Tau物理（実験）

早坂　圭司（新潟大学）

タウレプトン

特徴

- 荷電レプトン＝電子の仲間
- 3つ目の荷電レプトン
  - triton (third) = τριτον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
- 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）

FERMIONS		
Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	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

タウレプトンを発見した人

マーチン・パール

マーチン・ルイス・パール(Martin Lewis Perl, 1927年6月24日 – 2014年9月30日[1])アメリカ合衆国の物理学者。タウ粒子の発見により1995年度のノーベル物理学賞を受賞した。

ノーベル賞受賞者

受賞年: 1995年

受賞部門: ノーベル物理学賞

受賞理由: レプトン物理学の先駆的実験、タウ粒子の発見

略歴 [編集]

ニューヨーク出身。両親はロシアのポーランド人居住区からのユダヤ人移民。

1948年にブルックリンのポリテクニック大学を卒業し、1955年にコロンビア大学で博士号を取得した。その後、ミシガン大学とSLAC国立加速器研究所(スタンフォード線形加速器センター)で働いた。

現在は米国のための科学者と技術者のアドバイザリー委員を務めている。

外部リンク [編集]

- Biography and Bibliographic Resources, from the Office of Scientific and Technical Information, United States Department of Energy
- Nobel autobiography

http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%9E%E3%83%BC%E3%83%81%E3%83%B3%E3%83%BB%E3%83%91%E3%83%BC%E3%83%AB

タウレプトンの発見

Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+-e^- Annihilation*

M. L. Perl, G. S. Abrams, A. M. Boyarski, M. Breidenbach, D. D. Briggs, F. Bulos, W. Chinowsky, J. T. Dakin,† G. J. Feldman, C. E. Friedberg, D. Fryberger, G. Goldhaber, G. Hanson, F. B. Heile, B. Jean-Marie, J. A. Kadyk, R. R. Larsen, A. M. Litke, D. Lüke,‡ B. A. Lulu, V. Lüth, D. Lyon, C. C. Morehouse, J. M. Paterson, F. M. Pierre,§ T. P. Pun, P. A. Rapidis, B. Richter, B. Sadoulet, R. F. Schwitters, W. Tanenbaum, G. H. Trilling, F. Vannucci,‖ J. S. Whitaker, F. C. Winkelmann, and J. E. Wiss

Lawrence Berkeley Laboratory and Department of Physics, University of California, Berkeley, California 94720, and Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 18 August 1975)

We have found events of the form $e^+ + e^- \to e^\pm + \mu^\mp$ + missing energy, in which no other charged particles or photons are detected. Most of these events are detected at or above a center-of-mass energy of 4 GeV. The missing-energy and missing-momentum spectra require that at least two additional particles be produced in each event. We have no conventional explanation for these events.

Phys. Rev. Lett. **35**, 1489 – Published 1 December 1975

SLACのSPEARという加速器(4GeV) で64事象見つかった。

$e^+ + e^- \to \tau^+ + \tau^- \to e^\pm + \mu^\mp$ + missing energy

電子・陽電子コライダー実験では始状態のエネルギーがわかるので測定しそこなったエネルギーの総量がわかる=missing energy

素粒子発見の歴史

1930~1960 n,p, μ , π ,K, Λ , Σ ,…

- 1974 J/ψ ($c\bar{c}$) ← １１月革命
- 1975 τ
- 1977 Υ ($b\bar{b}$)
- 1983 W/Z
- 1995 top
- 2012 Higgs

