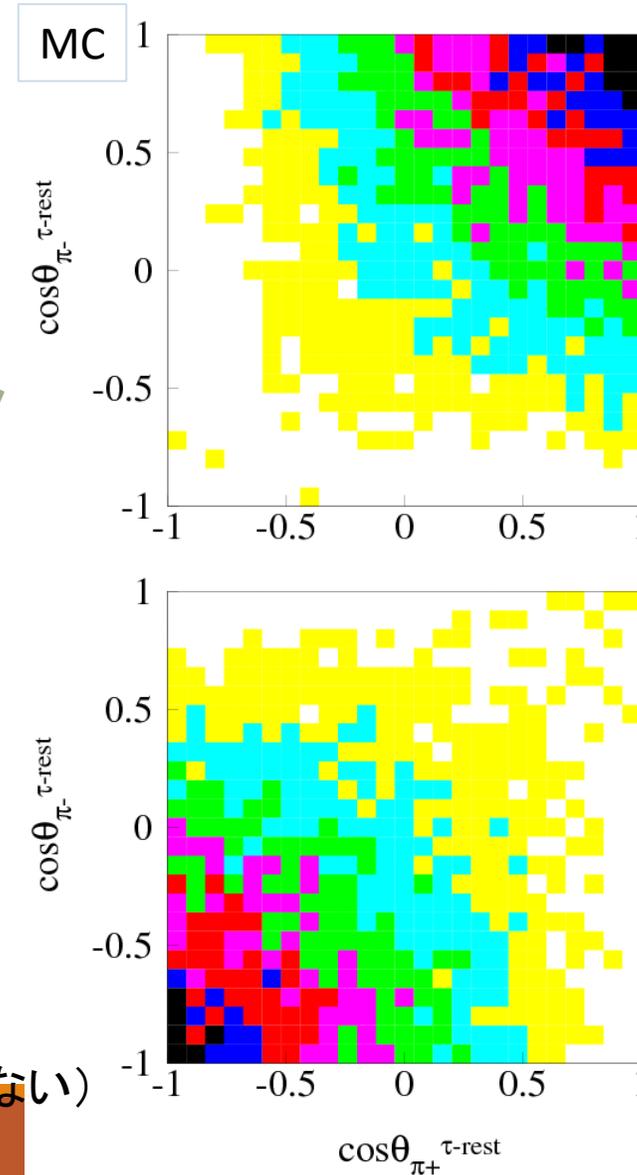
$$\frac{d\Gamma}{dx_\pi} \propto 1 + h_\tau (2x_\pi - 1)$$



hel. of $\tau^- = 1$

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

黒(多い) \Leftrightarrow 白(少ない)



同様な
関係が
 x_π にも
ある。

x_π は
測定可

タウレプトンの研究課題

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}

その他 (地味系)

- 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, ...
- 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

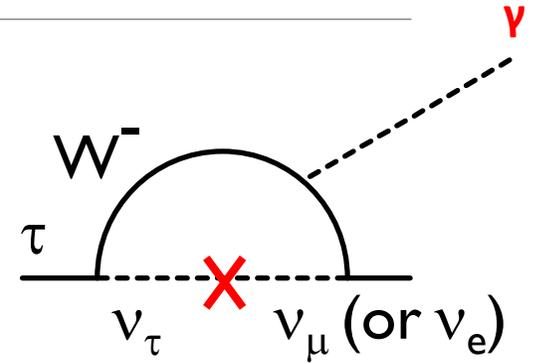
(もう見飽きてるとは思いますが...)

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

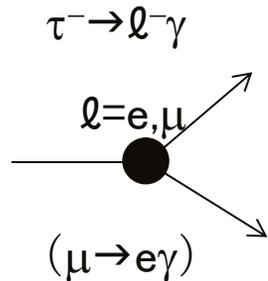
☆ただ、ニュートリノ振動が起源では実験的にはほとんど発見不可能



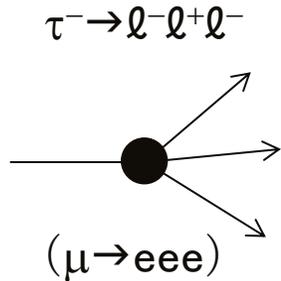
$$Br(\tau \rightarrow \ell \gamma)_{SM} \propto \left(\frac{\delta m_\nu^2}{m_W^2} \right)^2 \sim 10^{-40} \quad (\text{EPJC8 513(1999)})$$

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

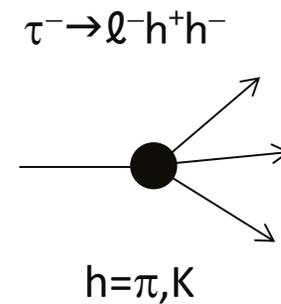
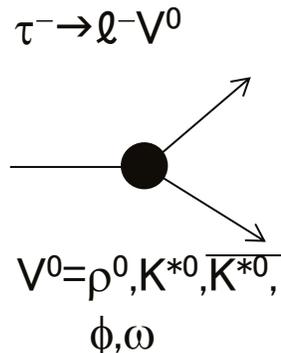
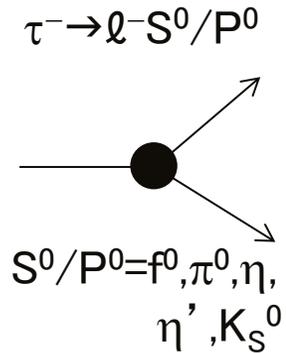
τ LFVでは、どんなモードが考えられる？



一番あり得そうなモード



一番解析が楽なモード

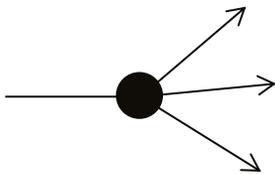


($\mu \rightarrow e$ conversion)

さらには...

μ LFV では考えられないような「ゲテモノ」も

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

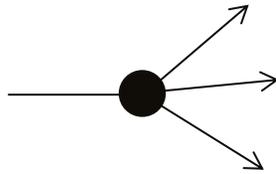


doubly LFV decay

total LF variation: 4

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

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

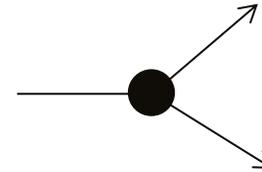


LNV decay

LNV:

lepton number violation

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



LNV&BNV decay

BNV: Baryon number violation

$\tau \rightarrow p + \dots$ について

個人的には意義が薄いと思っています。

LHCでもBelleでもやりましたが。

look for BNV processes in τ , charm, B , and maybe in the future in top decays. Although we find that all BNV processes involving τ and higher generation quarks are too strongly suppressed by proton stability, such that there seems no hope for observation at any future machine, redundancy is very important. In this vein, we

Baryon number violation involving higher generations,
Wei-Shu Hou, Makiko Nagashima, Andrea Soddu,
Phys.Rev.D 72 (2005) 095001

Once the effective action has been constructed we have proceeded to analyse proton decay in this framework, together with correlated tau decays into baryons (plus mesons or leptons). As expected the strong bound on the decay of the proton dominates clearly the information on the couplings of the theory. Moreover it pushes any $\Delta B = \Delta L = 1$ tau decay beyond the reach of any foreseen facility. However this should not discourage the experimental hunt for those

Instanton-mediated baryon number violation in non-universal gauge extended models,
Javier Fuentes-Martin, J. Portoles, P. Ruiz-Femenia, JHEP 01 (2015) 134

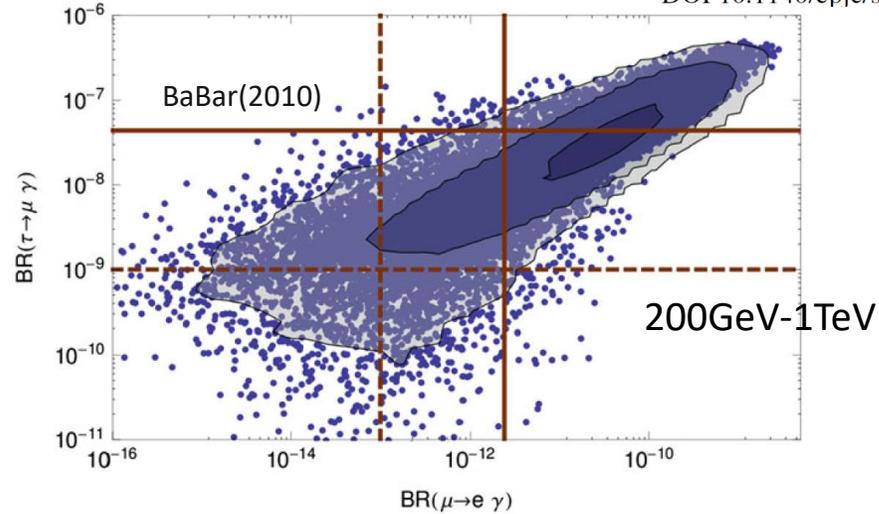


$\tau \rightarrow \mu \gamma$ の予言

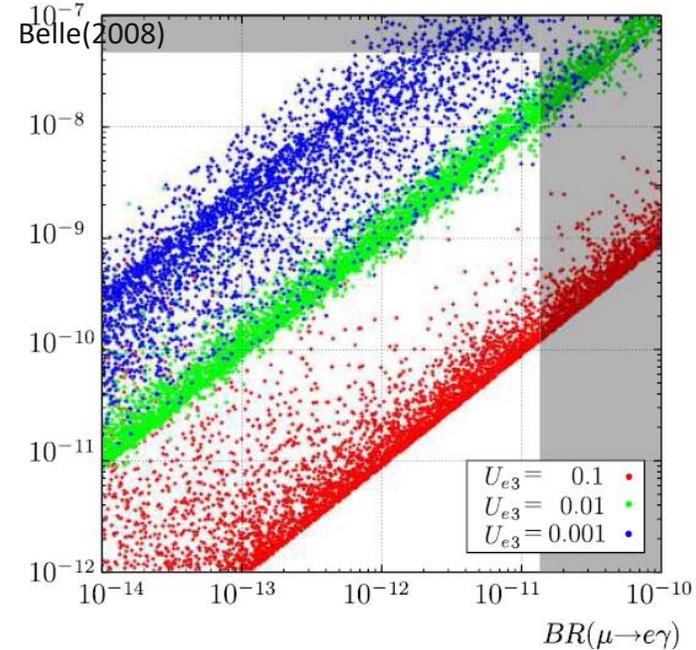
Gianluca Blankenburg^{1,2}, Gino Isidori^{2,3,a}, Joel Jones-Pérez² SUSY SU(5) GUT

$U(3)^5$ flavor symmetry:

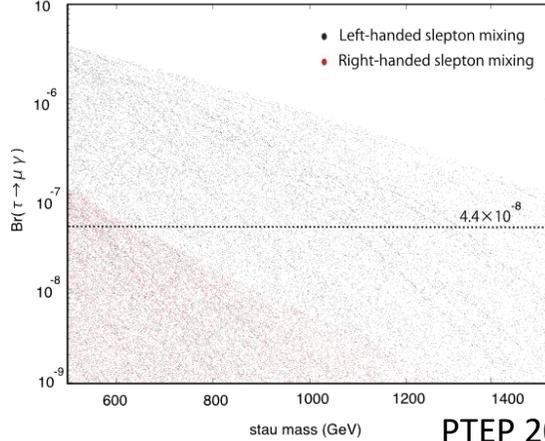
MEG(2011) Eur. Phys. J. C (2012) 72:2126
DOI 10.1140/epjc/s10052-012-2126-7



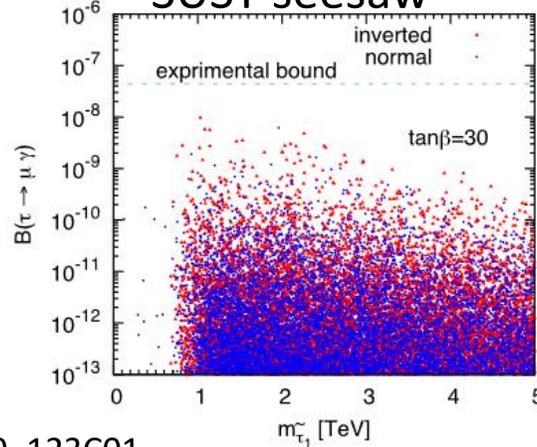
BR($\tau \rightarrow \mu \gamma$) MEGA(2002,1999)



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)

PTEP 2019, 123C01



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

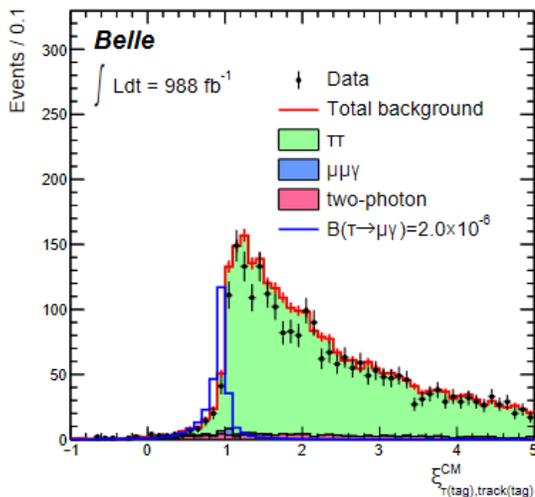
$988\text{fb}^{-1} / N_{\tau\tau} = 9.12 \times 10^8$ ($Y(1S, 2S, 3S, 4S, 5S)\dots$) [JHEP 2110, 019 \(2021\)](#)

※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

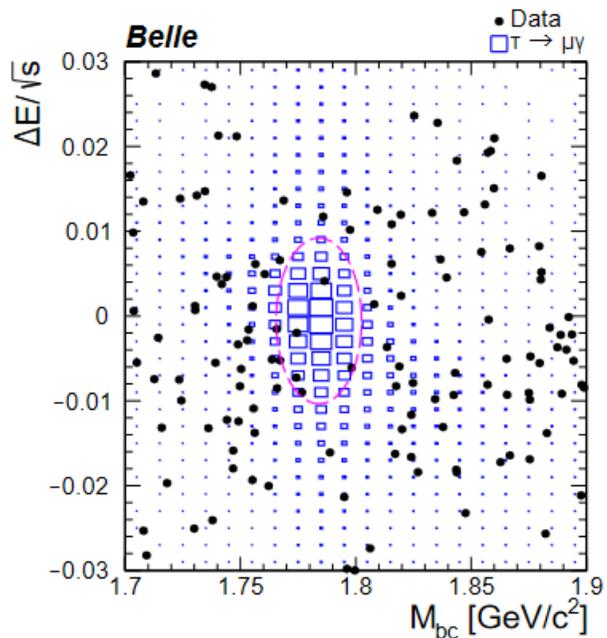
Targetの分岐比が $O(10^{-8})$ に対して $\text{BF}(\tau \rightarrow \ell\nu\nu) \sim 17\%$

KinematicalにISRが出ている事象を落とせないか？



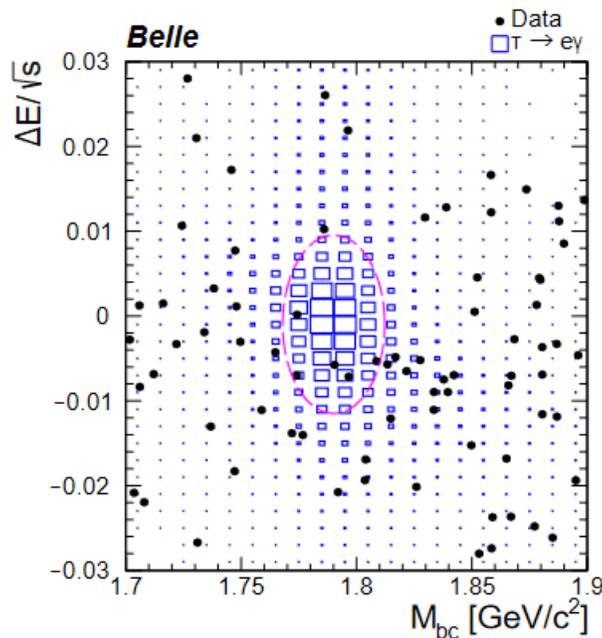
新しい量: 信号なら反対側の τ とその娘の開き角の \cos になる量。ただし、エネルギー-運動量保存則をこねくりまわしてビーム重心系で2つの τ がBack-to-backになってないと矛盾する量→ISRがあると矛盾