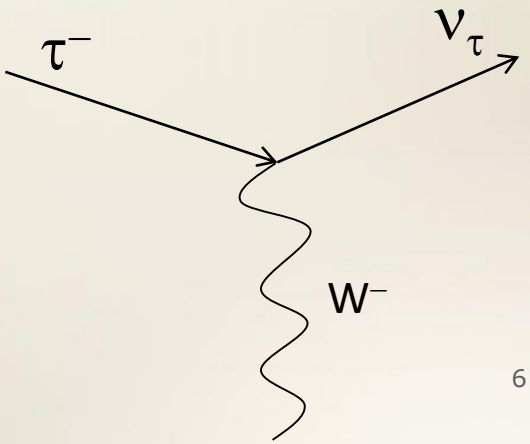
タウレプトン

特徴

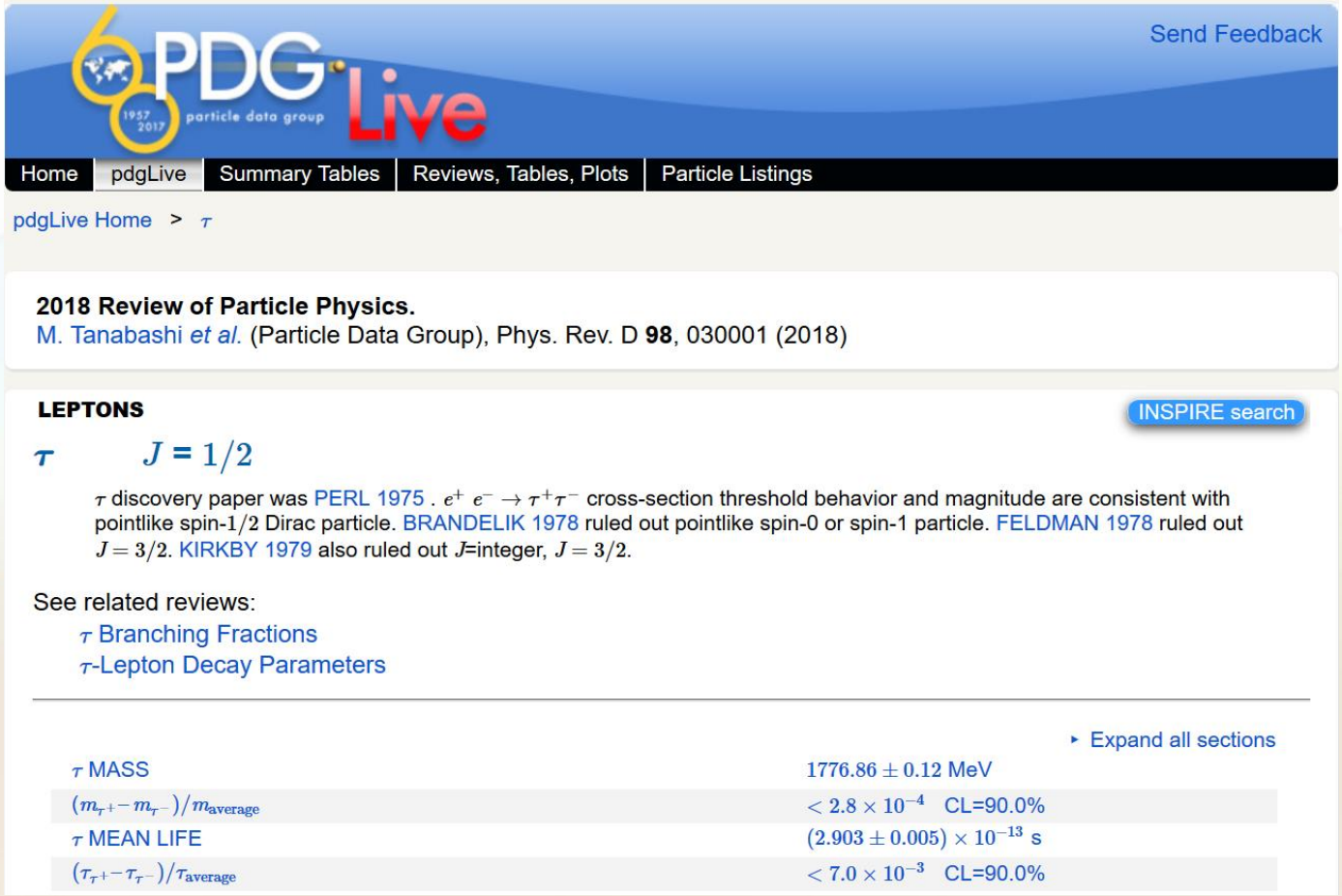
- 荷電レプトン＝電子の仲間
- 3つ目の荷電レプトン
  - triton (third) = τριτονの頭文字
- 最も重いレプトン
  - πよりも重い
    （ミューオンはπより軽い）
    ＝πを含む崩壊が可能
- 弱い相互作用で崩壊
  - 崩壊モードは多彩
    （ミューオンはせいぜい3種類）
  - ニュートリノが必ずある
    =普通の測定では測れない

FERMIONS		
Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	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



PDGによると...



Send Feedback

PDG Live — particle data group 1957 2017

Home | pdgLive | Summary Tables | Reviews, Tables, Plots | Particle Listings

pdgLive Home > τ

2018 Review of Particle Physics.
M. Tanabashi *et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018)

LEPTONS

INSPIRE search

τ $J = 1/2$

τ discovery paper was PERL 1975 . $e^+ e^- \to \tau^+\tau^-$ cross-section threshold behavior and magnitude are consistent with pointlike spin-1/2 Dirac particle. BRANDELIK 1978 ruled out pointlike spin-0 or spin-1 particle. FELDMAN 1978 ruled out $J = 3/2$. KIRKBY 1979 also ruled out J=integer, $J = 3/2$.

See related reviews:
- τ Branching Fractions
- τ-Lepton Decay Parameters

Expand all sections

τ MASS	1776.86 ± 0.12 MeV
$(m_{\tau^+} - m_{\tau^-})/m_{\text{average}}$	$< 2.8 \times 10^{-4}$ CL=90.0%
τ MEAN LIFE	$(2.903 \pm 0.005) \times 10^{-13}$ s
$(\tau_{\tau^+} - \tau_{\tau^-})/\tau_{\text{average}}$	$< 7.0 \times 10^{-3}$ CL=90.0%

http://pdg.lbl.gov/ →PDGLive →τ

PDGによると...

Γ_1	particle$^-$ ≥ 0 neutrals $\geq 0 K^0$ ν_τ (``1-prong")	$(85.24 \pm 0.06)\%$
Γ_2	particle$^-$ ≥ 0 neutrals $\geq 0 K^0_L$ ν_τ	$(84.58 \pm 0.06)\%$
Γ_3	$\mu^- \overline{\nu}_\mu \nu_\tau$	$(17.39 \pm 0.04)\%$
Γ_4	$\mu^- \overline{\nu}_\mu \nu_\tau \gamma$	$(3.67 \pm 0.08) \times 10^{-3}$
Γ_5	$e^- \overline{\nu}_e \nu_\tau$	$(17.82 \pm 0.04)\%$
Γ_6	$e^- \overline{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	$(1.83 \pm 0.05)\%$
Γ_7	$h^- \geq 0 K^0_L$ ν_τ	$(12.03 \pm 0.05)\%$
Γ_8	$h^- \nu_\tau$	$(11.51 \pm 0.05)\%$
Γ_9	$\pi^- \nu_\tau$	$(10.82 \pm 0.05)\%$
Γ_{10}	$K^- \nu_\tau$	$(6.96 \pm 0.10) \times 10^{-3}$
Γ_{11}	$h^- \geq 1$ neutrals ν_τ	$(37.00 \pm 0.09)\%$
Γ_{12}	$h^- \geq 1$ $\pi^0 \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(36.51 \pm 0.09)\%$
Γ_{13}	$h^- \pi^0 \nu_\tau$	$(25.93 \pm 0.09)\%$
Γ_{14}	$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	$(25.49 \pm 0.09)\%$
Γ_{15}	$\pi^- \pi^0$ non-$\rho(770)$ ν_τ	$(3.0 \pm 3.2) \times 10^{-3}$
Γ_{16}	$K^- \pi^0 \nu_\tau$	$(4.33 \pm 0.15) \times 10^{-3}$
Γ_{17}	$h^- \geq 2$ $\pi^0 \nu_\tau$	$(10.81 \pm 0.09)\%$
Γ_{18}	$h^- 2$ $\pi^0 \nu_\tau$	$(9.48 \pm 0.10)\%$
Γ_{19}	$h^- 2$ $\pi^0 \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(9.32 \pm 0.10)\%$
Γ_{20}	$\pi^- 2$ $\pi^0 \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(9.26 \pm 0.10)\%$

1prong:85%

PDGによると...