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

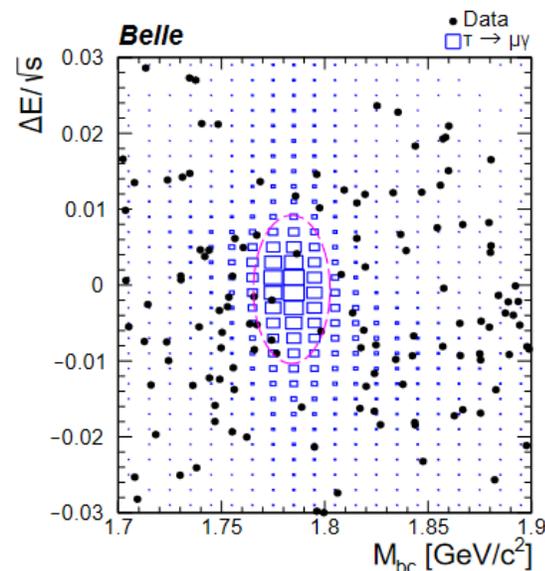
「extra γ の起源の9割はISR, 残りはBeamBG」

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

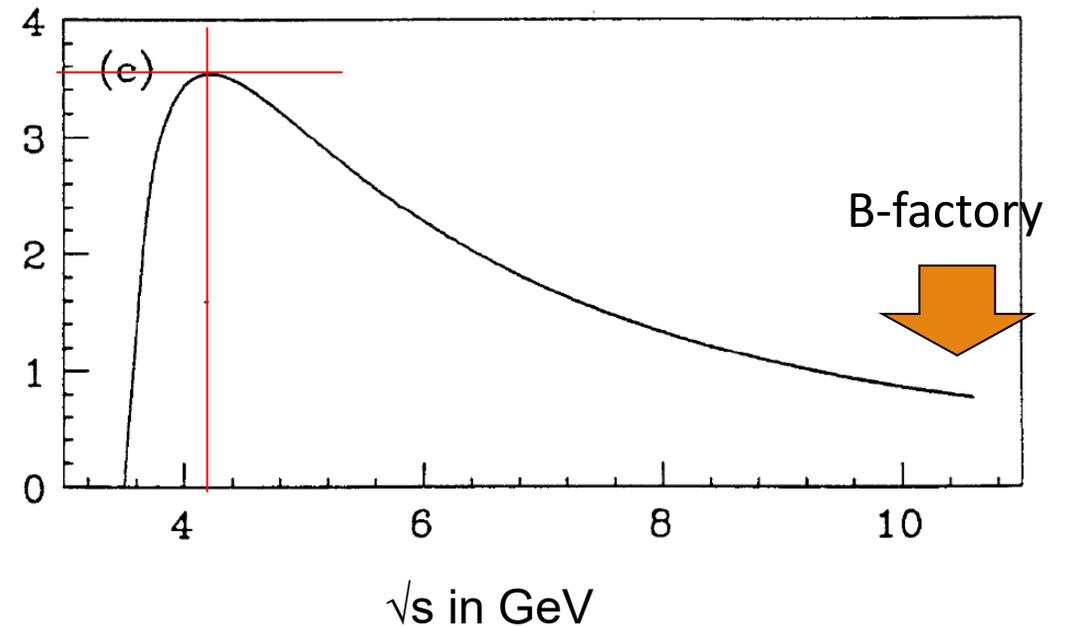
さらなるアイデアとして低いエネルギーでの運転

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](#)

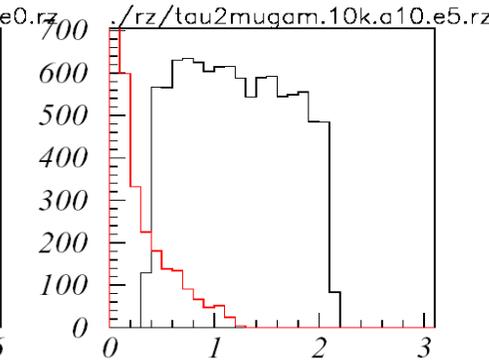
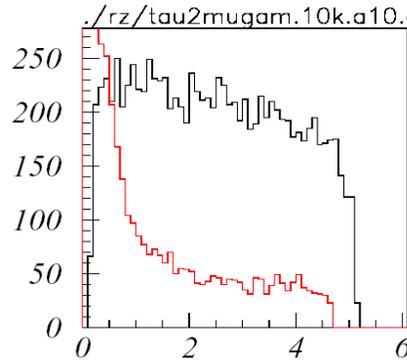
ISR エネルギー分布

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)

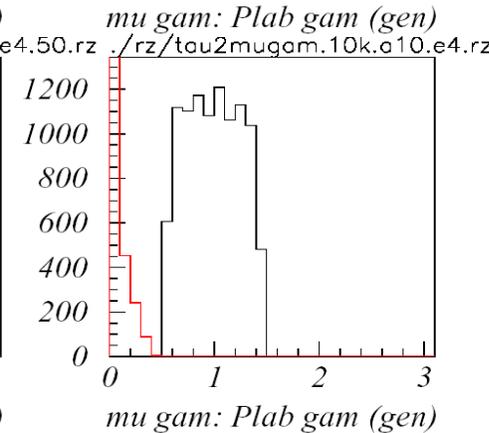
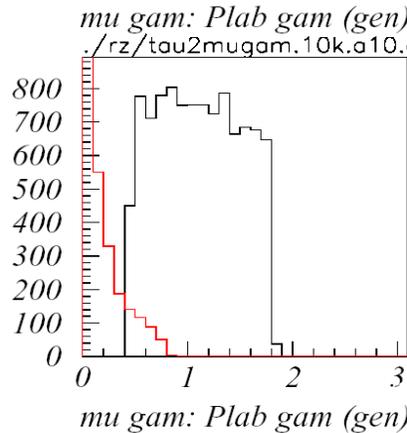
$\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$



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

maximum σ

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



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

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

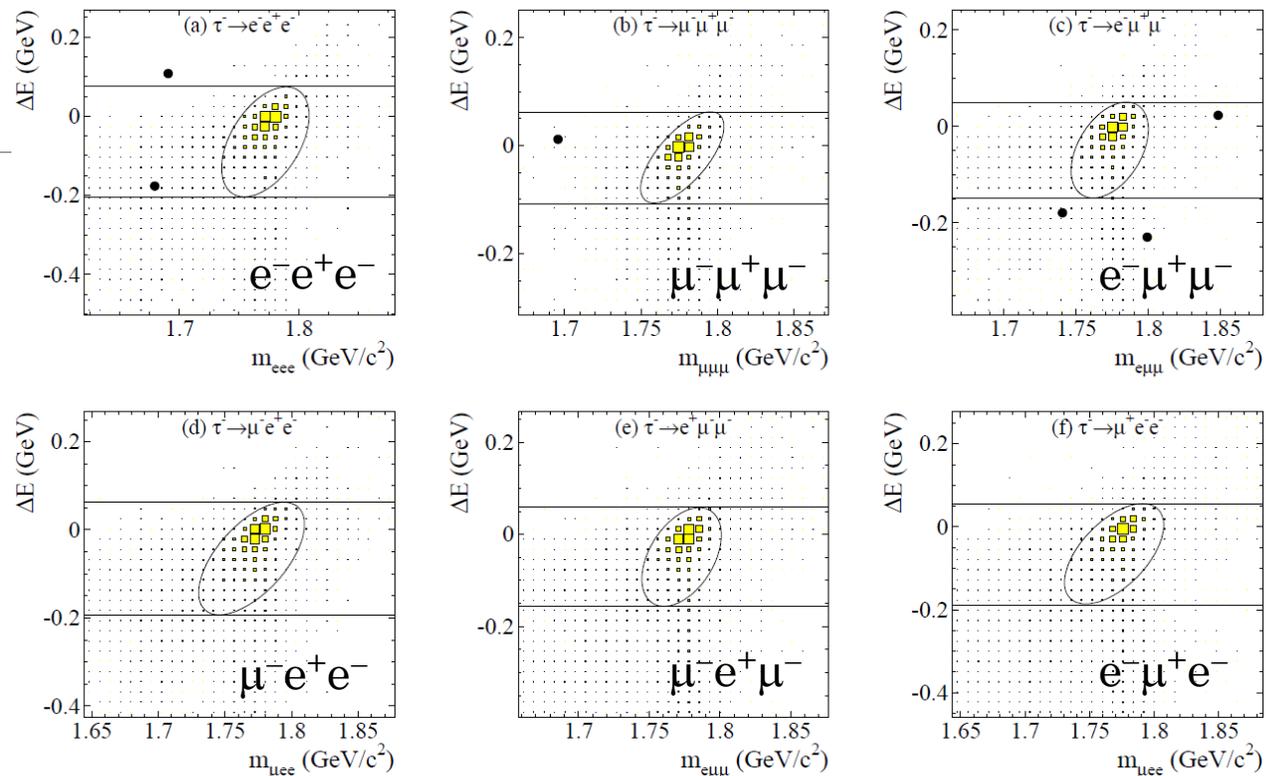
一方 $\tau \rightarrow \ell \ell' \ell''$

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。

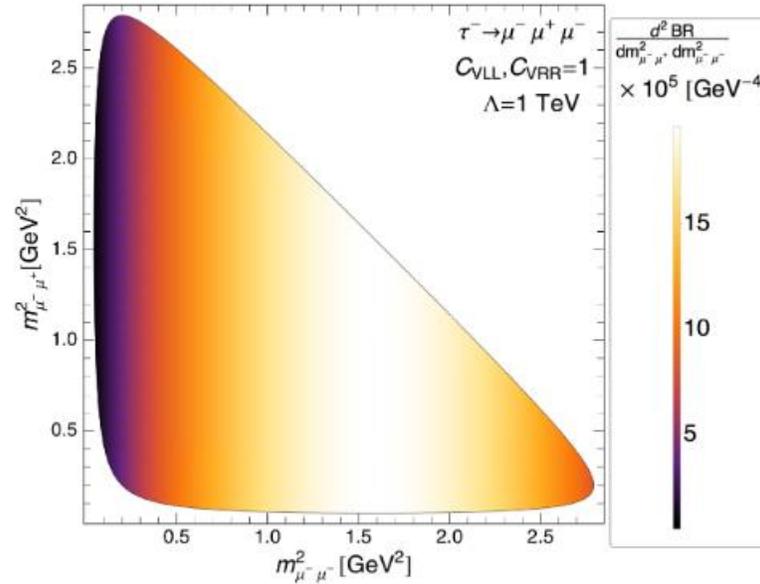
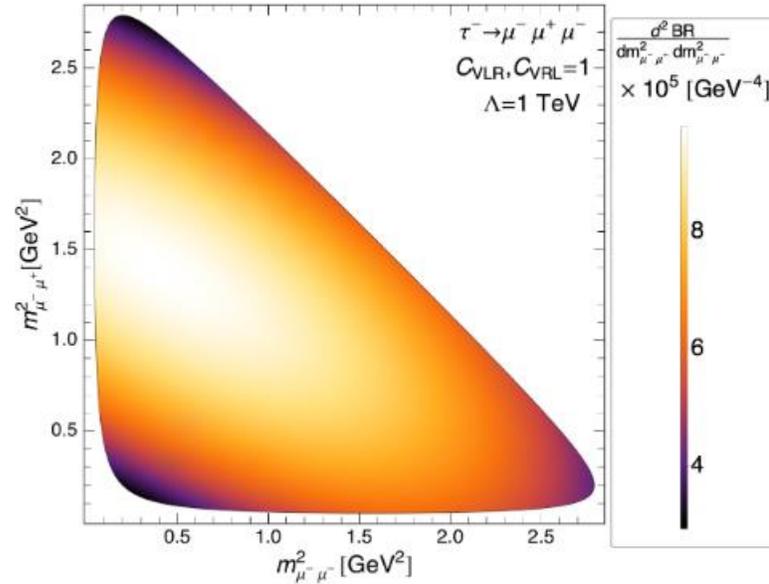
Belle IIでも感度高く解析可能
と思ったらとんでもない結果が
出てきました。



| Mode | ε (%) | $N_{\text{BG}}^{\text{EXP}}$ | 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 |

$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ の寄与の仕方と区別

3つ μ があるのでDalitz analysisが可能



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

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

Alejandro Celis,^{1,*} Vincenzo Cirigliano,^{2,†} and Emilie Passemar^{2,‡}

ILCで有利かも？

Z. Phys. C 68, 25–28 (1995)

A search for the lepton-flavour violating decays

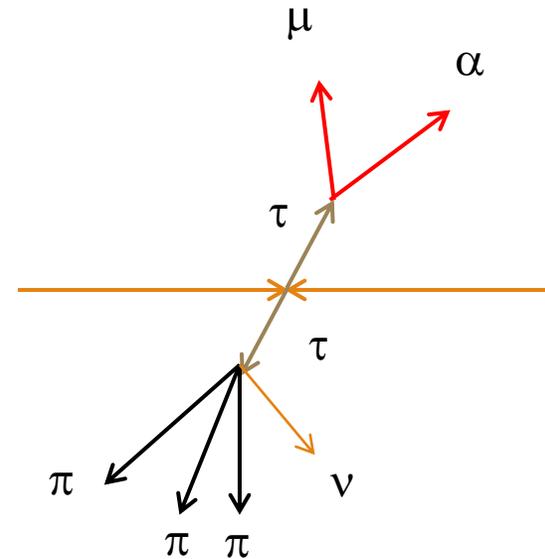
$$\tau \rightarrow e\alpha, \tau \rightarrow \mu\alpha$$

472pb^{-1}

ARGUS Collaboration

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 $3\pi\nu$ 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 $\tau \rightarrow 3\pi\nu$ 崩壊はほぼ $\tau \rightarrow a_1\nu$ からきている。

$$a_1(1260) \quad I^G(J^{PC}) = 1^-(1^{++})$$

See also our review under the $a_1(1260)$ in PDG 06, Journal of Physics G33 1 (2006).

| | |
|--|--------------------------|
| $a_1(1260)$ MASS | 1230 ± 40 MeV |
| $a_1(1260)$ WIDTH | 250 to 600 MeV |
| <i>D-wave/S-wave</i> AMPLITUDE RATIO IN DECAY OF $a_1(1260) \rightarrow \rho\pi$ | -0.062 ± 0.020 (S = 2.3) |

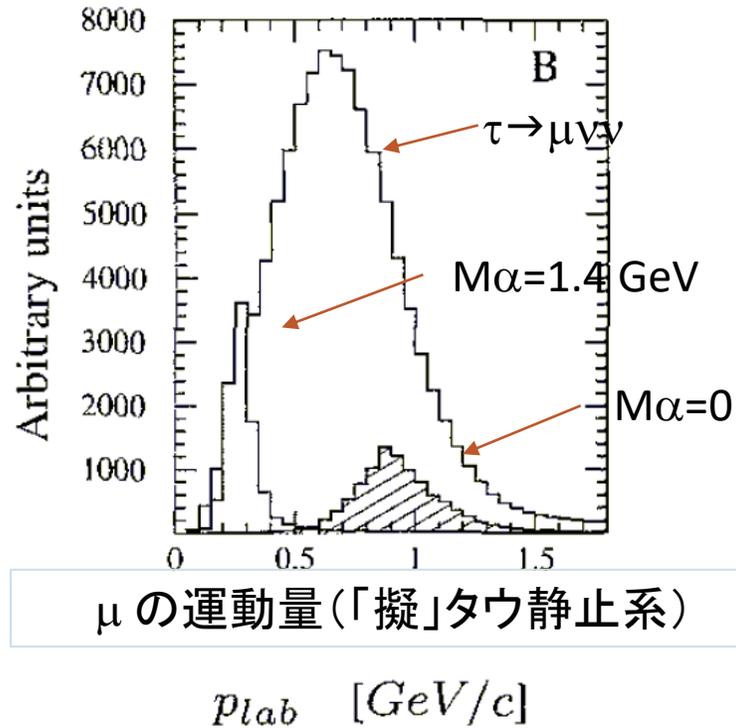
Decay Modes

| Mode | Fraction (Γ_i / Γ) | Scale Factor/ Conf. Level | P (MeV/c) |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------|
| $\Gamma_1 \quad \pi^+\pi^-\pi^0$ | | | 576 |
| $\Gamma_2 \quad \pi^0\pi^0\pi^0$ | | | 577 |

a_1 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 a_1 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 $\text{Br}(\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu)$ は結構大きい (~10%)

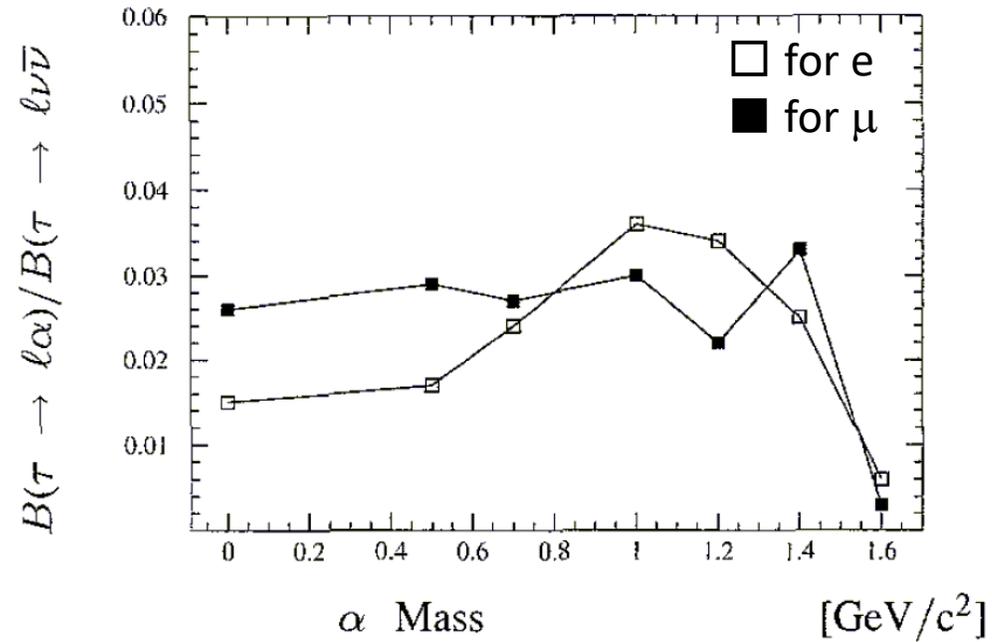
信号と背景事象

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



向きを a_1 , エネルギーを v_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?

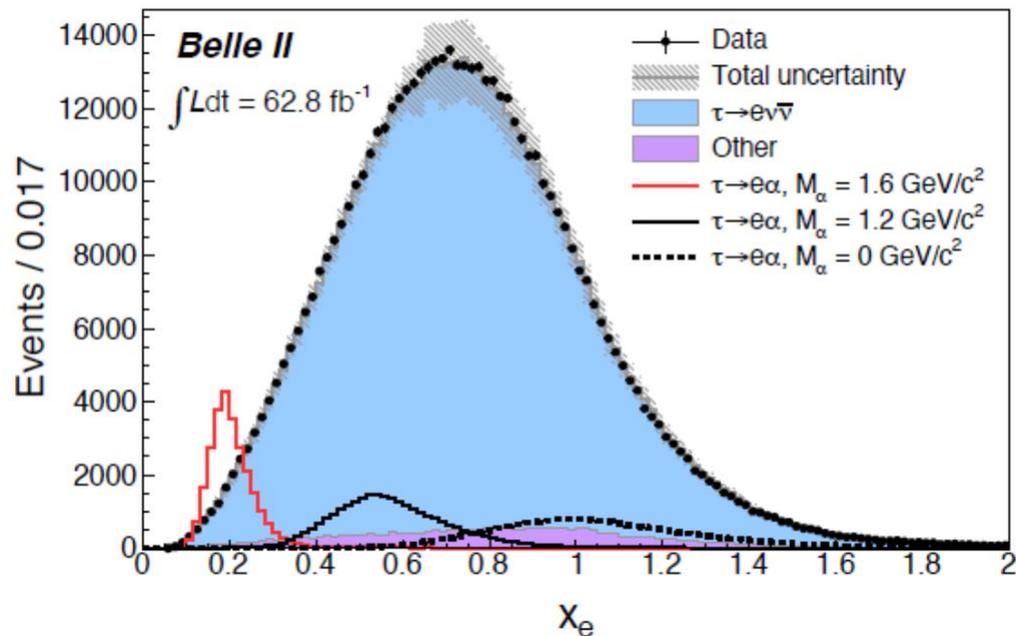
結果



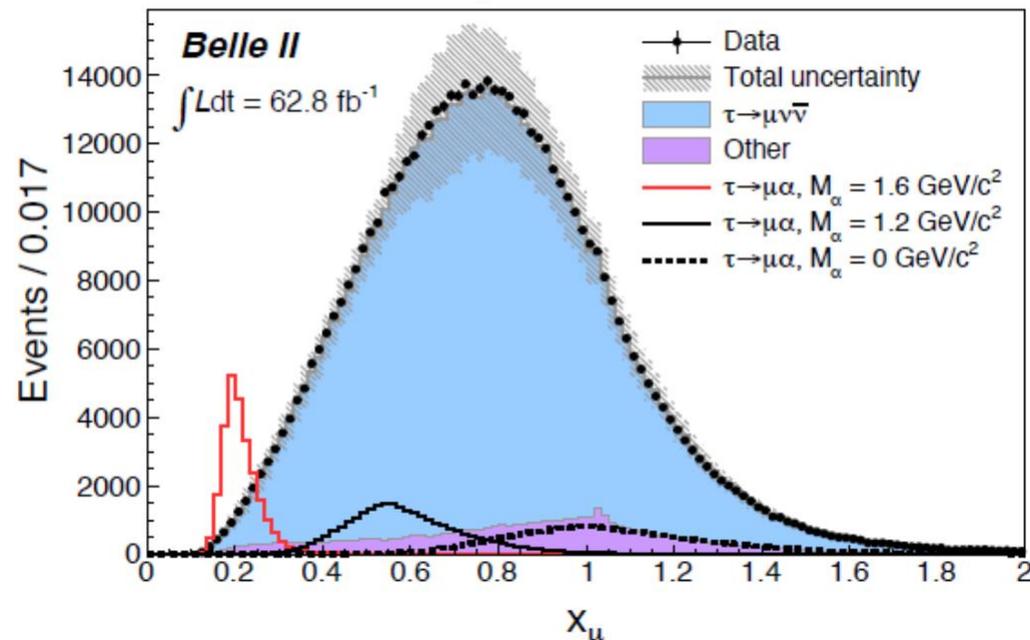
472pb⁻¹ data:
=4x10⁵ τ -pair
Br($\tau \rightarrow \mu\nu\nu/e\nu\nu$)=17%
UL<0.004 @95%CL

Belle IIから結果が出ました

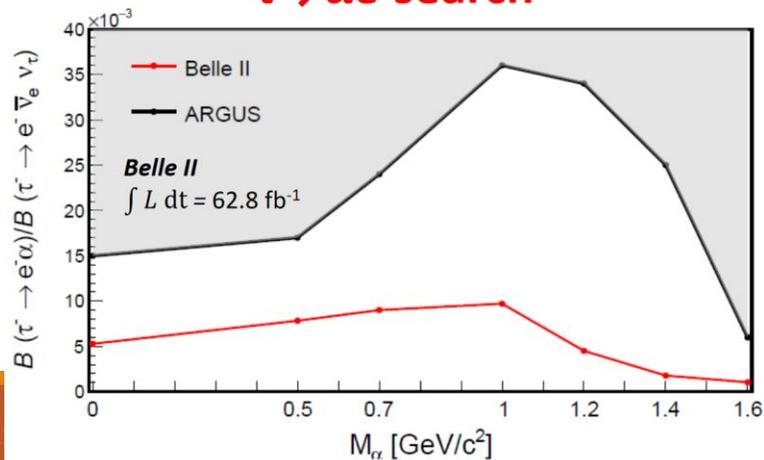
$\tau \rightarrow e\alpha$ search



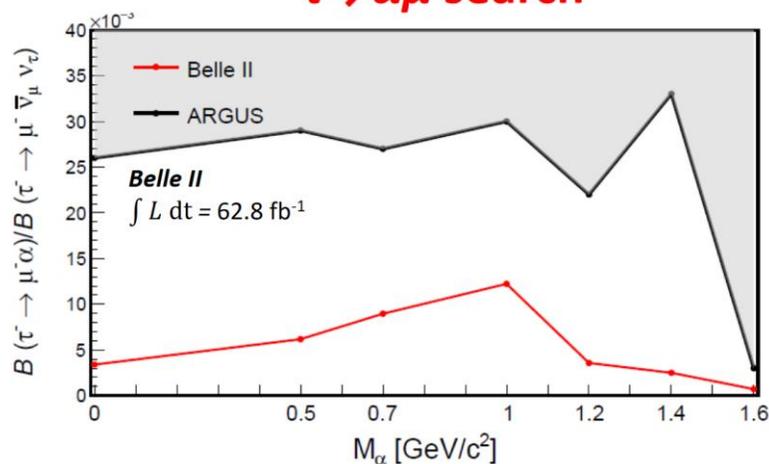
$\tau \rightarrow \mu\alpha$ search



$\tau \rightarrow e\alpha$ search

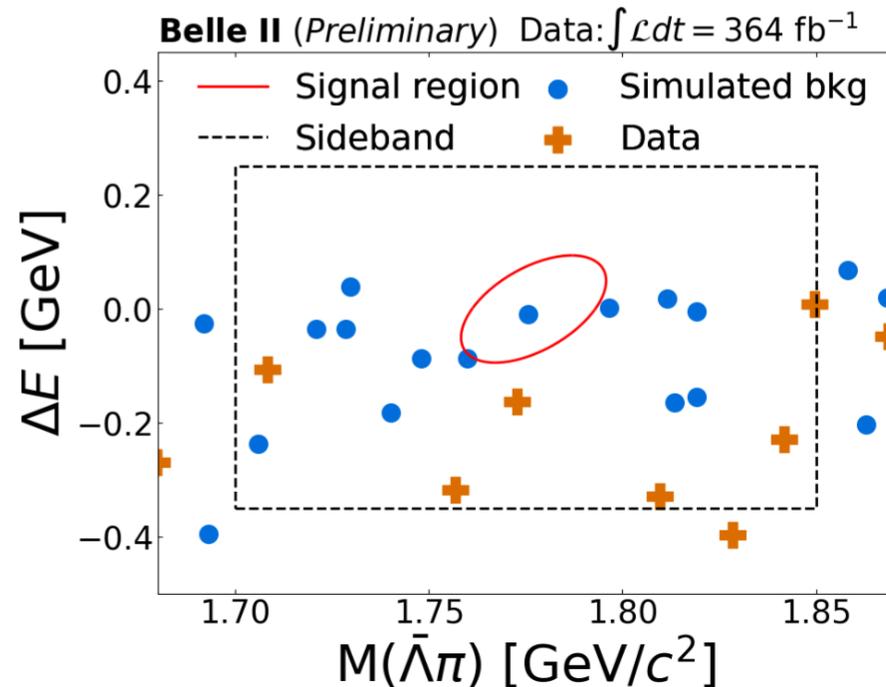
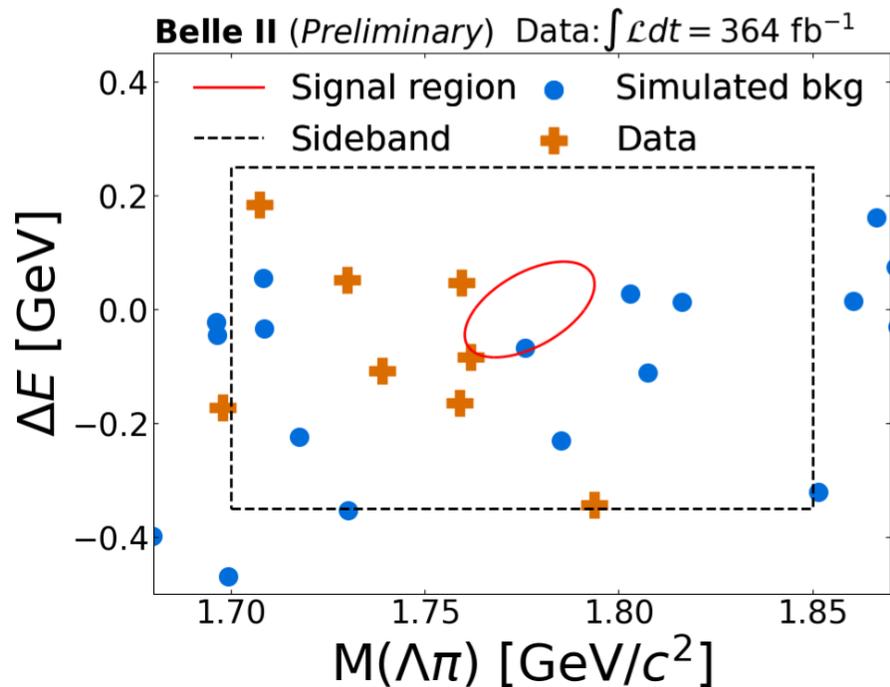


$\tau \rightarrow \mu\alpha$ search



その他にも...

- Signal efficiencies are 9.5% and 9.9% for $\tau \rightarrow \Lambda\pi$ and $\tau \rightarrow \bar{\Lambda}\pi$; Accepted by PRD [2407.05117](#)
- Poisson counting experiment technique in signal region in the $M(\Lambda\pi) = \sqrt{E_{\Lambda\pi}^2 - P_{\Lambda\pi}^2}$ and $\Delta E = E_{\Lambda\pi}^{CM} - \sqrt{s}/2$ plane;
- Expected events are 1 and 0.5 for $\tau \rightarrow \Lambda\pi$ and $\tau \rightarrow \bar{\Lambda}\pi$;
- No observed events;
- **World's best upper limits** at 90% C.L. of 4.7×10^{-8} for $\mathcal{B}(\tau \rightarrow \Lambda\pi)$ and 4.3×10^{-8} for $\mathcal{B}(\tau \rightarrow \bar{\Lambda}\pi)$;

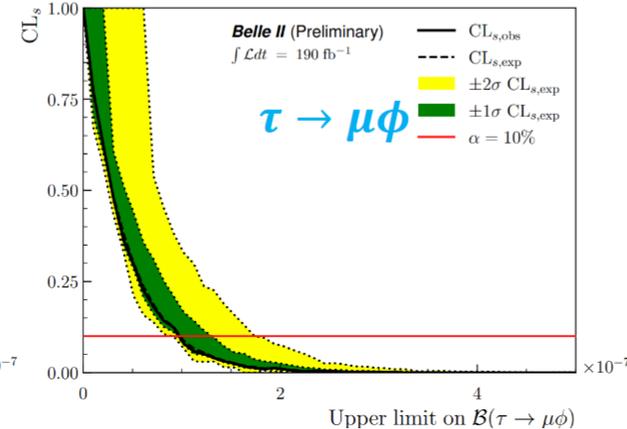
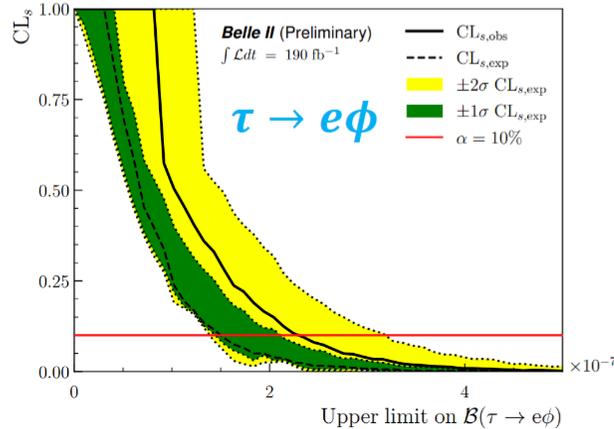
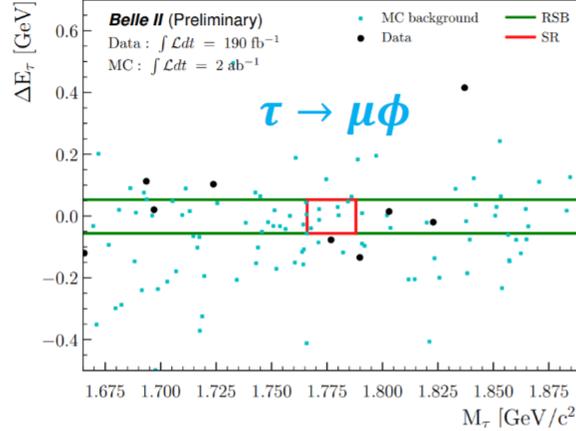
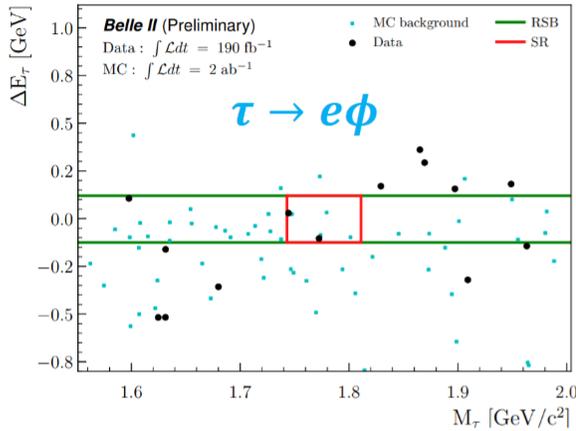


その他にも...

- **Untagged inclusive reconstruction, reconstruct signal side as phi meson + lepton candidate, assign everything else (neutral clusters, tracks) to the rest of event (ROE):**

- higher signal efficiency (~16% improvement), more background;
- backgrounds reduced with pre selections and a BDT trained against $q\bar{q}$ events.

[arXiv:2305.04759](https://arxiv.org/abs/2305.04759)



| Experiment | Lum (fb ⁻¹) | $\mathcal{B}_{UL}^{90}(e\phi) (\times 10^{-8})$ exp. / obs. | $\mathcal{B}_{UL}^{90}(\mu\phi) (\times 10^{-8})$ exp. / obs. |
|------------|-------------------------|--|--|
| BaBar [1] | 451 | 5.0 / 3.1 | 8.2 / 19 |
| Belle | 854 | 4.3 / 3.1 | 4.9 / 8.4 |
| Belle II | 190 | 15 / 23 | 9.9 / 9.7 |

Results not competitive yet (Small data set);

First, successfully untagged strategy approach for tau physics at Belle II;

exploited for other measurements;

[1] B. Aubert, *et al.*, (BaBar Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **103**, 021801 (2009).

Tau CPV, EDM



CPV in tau decays

LFV同様レプトンセクターにCPVは見えていません

→発見 = BSM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CPV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))

どういう形でCPVを見るのか？

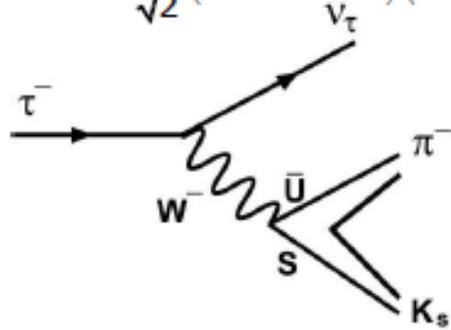
→ τ^+ と τ^- の崩壊で角度分布の違いを見る

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

-Effective Hamiltonian

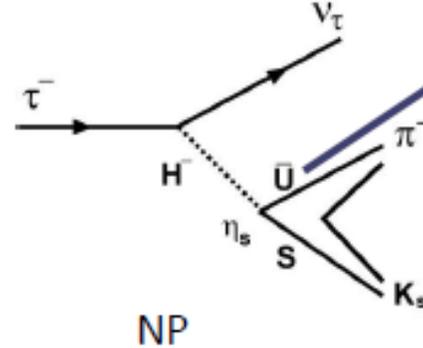
SM

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



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

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

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

形状因子: F (ベクター)
F_s (スカラー)

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

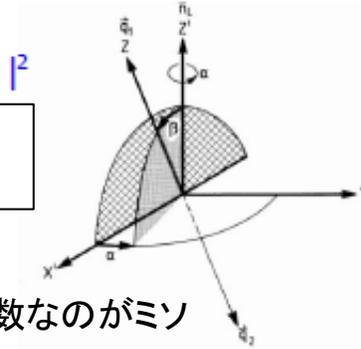
$$F_s(Q^2) \rightarrow F_s(Q^2) = F_s(Q^2) + \frac{\eta_s}{m_\tau} F_H(Q^2)$$

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

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



※ηが複素数なのがミソ

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

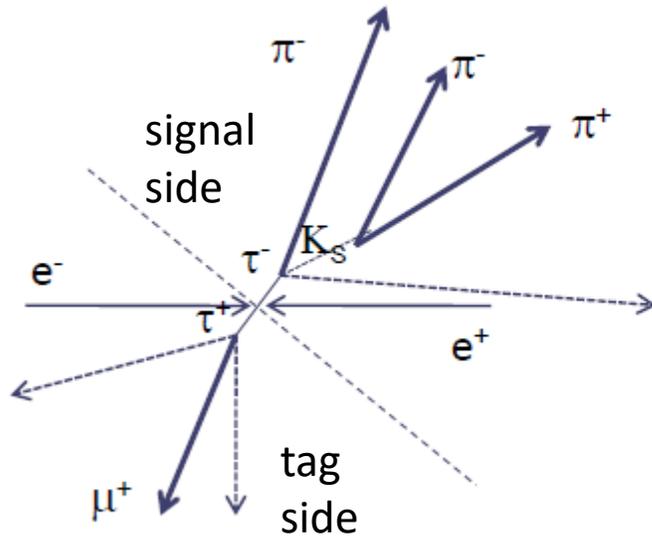
$$A_i^{\text{CP}} = \frac{\iiint_{Q_{1,i}^2}^{Q_{2,i}^2} \cos\beta \cos\psi \left(\frac{d\Gamma_{\tau^-}}{d\omega} - \frac{d\Gamma_{\tau^+}}{d\omega} \right) d\omega}{\frac{1}{2} \iiint_{Q_{1,i}^2}^{Q_{2,i}^2} \left(\frac{d\Gamma_{\tau^-}}{d\omega} + \frac{d\Gamma_{\tau^+}}{d\omega} \right) d\omega}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

実験的に測るのはこっち

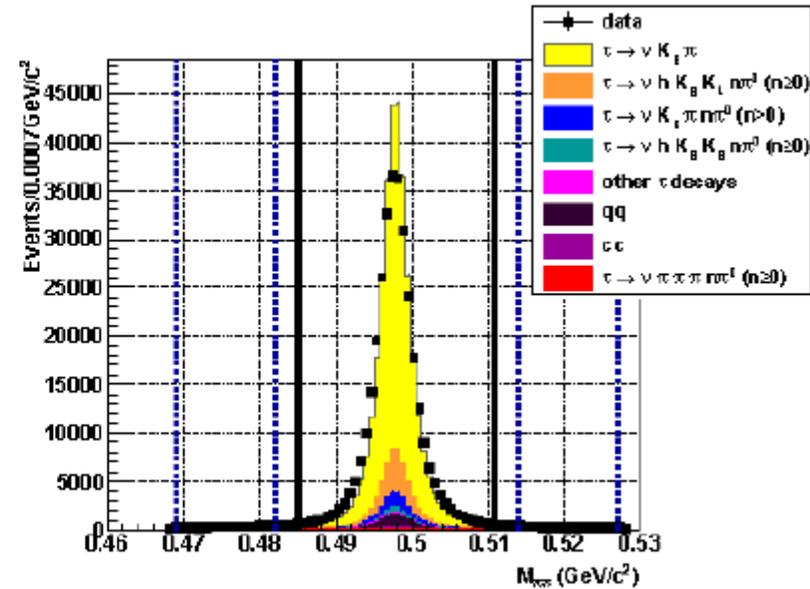
with $d\omega = dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta$.

使ったデータと選別条件

Belle実験で収集された700fb⁻¹



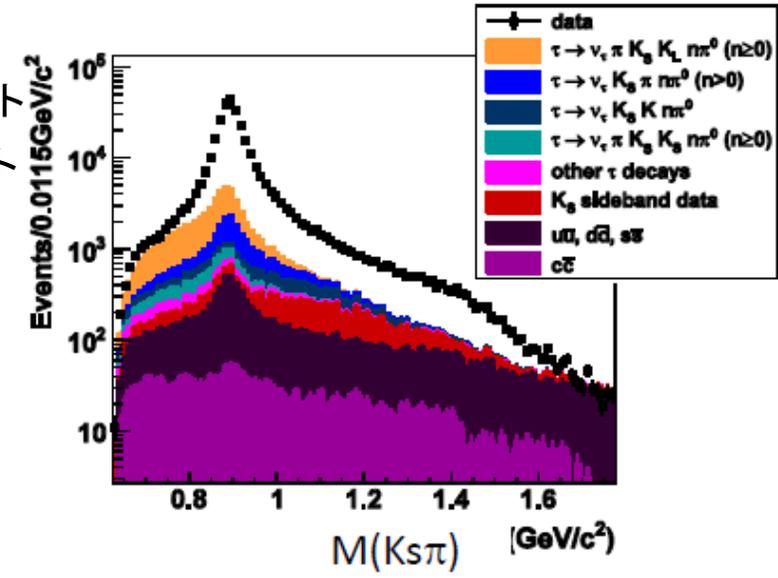
荷電粒子4本(3-1)
Ks⁰がある。(質量、飛距離)、πID
tag sideはレプトニック崩壊



Ks⁰候補の質量分布
→Ks⁰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

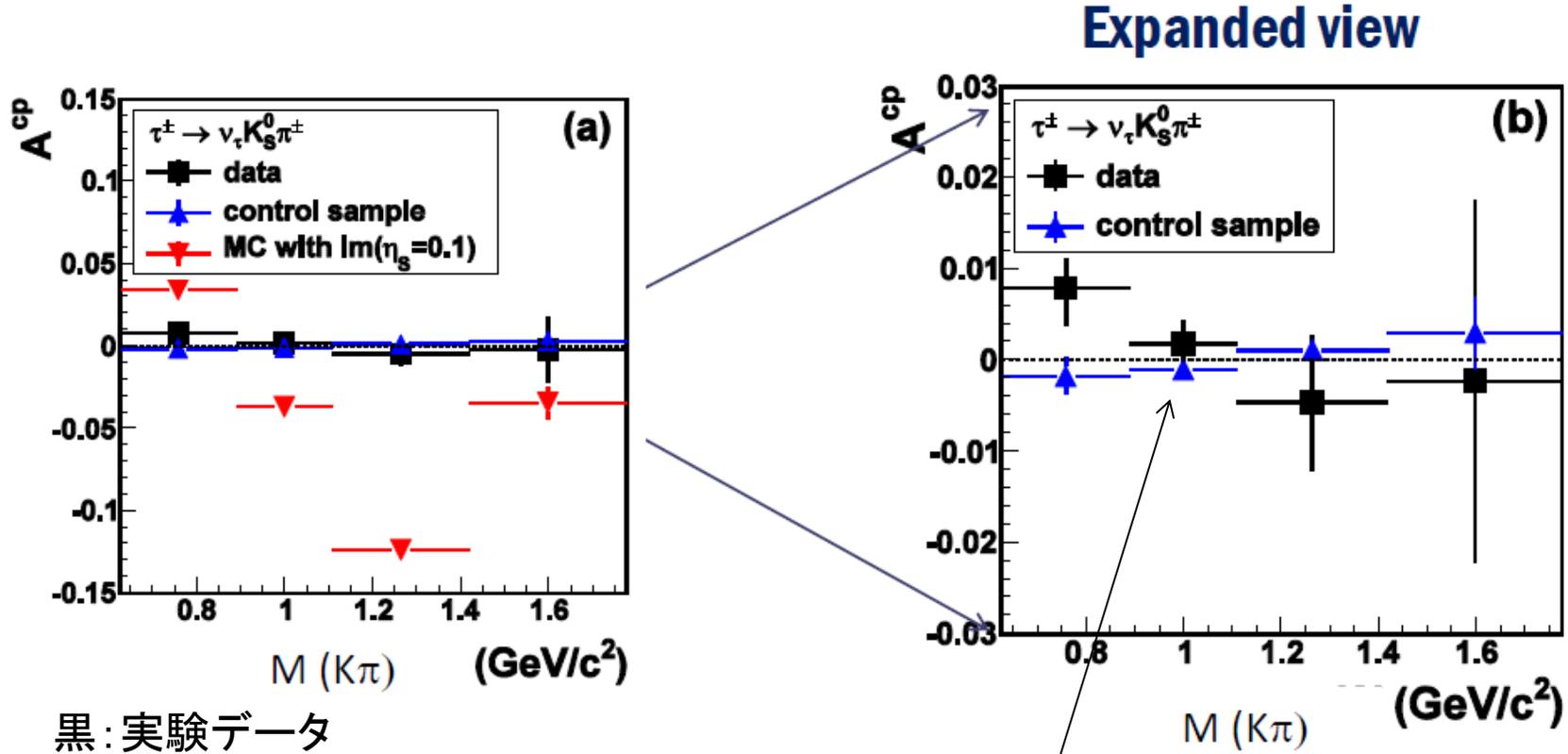
F-B asymmetry (γ -Zの干渉) $\rightarrow O(10^{-4})$

- 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 A_{CP} 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對位相がわからないから。(角度を動かして評価)

■ Application: In the 3HDM

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

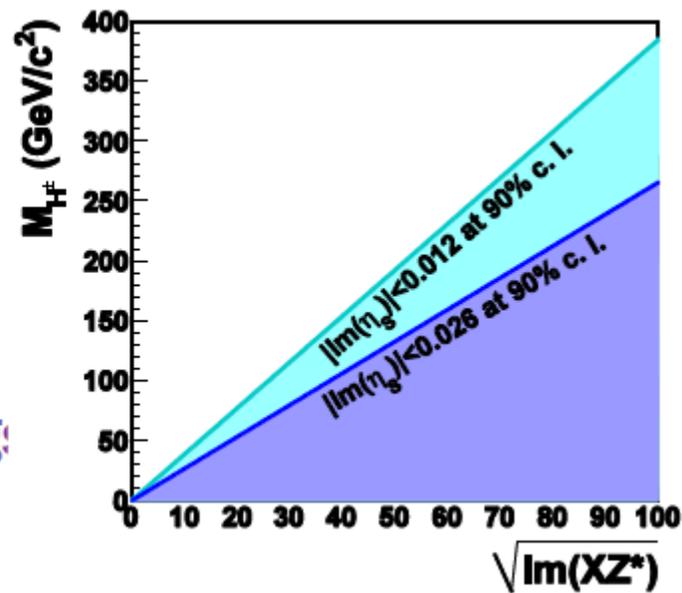
M_{H^\pm} : mass of lightest charged Higgs in MHDM

Z : complex coupling constant btw Higgs and lepton.

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

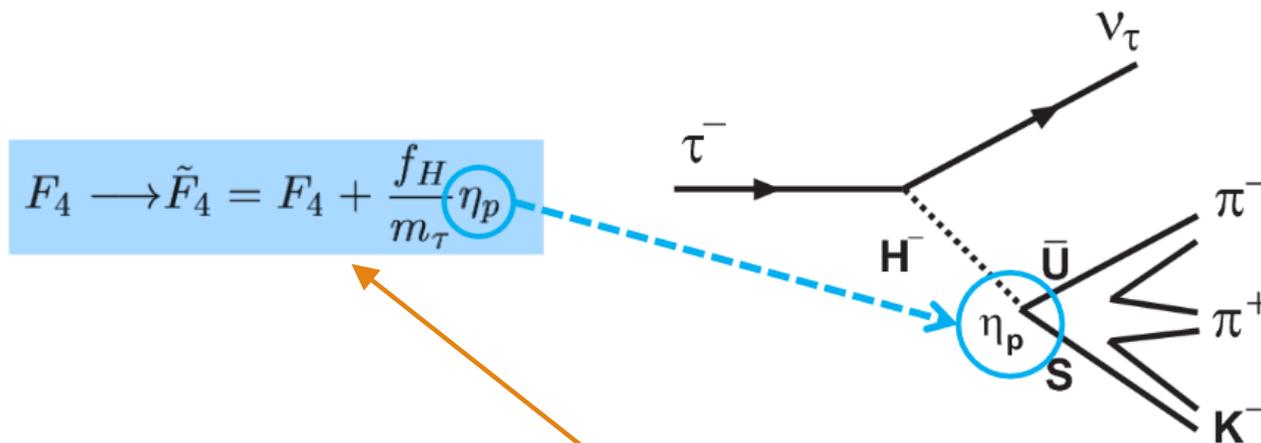
■ The result $(\text{Im}(\eta_s) < 0.026)$ limits the coupling:

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



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

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



$$\begin{aligned}
 J^\mu &\equiv \langle K^-(p_1)\pi^-(p_2)\pi^+(p_3) | \bar{s}\gamma^\mu(1 - \gamma^5)u | 0 \rangle \\
 &= [F_1(s_1, s_2, Q^2)(p_1 - p_3)^\nu + F_2(s_1, s_2, Q^2)(p_2 - p_3)^\nu]T^{\mu\nu} \\
 &\quad + iF_3(s_1, s_2, Q^2)\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}p_{1\nu}p_{2\rho}p_{3\sigma} + \boxed{F_4}(s_1, s_2, Q^2)Q^\mu
 \end{aligned}$$

K π π 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 π π 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 π π 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, BaBarでは
 解析されていない
 →BGがすごい/Belle IIのPIDに期待

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と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

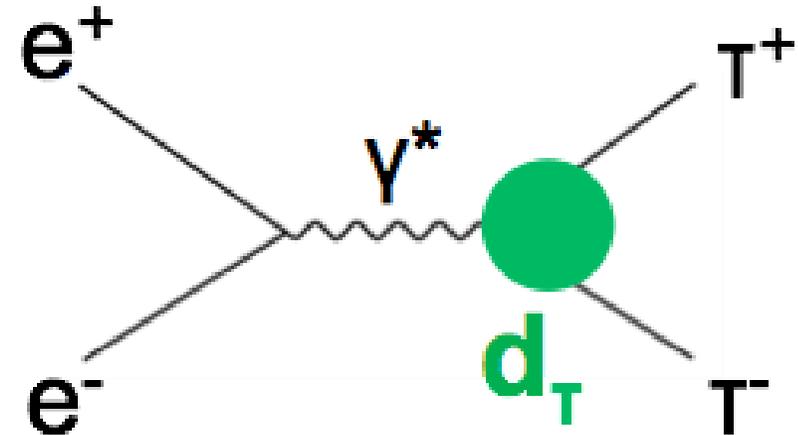
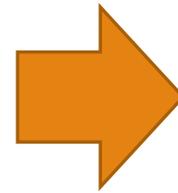
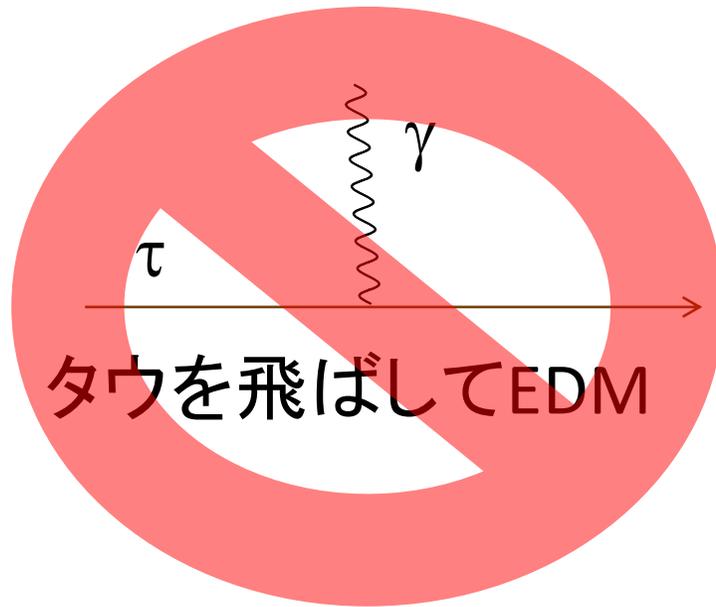
Belle IIでも進行中

→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)

$\tau\tau$ のEDM レプトンセクターT-Violation

CPV保存を過程すればCP-Violation



$\tau\tau$ 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

- $\tau\tau$ 事象生成の振幅は

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

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{SM}^2 = & \frac{e^4}{k_0^2} [k_0^2 + m_\tau^2 + |k|^2 (\hat{k}\hat{p})^2 - S_+ S_- |k|^2 (1 - ((\hat{k}\hat{p})^2))] \\ & + 2(\hat{k}S_+)(\hat{k}S_-)(|k|^2 + (k_0 - m_\tau)^2 (\hat{k}\hat{p})^2) \\ & - 2k_0(k_0 - m_\tau)(\hat{k}\hat{p})((\hat{k}S_+)(\hat{p}S_-) + (\hat{k}S_+)(\hat{p}S_-)) \\ & + 2k_0^2(\hat{p}S_+)(\hat{p}S_-) \end{aligned}$$

$p : e^+$ の運動量

$k : \tau^+$ の運動量

$S_\pm : \tau^\pm$ のスピン

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

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

を定義して

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

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

オフセット

EDM

感度

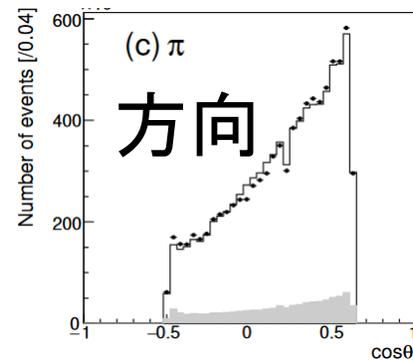
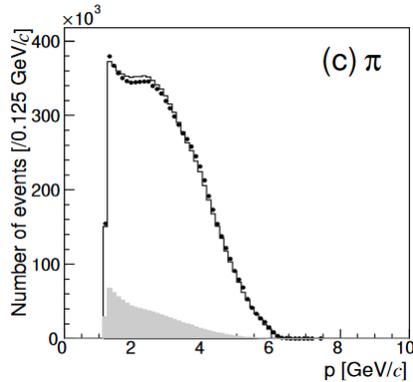
からEDMを測定する
(オフセット, 感度はMCで評価)

タウの電気双極子モーメントの測定(2)

833fb^{-1} , $\tau \rightarrow e\nu\nu, \mu\nu\nu, \pi\nu, \rho\nu$

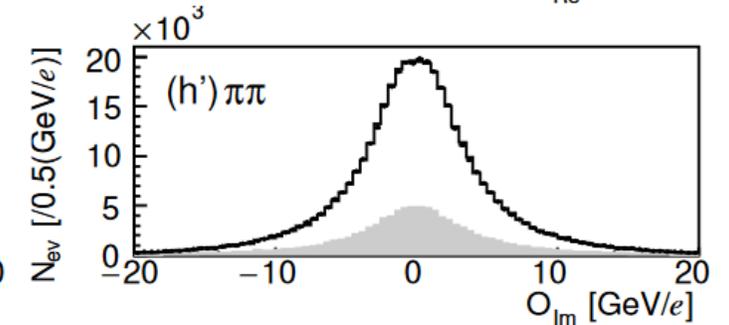
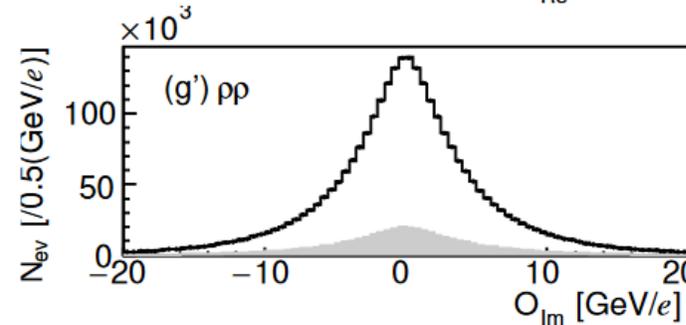
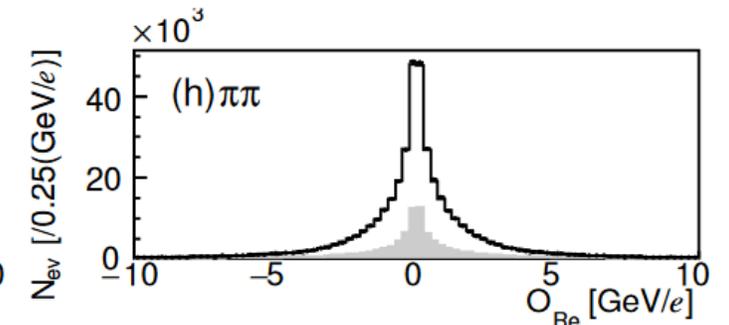
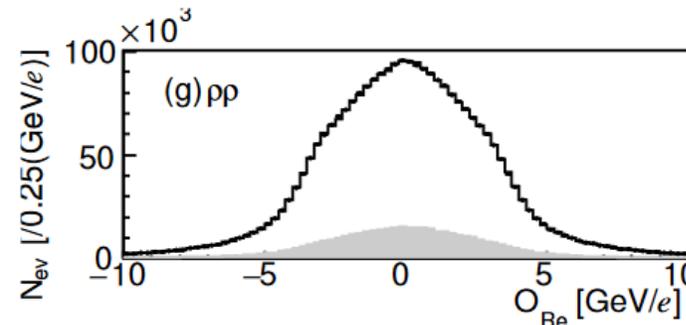
[JHEP04\(2022\)110](#)

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

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)

結果

| Mode | $\text{Re}(d_\tau)(10^{-17} \text{ ecm})$ | $\text{Im}(d_\tau)(10^{-17} \text{ ecm})$ |
|------------|---|---|
| $e\mu$ | $-3.2 \pm 2.5 \pm 3.6$ | $0.6 \pm 0.4 \pm 1.8$ |
| $e\pi$ | $0.7 \pm 2.3 \pm 4.8$ | $2.4 \pm 0.5 \pm 2.2$ |
| $\mu\pi$ | $1.0 \pm 2.2 \pm 4.3$ | $2.4 \pm 0.5 \pm 2.6$ |
| $e\rho$ | $-1.2 \pm 0.8 \pm 1.0$ | $-1.1 \pm 0.3 \pm 0.6$ |
| $\mu\rho$ | $0.7 \pm 1.0 \pm 2.2$ | $-0.5 \pm 0.3 \pm 0.8$ |
| $\pi\rho$ | $-0.6 \pm 0.7 \pm 1.0$ | $0.4 \pm 0.3 \pm 1.2$ |
| $\rho\rho$ | $-0.4 \pm 0.5 \pm 0.9$ | $-0.3 \pm 0.3 \pm 0.4$ |
| $\pi\pi$ | $-2.2 \pm 4.3 \pm 5.2$ | $-0.9 \pm 0.9 \pm 1.2$ |

$$-1.85 \times 10^{-17} < \text{Re}(d_\tau) < 0.61 \times 10^{-17} \text{ ecm},$$

$$-1.03 \times 10^{-17} < \text{Im}(d_\tau) < 0.23 \times 10^{-17} \text{ ecm}.$$

tau MDMの測定

EDMと似たような感じ

- $\tau\tau$ 事象生成の振幅は

$$\mathcal{L} = \bar{\tau}(i\partial - eA)\tau - \frac{1}{2}\Delta\mu_{\tau}\bar{\tau}\sigma^{\mu\nu}\tau F_{\mu\nu}$$

$$\mathcal{M}_{SM}^2 + \frac{2m_{\tau}}{e}\text{Re}(\Delta\mu)\mathcal{M}_{\text{Re}F2} + \frac{2m_{\tau}}{e}\text{Im}(\Delta\mu)\mathcal{M}_{\text{Im}F2}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{SM}^2 = \frac{e^4}{k_0^2} & [k_0^2 + m_{\tau}^2 + |k|^2(\hat{k}\hat{p})^2 - S_+S_-|k|^2(1 - ((\hat{k}\hat{p})^2))] & p: e^+ \text{ の運動量} \\ & + 2(\hat{k}S_+)(\hat{k}S_-)(|k|^2 + (k_0 - m_{\tau})^2(\hat{k}\hat{p})^2) & k: \tau^+ \text{ の運動量} \\ & - 2k_0(k_0 - m_{\tau})(\hat{k}\hat{p})((\hat{k}S_+)(\hat{p}S_-) + (\hat{k}S_+)(\hat{p}S_-)) & S_{\pm}: \tau^{\pm} \text{ のスピン} \\ & + 2k_0^2(\hat{p}S_+)(\hat{p}S_-) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_{\text{Re}F2} = \frac{2e^4}{mk_0} & [2mk_0 - 2(\hat{k}\cdot S_+)(\hat{k}\cdot S_-)(k_0 - m_{\tau})^2(\hat{k}\cdot\hat{p})^2 + 2mk_0(\hat{p}\cdot S_+)(\hat{p}\cdot S_-) \\ & + (k_0 - m_{\tau})^2(\hat{k}\cdot\hat{p})((\hat{k}\cdot S_+)(\hat{p}\cdot S_-) + (\hat{k}\cdot S_-)(\hat{p}\cdot S_+))] , \end{aligned}$$

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)

$\mu\mu\rightarrow e\nu\nu, \tau\rightarrow\mu\nu\nu, \tau\rightarrow e\nu\nu$ 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

$$\Gamma(\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau) / \Gamma_{\text{total}} \quad \Gamma_3 / \Gamma$$

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 SCHAEAL | 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 |

$$\Gamma(e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) / \Gamma_{\text{total}} \quad \Gamma_5 / \Gamma$$

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 SCHAEAL | 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...

$$\Gamma(\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau) / \Gamma(e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) \quad \Gamma_3 / \Gamma_5$$

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 |

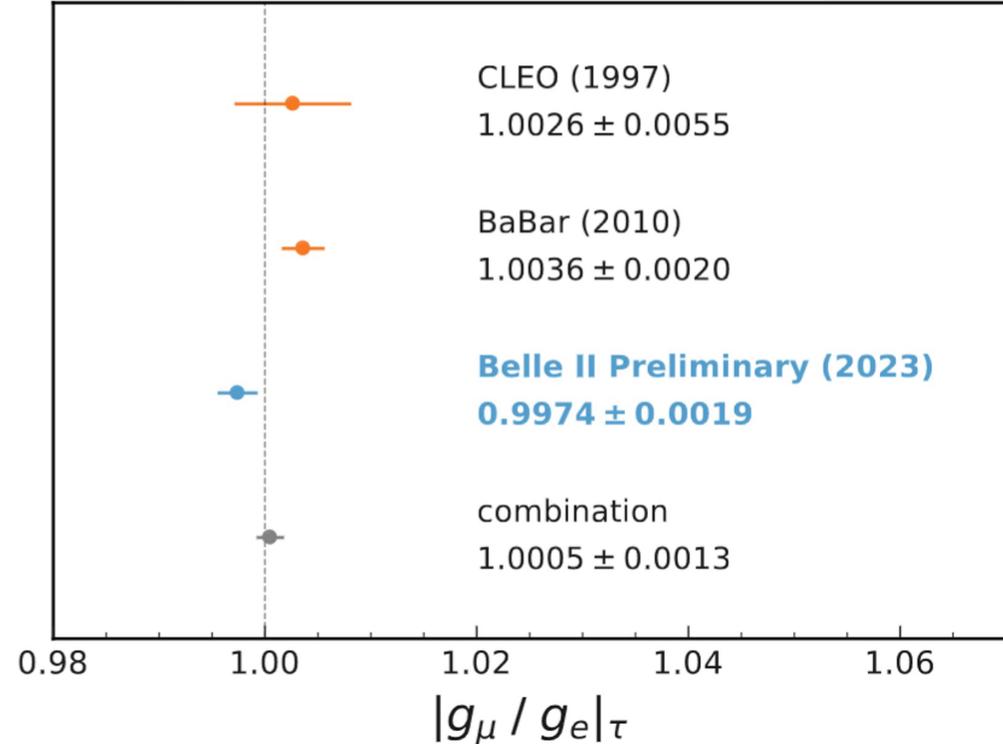
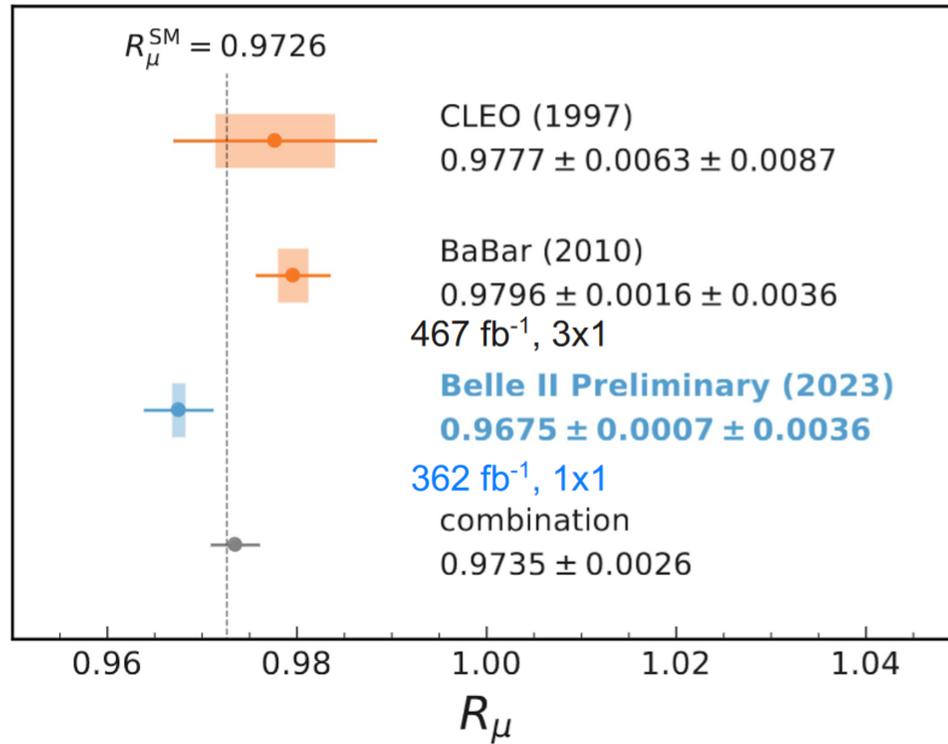
Belle IIでは

362fb⁻¹のデータを使って

Accepted by JHEP
([arXiv:2405.14625](https://arxiv.org/abs/2405.14625))

$$R_\mu = \frac{BF[\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau]}{BF[\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau]}$$

$$\left(\frac{g_\mu}{g_e}\right)_\tau = \sqrt{\frac{BF[\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau] f(m_e^2/m_\tau^2)}{BF[\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau] f(m_\mu^2/m_\tau^2)}}$$



レプトンユニバーサルシティの応用

$$\frac{\text{Br}(\tau \rightarrow e\nu\nu)}{\text{Br}(\mu \rightarrow e\nu\nu)} = \frac{\tau_\tau \Gamma_{\tau \rightarrow e\nu\nu}}{\tau_\mu \Gamma_{\mu \rightarrow e\nu\nu}} = \frac{\tau_\tau m_\tau^5}{\tau_\mu m_\mu^5} f\left(\frac{m_e^2}{m_\tau^2}\right) / f\left(\frac{m_e^2}{m_\mu^2}\right)$$

$$a = \frac{m_\tau^5}{\tau_\mu m_\mu^5} f\left(\frac{m_e^2}{m_\tau^2}\right) / f\left(\frac{m_e^2}{m_\mu^2}\right) \text{とおいてやると}$$

$$\text{Br}(\tau \rightarrow e\nu\nu) = a\tau_\tau$$

μ

$$J = \frac{1}{2}$$

Mass $m = 0.1134289259 \pm 0.0000000025$ u

Mass $m = 105.6583755 \pm 0.0000023$ MeV

Mean life $\tau = (2.1969811 \pm 0.0000022) \times 10^{-6}$ s

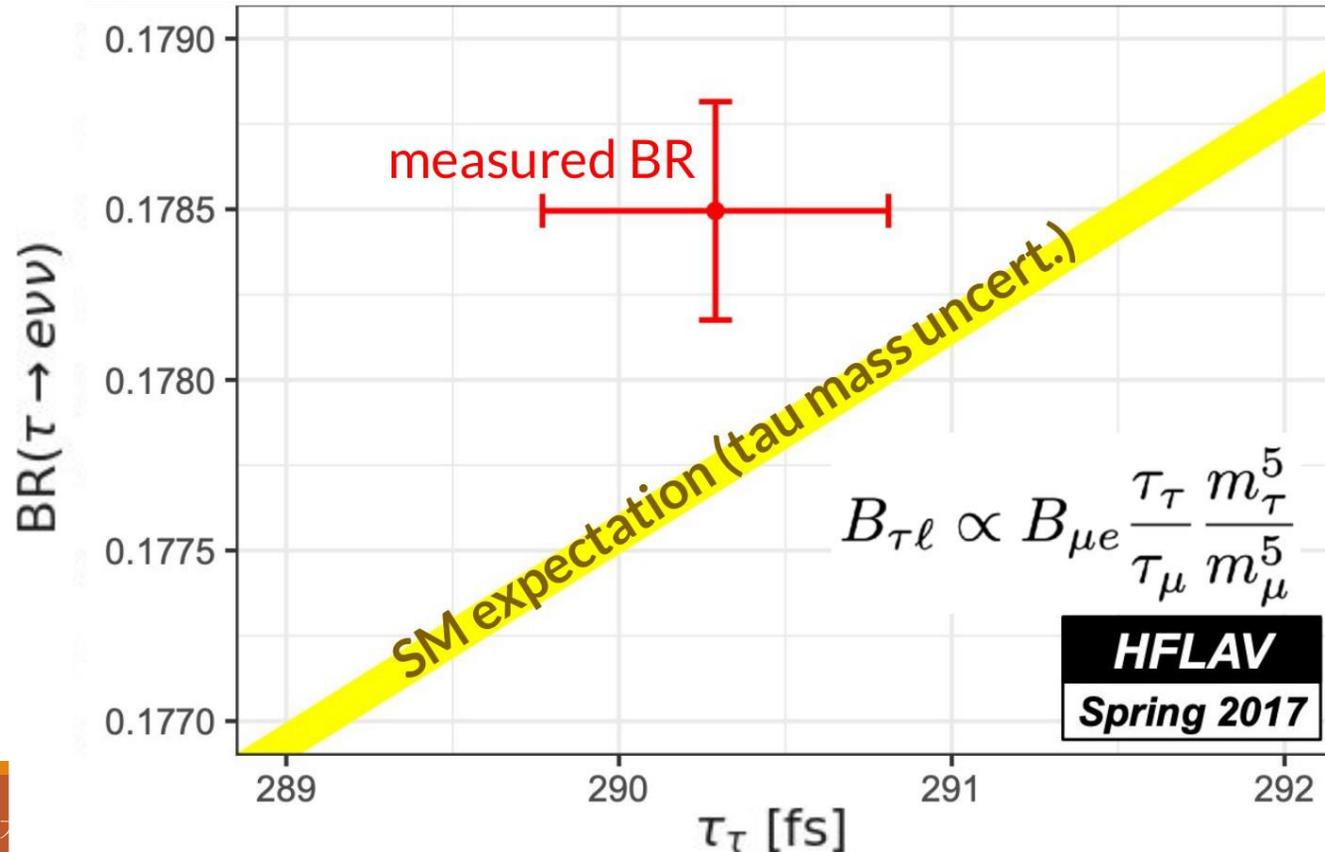
τ

$$J = \frac{1}{2}$$

Mass $m = 1776.86 \pm 0.12$ MeV

$(m_{\tau^+} - m_{\tau^-}) / m_{\text{average}} < 2.8 \times 10^{-4}$, CL = 90%

Mean life $\tau = (290.3 \pm 0.5) \times 10^{-15}$ s



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

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

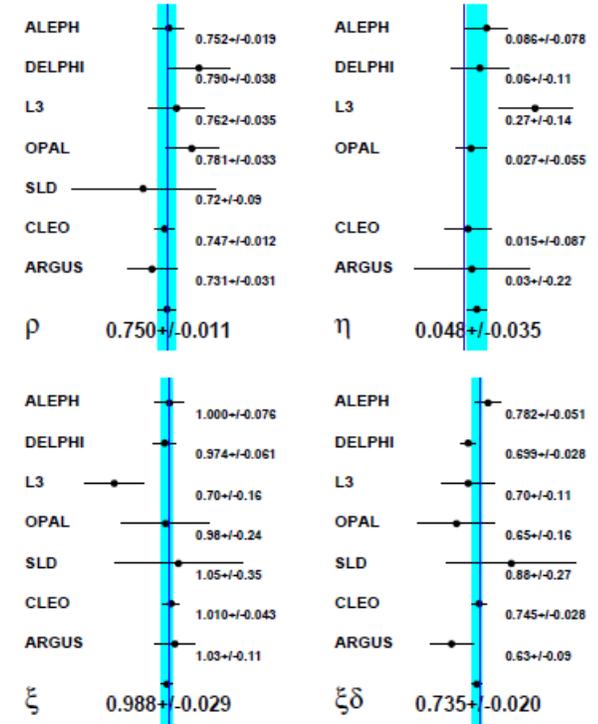
これからdifferential decay widthを計算すると

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

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 |

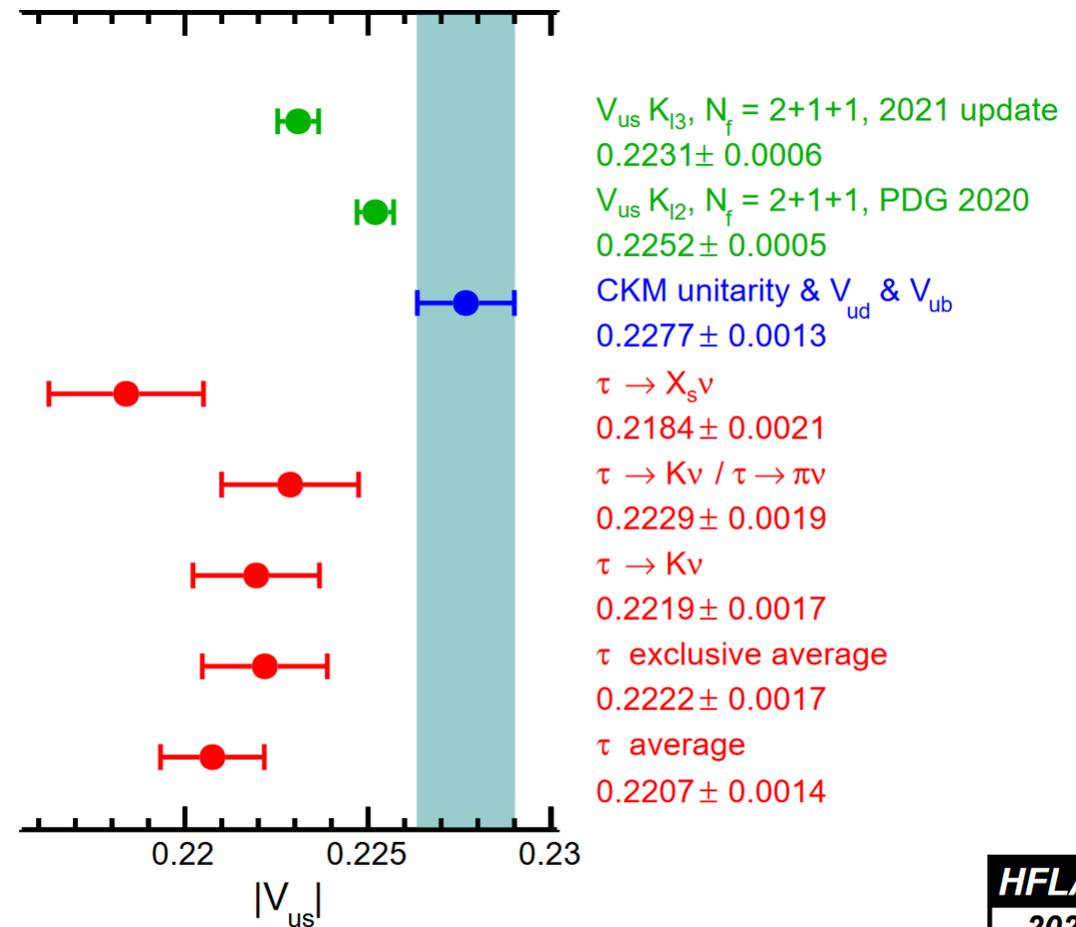


例えば Type II 2HDM だと $\eta = \frac{m_\mu m_\tau}{2} \left(\frac{\tan^2 \beta}{M_H^2} \right)^2$

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)



HFLAV
2021

τ でハドロン物理

物理という前に基本的な量の測定

$K_1(1270)$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^+)$$

$K_1(1270)$ MASS

PRODUCED BY K^- , BACKWARD SCATTERING, HYPERON EXCHANGE

VALUE (MeV) EVTS DOCUMENT ID TECN CHG COMMENT
The data in this block is included in the average printed for a previous datablock.

1275±10 700 GAVILLET 78 HBC + 4.2 $K^- p \rightarrow \Xi^- (K\pi\pi)^+$

PRODUCED BY K BEAMS

VALUE (MeV) DOCUMENT ID TECN CHG COMMENT
The data in this block is included in the average printed for a previous datablock.

1270±10 ¹ DAUM 81C CNTR - 63 $K^- p \rightarrow K^- 2\pi p$

PRODUCED BY BEAMS OTHER THAN K MESONS

VALUE (MeV) EVTS DOCUMENT ID TECN CHG COMMENT
1248.1± 3.3±1.4 GULER 11 BELL $B^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^+ \pi^-$

PRODUCED IN τ LEPTON DECAYS

VALUE (MeV) EVTS DOCUMENT ID TECN CHG COMMENT
1254±33±34 7k ASNER 00B CLEO ± $\tau^- \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$

$K^*(892)$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

Mass (T-Matrix Pole \sqrt{s}) = $(890 \pm 14) - i(26 \pm 6)$ MeV

$K^*(892)^\pm$ hadroproduced mass $m = 891.67 \pm 0.26$ MeV

$K^*(892)^\pm$ in τ decays mass $m = 895.5 \pm 0.8$ MeV

$K^*(892)^0$ mass $m = 895.55 \pm 0.20$ MeV (S = 1.7)

$K^*(892)^\pm$ hadroproduced full width $\Gamma = 51.4 \pm 0.8$ MeV

$K^*(892)^\pm$ in τ decays full width $\Gamma = 46.2 \pm 1.3$ MeV

$K^*(892)^0$ full width $\Gamma = 47.3 \pm 0.5$ MeV (S = 1.9)

| $K^*(892)$ DECAY MODES | Fraction (Γ_i/Γ) | Confidence level | ρ (MeV/c) |
|------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------|
| $K\pi$ | ~ 100 % | | 289 |
| $K^0\gamma$ | $(2.46 \pm 0.21) \times 10^{-3}$ | | 307 |

幅はさらに

$K_1(1270)$ WIDTH

PRODUCED BY K^- , BACKWARD SCATTERING, HYPERON EXCHANGE

| <u>VALUE (MeV)</u> | <u>EVTS</u> | <u>DOCUMENT ID</u> | <u>TECN</u> | <u>CHG</u> | <u>COMMENT</u> |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|

The data in this block is included in the average printed for a previous datablock.

| | | | | | | |
|--------------|-----|----------|----|-----|---|---|
| 75±15 | 700 | GAVILLET | 78 | HBC | + | 4.2 $K^- p \rightarrow \Xi^- K \pi \pi$ |
|--------------|-----|----------|----|-----|---|---|

PRODUCED BY K BEAMS

| <u>VALUE (MeV)</u> | <u>DOCUMENT ID</u> | <u>TECN</u> | <u>CHG</u> | <u>COMMENT</u> |
|--------------------|--------------------|-------------|------------|----------------|
|--------------------|--------------------|-------------|------------|----------------|

The data in this block is included in the average printed for a previous datablock.

| | | | | | |
|-------------|-------------------|-----|------|---|-----------------------------------|
| 90±8 | ⁶ DAUM | 81C | CNTR | - | 63 $K^- p \rightarrow K^- 2\pi p$ |
|-------------|-------------------|-----|------|---|-----------------------------------|

PRODUCED BY BEAMS OTHER THAN K MESONS

| <u>VALUE (MeV)</u> | <u>EVTS</u> | <u>DOCUMENT ID</u> | <u>TECN</u> | <u>CHG</u> | <u>COMMENT</u> |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|

| | | | | | | |
|----------------------|--|-------|----|------|--|--|
| 119.5±5.2±6.7 | | GULER | 11 | BELL | | $B^+ \rightarrow J/\psi K^+ \pi^+ \pi^-$ |
|----------------------|--|-------|----|------|--|--|

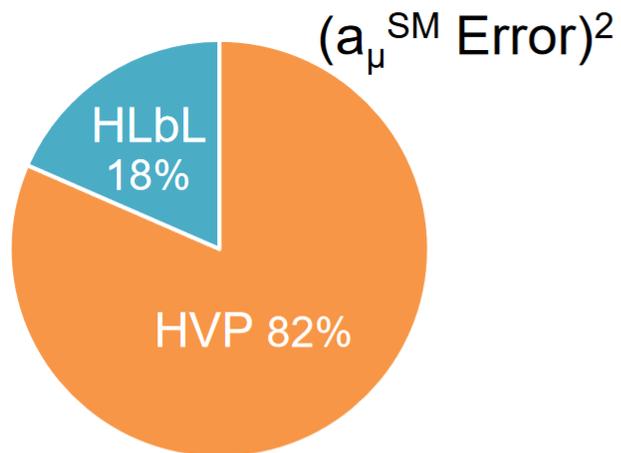
PRODUCED IN τ LEPTON DECAYS

| <u>VALUE (MeV)</u> | <u>EVTS</u> | <u>DOCUMENT ID</u> | <u>TECN</u> | <u>CHG</u> | <u>COMMENT</u> |
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|
|--------------------|-------------|--------------------|-------------|------------|----------------|

| | | | | | | |
|---|----|-------|-----|------|---|---|
| 260⁺⁹⁰₋₇₀±80 | 7k | ASNER | 00B | CLEO | ± | $\tau^- \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ |
|---|----|-------|-----|------|---|---|

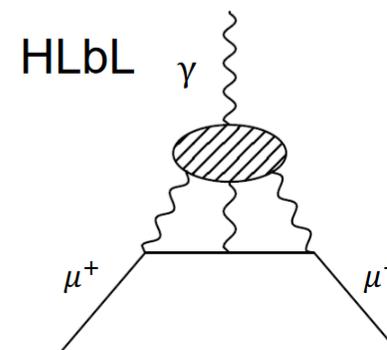
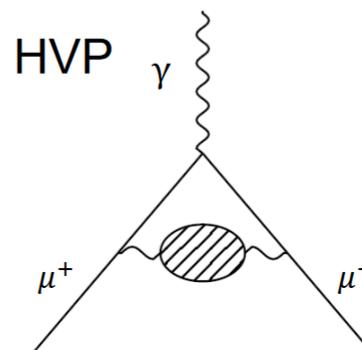
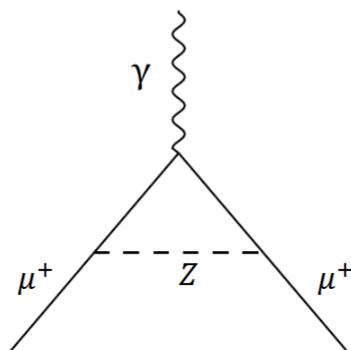
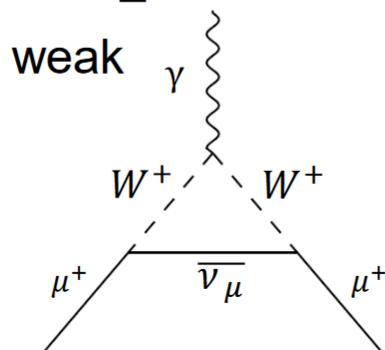
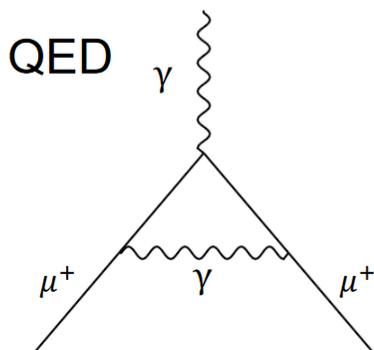
質量よりも
幅が問題かも
 τ はエラーが
大きいので、
まずは精度を
あげる

Muon $g-2$ とHVP

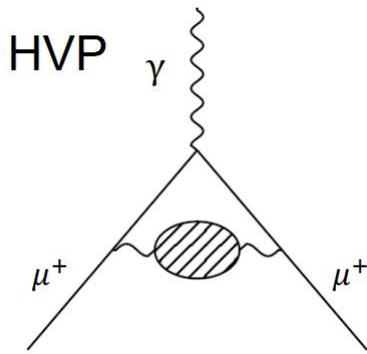


| Contribution | Value $a_\mu \times 10^{11}$ | Error $\delta a_\mu \times 10^{11}$ |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| QED | 116 584 718.931 | 0.104 |
| HVP LO (Leading-Order) | 6931 | 40 |
| HVP HO (Higher-Order) | -85.9 | 1.2 |
| HLbL (Light-by-Light) | 92 | 19 |
| EW (Electroweak) | 153.6 | 1 |
| SM total (Dispersive) | 116 591 810 | 43 |
| Experiment (BNL+FNAL) | 116 592 061 | 41 |
| Experiment – SM | 251 | 59 |

$$a_\mu^{\text{SM}} = \frac{g-2}{2} = a_\mu^{\text{QED}} + a_\mu^{\text{weak}} + a_\mu^{\text{HVP}} + a_\mu^{\text{HLbL}}$$

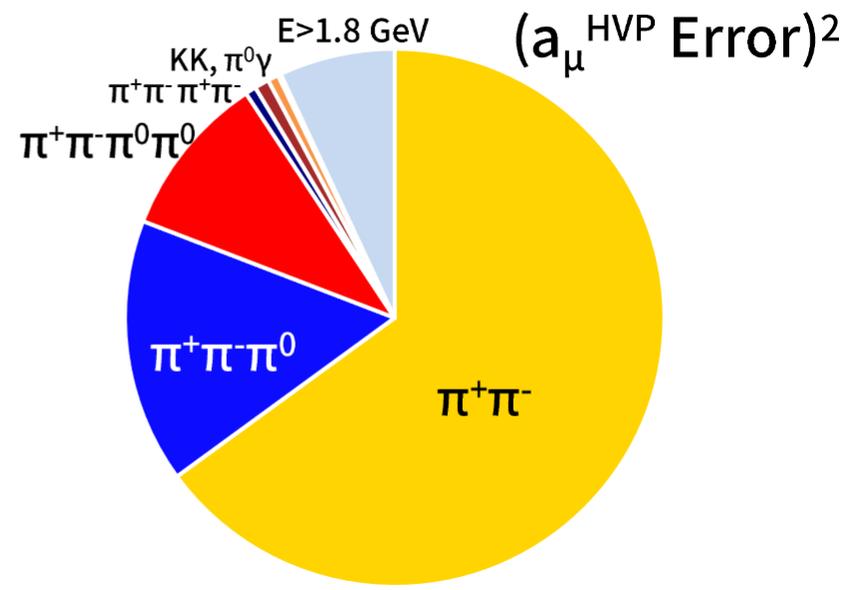
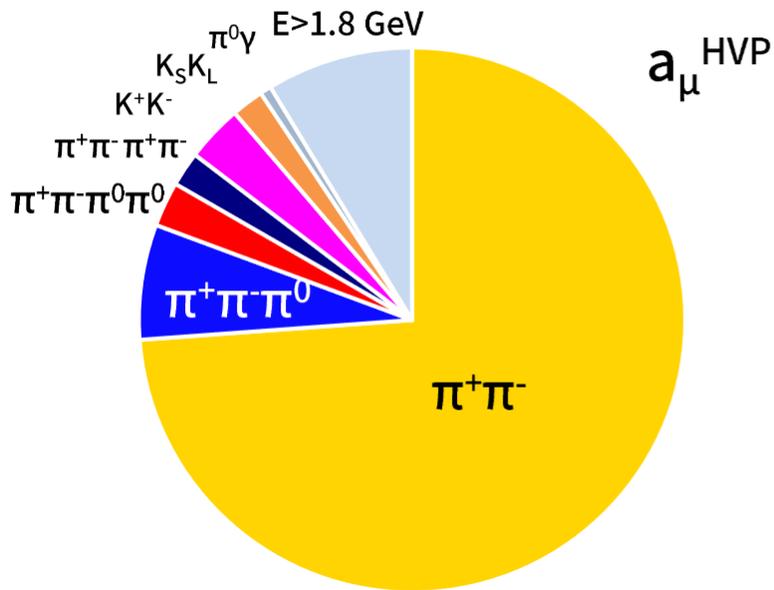
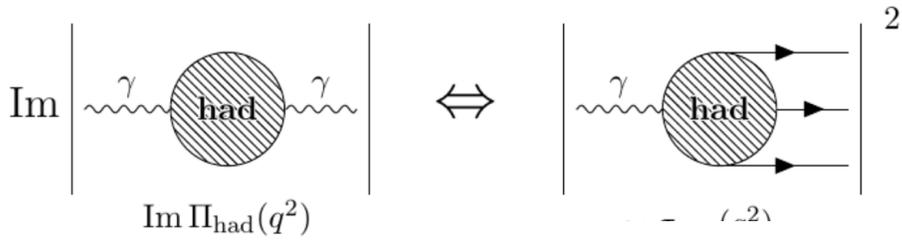


実験値とHVP



Low energyのループはハドロンの効果が大いので、QCDで計算するのは難しい
→実験値を使う

$e^+e^- \rightarrow \pi\pi\pi \dots$ の生成断面積がこの計算に使える

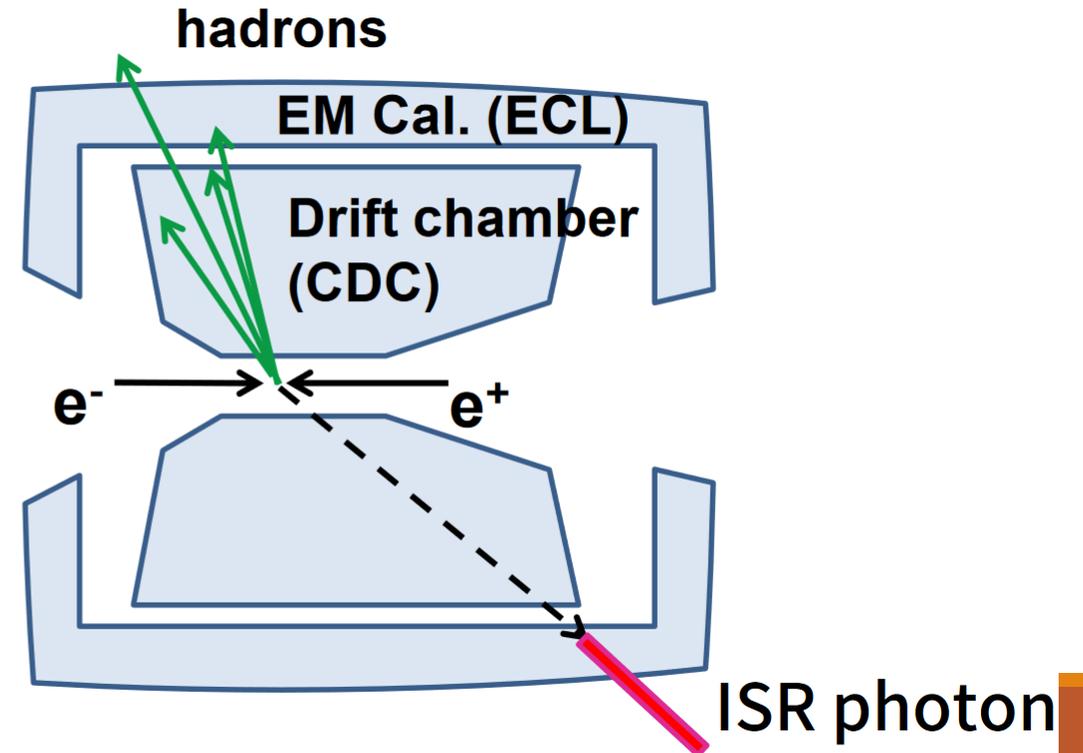
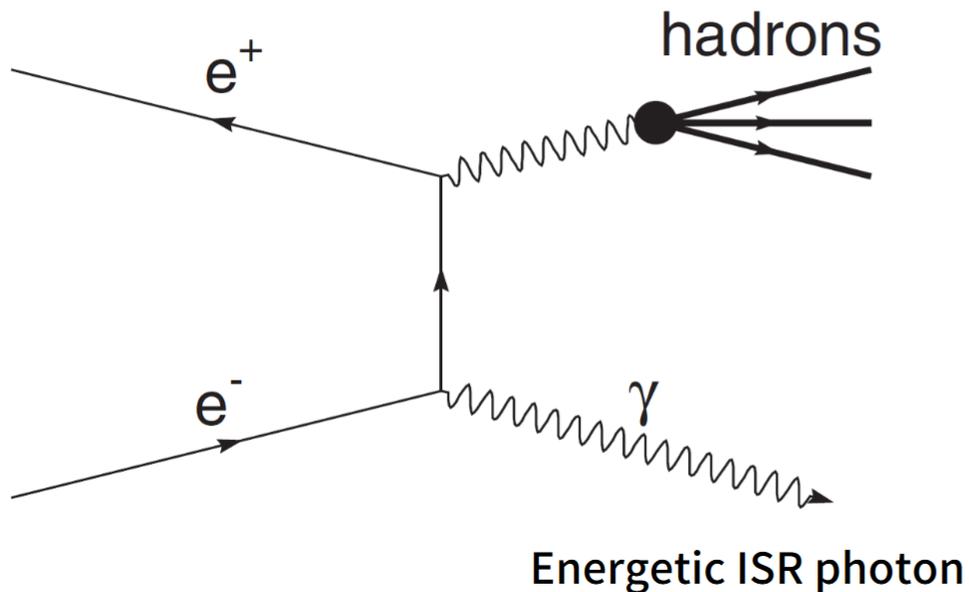


Radiative return法

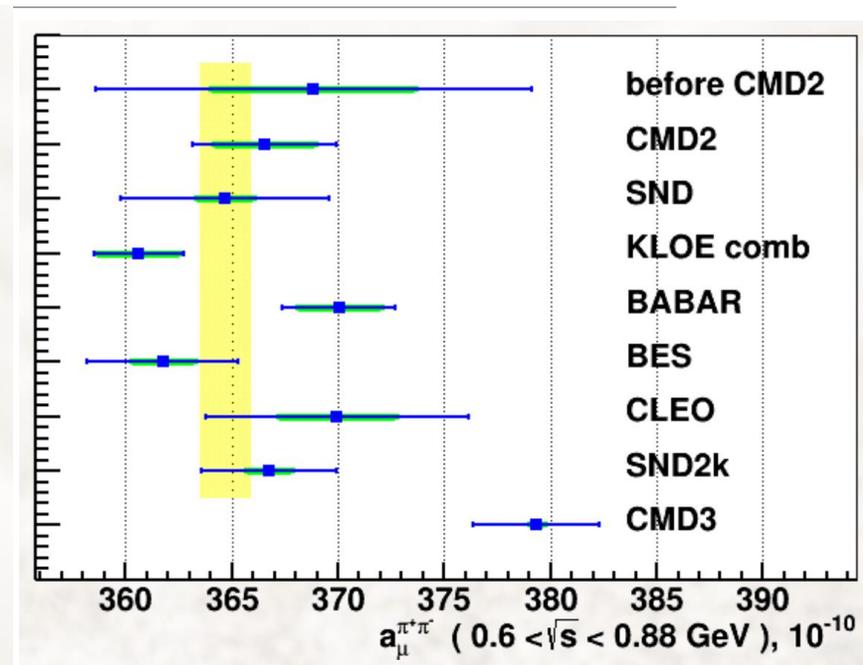
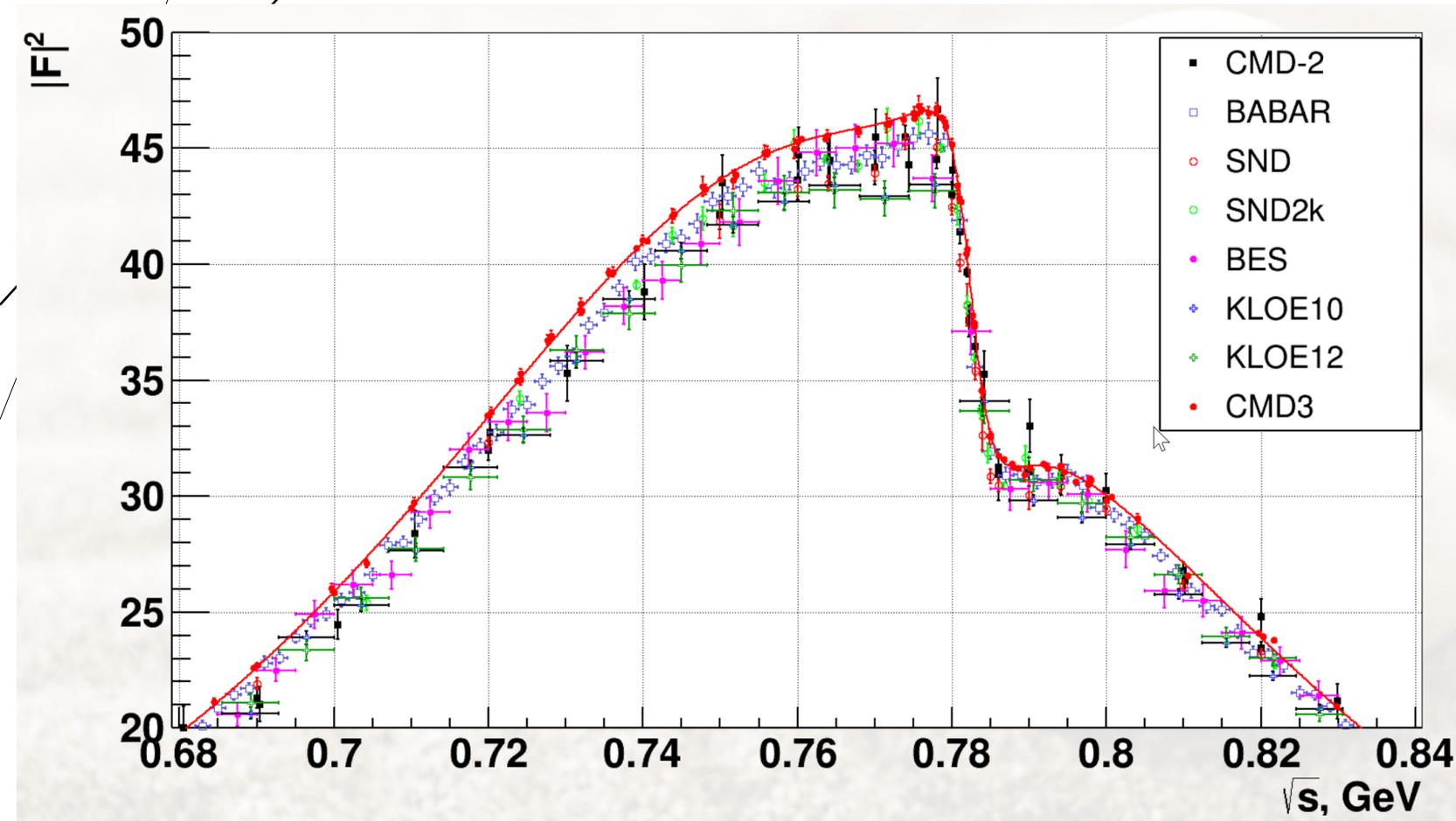
$e^+e^- \rightarrow \pi\pi\pi \dots$ の生成断面積の測定は従来 e^+e^- のエネルギーを変えながら行っていた

あるとき、加速器の設定はそのまま $e^+e^- \rightarrow \pi\pi\pi \dots \gamma$ という過程でいろんなエネルギーの γ を拾えば e^+e^- のエネルギーを変えるのと同様じゃない？と気づいた→Radiative return法

※BaBarやKLOE実験で測定が行われてきた。Belleは設計上無理

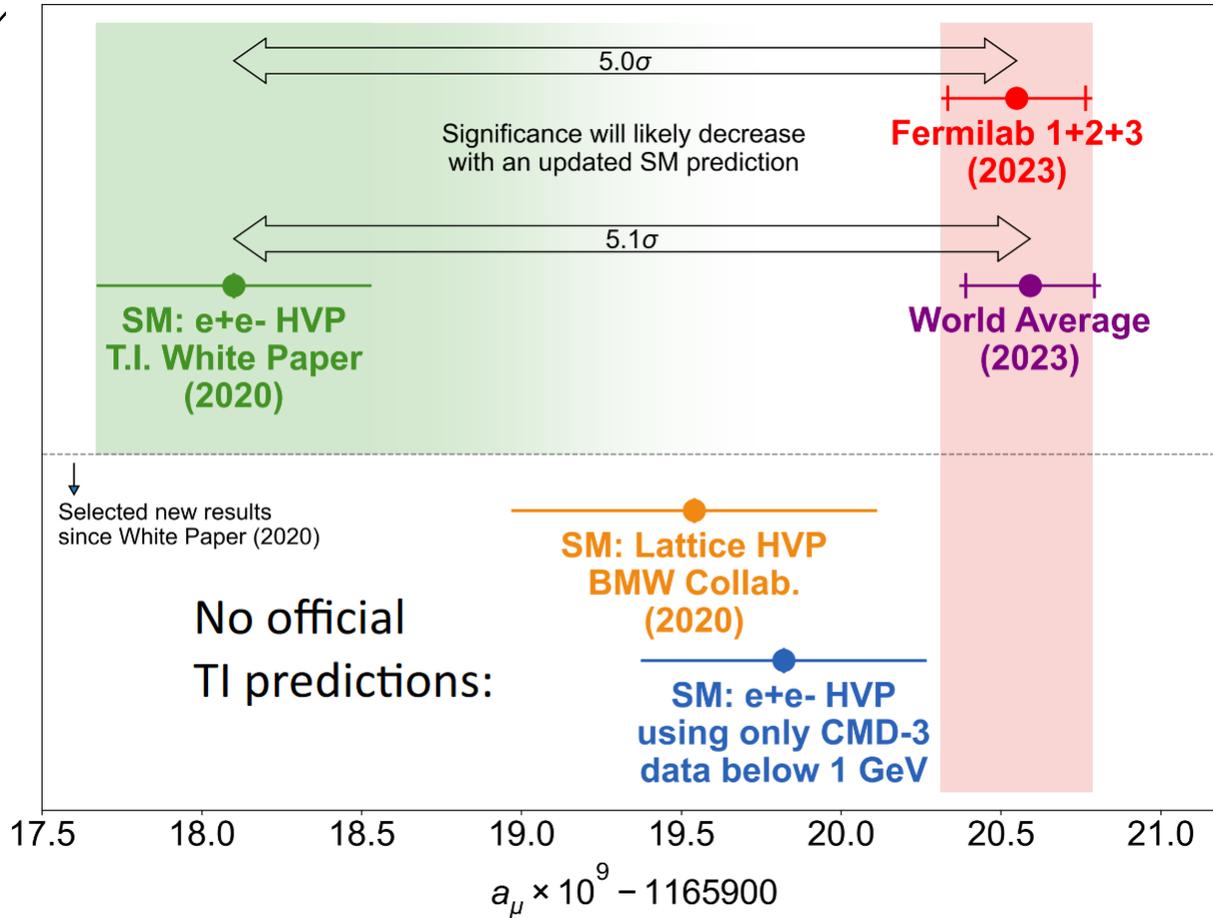


CMD3がとんでもない結果を出した

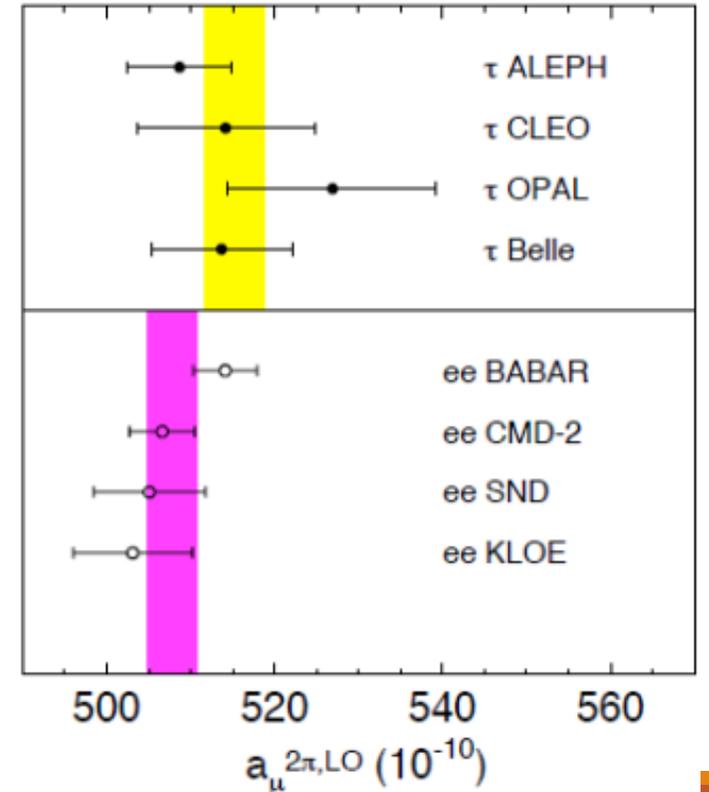


世界中が困惑中

そうすると？



そんなわけでBelle IIもこの過程を測定する要望が高まっています。ただ物凄く難しい
Belle IIからは $ee \rightarrow \pi\pi\pi^0$ の結果が出ました。
[2404.04915](https://arxiv.org/abs/2404.04915)



Muon g-2と τ は無縁ではない

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。

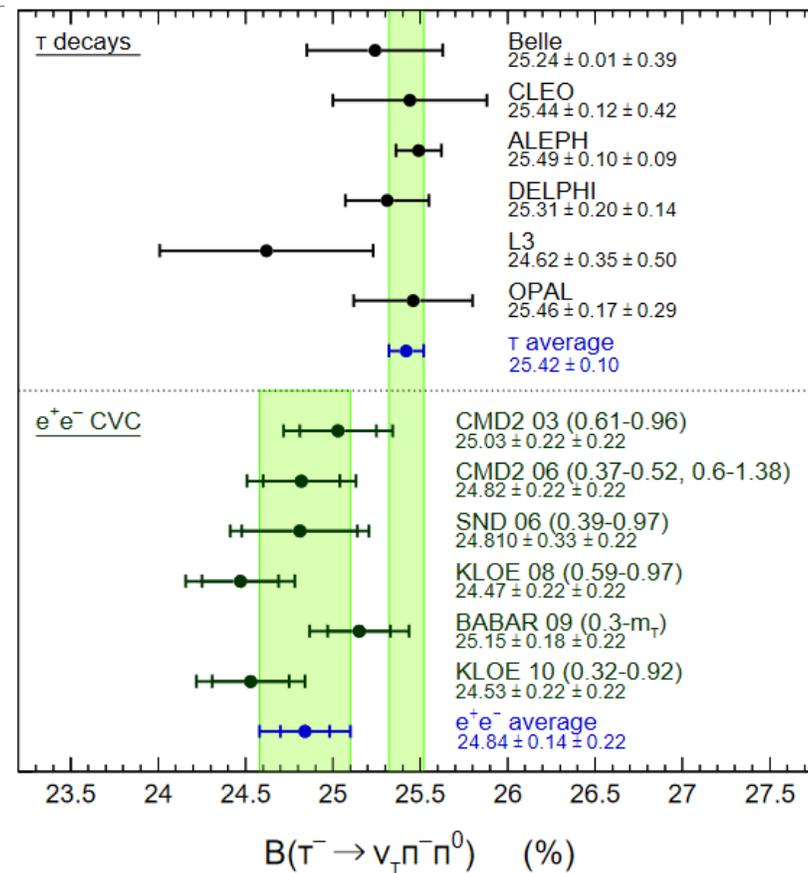
$$\tau^- \nu \rightarrow W^- \rightarrow \rho^-$$

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

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

理論屋のみなさんには実験のモチベーションとなる論文を書いているただけると嬉しいです。(そしてこっそり教えてください。)



タウ質量の測定

PRL99, 011801(2007)

$414\text{fb}^{-1}, \tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu / \tau \rightarrow \ell\nu\nu$

$\tau\tau \rightarrow \pi$... 出値の ...
$$M_{\min} = \sqrt{M_X^2 + 2(E_{\text{beam}} - E_X)(E_X - P_X)}, \quad (1)$$

を評価することによってタウ質量
を測定 pseudo mass 分布に対して

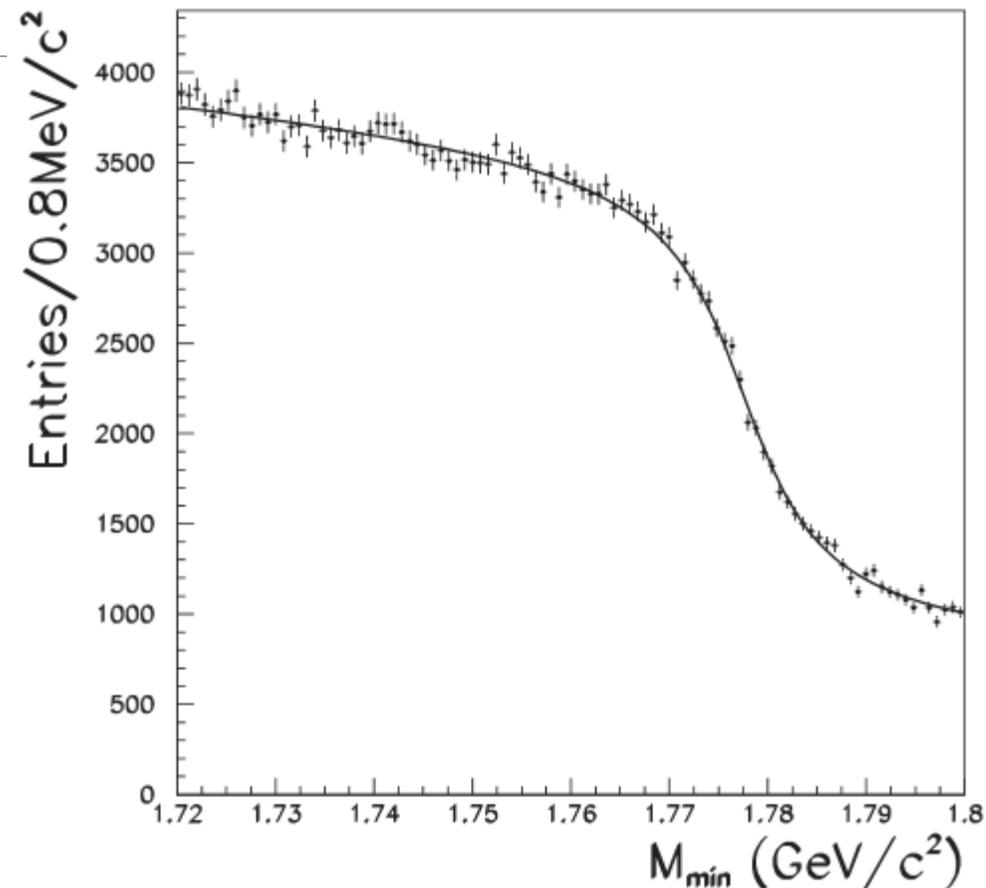
$$F(x) = (P_3 + P_4x) \arctan[(x - P_1)/P_2] + P_5 + P_6x$$

でfit. fit bias、系統誤差を考慮して

(主要な系統誤差への寄与はビームエネルギーのふらつき、
トラッキングの誤差)

$$M_\tau = [1776.61 \pm 0.13(\text{stat}) \pm 0.35(\text{sys})] \text{ MeV}/c^2,$$

$$|M_{\tau^+} - M_{\tau^-}|/M_\tau < 2.8 \times 10^{-4} \quad \text{at } 90\% \text{C.L.},$$



PDG2022:

$$M_\tau = 1776.86 \pm 0.12 \text{ (MeV}/c^2)$$

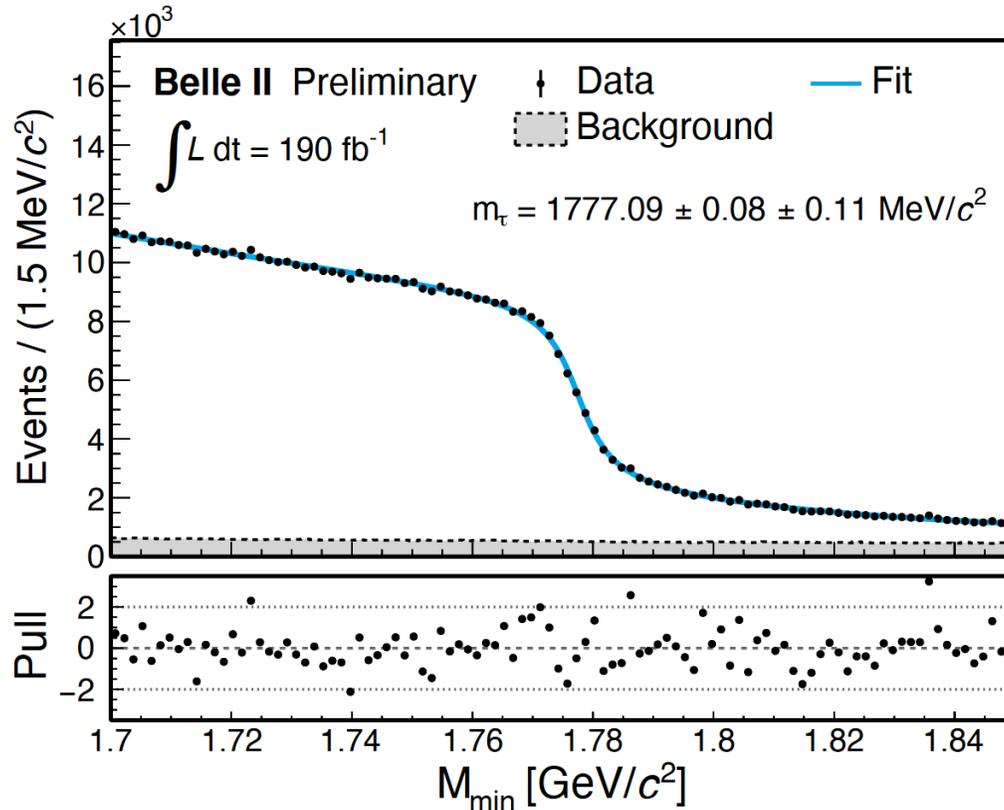
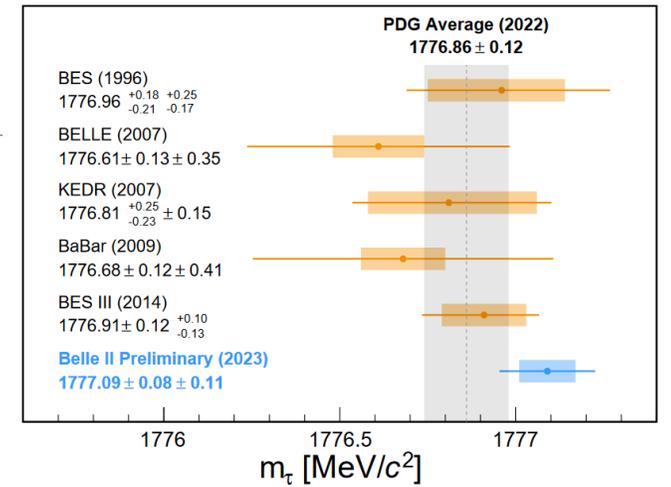
BESIIIが世界最高精度

$$M_\tau = 1776.91 \pm 0.12^{+0.10}_{-0.13} \text{ (MeV}/c^2)$$

Belle IIの結果

$\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$ を選別後

$$M_{min} = \sqrt{M_{3\pi}^2 - 2\left(\frac{\sqrt{s}}{2} - E_{3\pi}^*\right)(E_{3\pi}^* - P_{3\pi}^*)} < m_\tau$$



$$F(M_{min}) = 1 - P_3 \cdot \arctan\left(\frac{M_{min} - P_1}{P_2}\right) + P_4(M_{min} - P_1) + P_5(M_{min} - P_1)^2$$

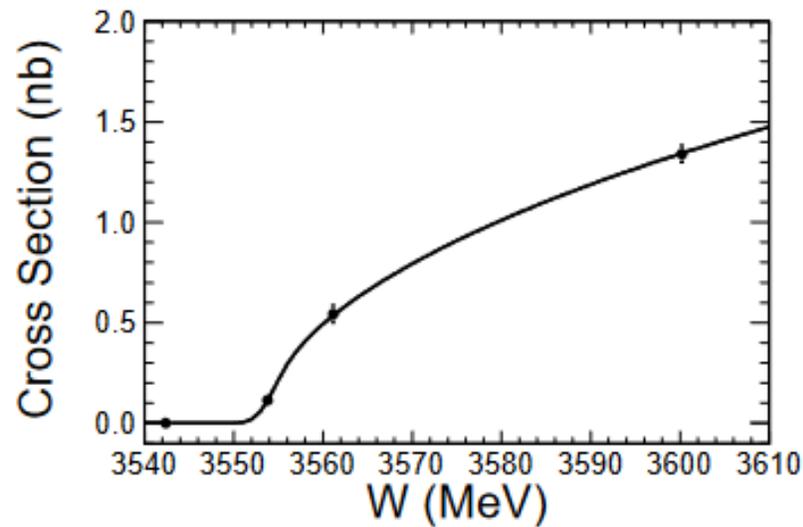
でフィット。 P_1 が質量に相当する

BES III の結果

Tau-charm factoryを謳っている電子陽電子散乱実験がある。

→が、実際はcharmの研究ばかり。

1つだけある τ の結果が...



加速器の重心エネルギーを次から次へと変えていって $\tau^+\tau^-$ の生成断面積を測定。

あるところまでは $\tau^+\tau^-$ の生成断面積0、あるところから徐々に増えていく。

ギリギリ0じゃなくなる場所のエネルギーが τ 2個分の質量

崩壊による測定と生成による測定の違い

| VALUE (MeV) | | EVTS | DOCUMENT ID | TECN | COMMENT |
|---|--------------------|------|--|-------------|--|
| 1776.86 ± 0.12 | OUR AVERAGE | | | | |
| 1776.91 ±0.12 ^{+0.10} _{-0.13} | | 1171 | ¹ AUKI 数式を入力します | BES3 | 23.3 pb ⁻¹ , $E_{\text{cm}}^{ee} = 3.54 - 3.60$ GeV |
| 1776.68 ±0.12 ±0.41 | | 682k | ² AUBERT | 2009AK BABR | 423 fb ⁻¹ , $E_{\text{cm}}^{ee} = 10.6$ GeV |
| 1776.81 ^{+0.25} _{-0.23} ±0.15 | | 81 | ANASHIN | 2007 KEDR | 6.7 pb ⁻¹ , $E_{\text{cm}}^{ee} = 3.54 - 3.78$ GeV |
| 1776.61 ±0.13 ±0.35 | | | ² BELOUS | 2007 BELL | 414 fb ⁻¹ $E_{\text{cm}}^{ee} = 10.6$ GeV |

= 1777.09 ± 0.08 ± 0.11 MeV/c²

Belle II

τ LFV decay at LHC

$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ search results

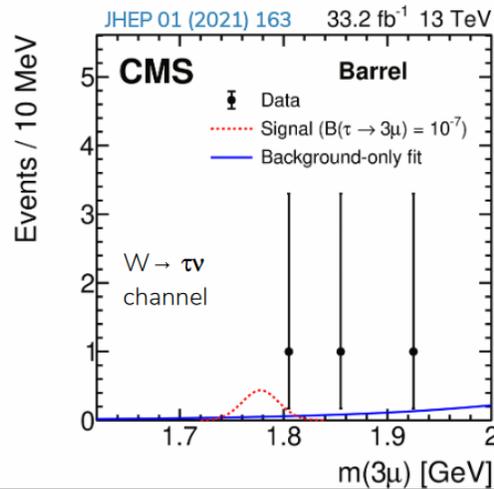
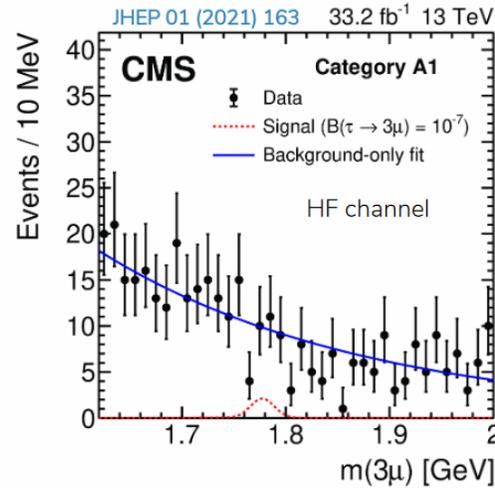


LFV searches at ATLAS and CMS

CMS Results:

- Observed (Expected) limit is 8.0 (6.9) $\times 10^{-8}$ @ 90% C.L.
 - W boson channel: 20 (13) $\times 10^{-8}$ @ 90% C.L.
 - HF channel: 9.2 (10.0) $\times 10^{-8}$ @ 90% C.L.

Best mass resolution categories



| Results comparison | $\tau \rightarrow 3\mu$ 90% CL Limits |
|--|---|
| Belle Phys.Lett.B687:139-143 (2010) | 2.1×10^{-8} |
| BaBar Phys.Rev.D81:111101 (2010) | 3.3×10^{-8} |
| LHCb JHEP 02 (2015) 121 | 4.6×10^{-8} (8 TeV) |
| ATLAS Eur. Phys. J. C (2016) 76 | 3.76×10^{-7} (W $\rightarrow \tau\nu$, 8 TeV) |
| CMS JHEP 01 (2021) 163 | 8.0×10^{-8} (W $\rightarrow \tau\nu$ and hadrons, 13 TeV) |

Luca Fiorini
Luca.Fiorini@cern.ch
(IFIC, U. of Valencia-CSIC)

on behalf of the ATLAS and CMS Collaborations

TAU2021 Workshop
27th September 2021

supported by: RTI2018094270B100

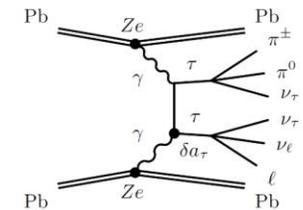
τ MDM measurement at LHC

Conclusions

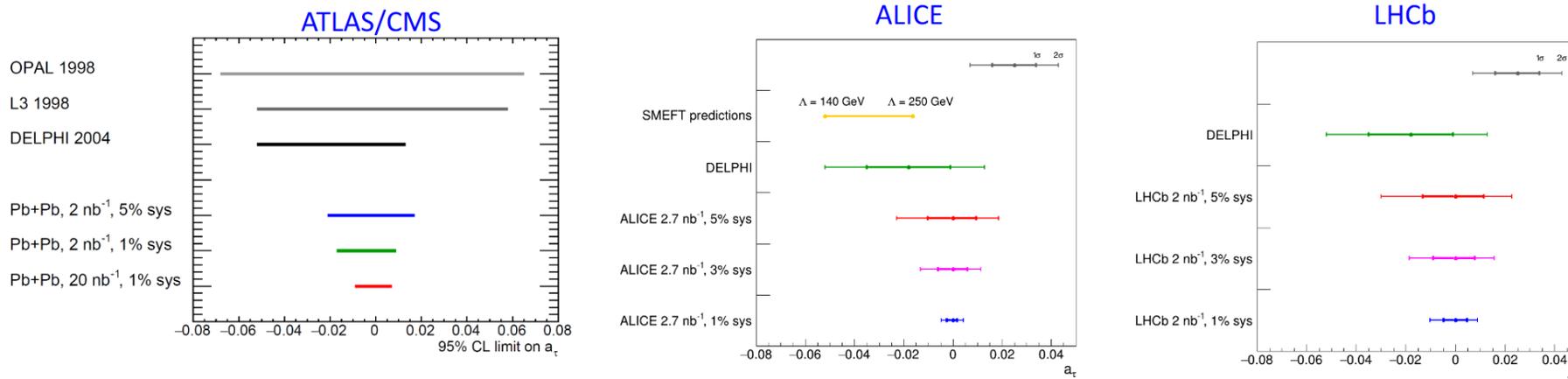
- ATLAS/CMS statistics from Run2 can be used to improve a_τ limits
- ALICE can help to extend a_τ measurements down to low p_T
- precision is limited by systematic uncertainties
- Expected limits on a_τ at least x2 better compared to DELPHI results

Feasibility of tau g-2 measurements with ultraperipheral collisions of heavy ions

Evgeny Kryshen¹
 in collaboration with Nazar Burmasov¹, Paul Buehler² and Roman Lavicka²
¹NRC KI "Petersburg Nuclear Physics Institute", Gatchina, Russia
²Stefan Meyer Institute for Subatomic Physics, Vienna, Austria



The 16th International Workshop on Tau Lepton Physics
 1 October 2021



This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR, 21-52-14006) and the Austrian Science Fund (FWF, I 5277-N)