Γ_{62}	$h^- h^- h^+ \geq 0$ neutrals $\geq 0 K^0_L \nu_\tau$	$(15.21 \pm 0.06)\%$
Γ_{63}	$h^- h^- h^+ \geq 0$ neutrals ν_τ (ex. $K^0_S \to \pi^+\pi^-$)(``3-prong")	$(14.55 \pm 0.06)\%$
Γ_{64}	$h^- h^- h^+ \nu_\tau$	$(9.80 \pm 0.05)\%$
Γ_{65}	$h^- h^- h^+ \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(9.46 \pm 0.05)\%$
Γ_{66}	$h^- h^- h^+ \nu_\tau$ (ex.K^0, ω)	$(9.43 \pm 0.05)\%$
Γ_{67}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$	$(9.31 \pm 0.05)\%$
Γ_{68}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(9.02 \pm 0.05)\%$
Γ_{69}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex.K^0), non-axial vector	$< 2.4\%$
Γ_{70}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \nu_\tau$ (ex.K^0, ω)	$(8.99 \pm 0.05)\%$
Γ_{71}	$h^- h^- h^+ \geq 1$ neutrals ν_τ	$(5.29 \pm 0.05)\%$
Γ_{72}	$h^- h^- h^+ \geq 1\ \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0)	$(5.09 \pm 0.05)\%$
Γ_{73}	$h^- h^- h^+ \pi^0 \nu_\tau$	$(4.76 \pm 0.05)\%$
Γ_{74}	$h^- h^- h^+ \pi^0 \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(4.57 \pm 0.05)\%$
Γ_{75}	$h^- h^- h^+ \pi^0 \nu_\tau$ (ex. K^0, ω)	$(2.79 \pm 0.07)\%$
Γ_{76}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$	$(4.62 \pm 0.05)\%$
Γ_{77}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(4.49 \pm 0.05)\%$
Γ_{78}	$\pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (ex.K^0, ω)	$(2.74 \pm 0.07)\%$

1prong:85%
3prong:15%

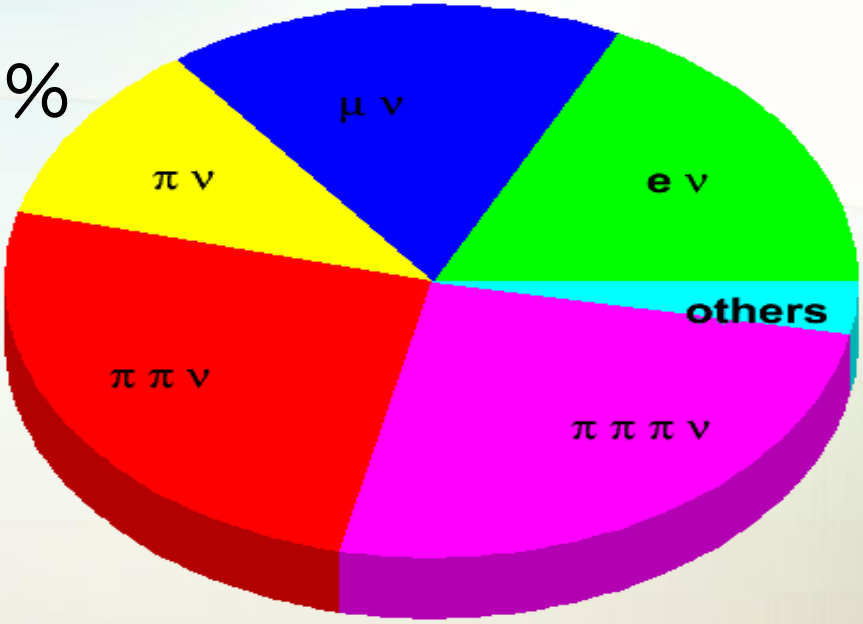
Γ_{114}	$3\ h^- 2\ h^+ \geq 0$ neutrals ν_τ (ex. $K^0_S \to \pi^-\pi^+$)(``5-prong")	$(9.9 \pm 0.4) \times 10^{-4}$
Γ_{115}	$3\ h^- 2\ h^+ \nu_\tau$ (ex.K^0)	$(8.22 \pm 0.32) \times 10^{-4}$
Γ_{116}	$3\ \pi^- 2\ \pi^+ \nu_\tau$ (ex.K^0, ω)	$(8.21 \pm 0.31) \times 10^{-4}$
Γ_{117}	$3\ \pi^- 2\ \pi^+ \nu_\tau$ (ex.K^0, ω, $f_1(1285)$)	$(7.69 \pm 0.30) \times 10^{-4}$

5prong:0.1%

つまりτ崩壊は概ね
1or3prong

タウレプトンの崩壊

- レプトニック崩壊 35%
- 1-prong 崩壊 85%
  (荷電粒子が1個)
- 3-prong 崩壊 15%
- 5-prong 崩壊 0.1%
- ΔS=1崩壊　3%
  (Kを含む崩壊)



B-factoryにおけるタウ生成

- B-factoryでは、必ずタウはペアでできる

$$e^+e^- \to \tau^+\tau^-$$

7割2分は2-prong, 2割5分は4-prong, 2分は 6-prong

タウ事象はクォーク事象に比べてprong数が低い

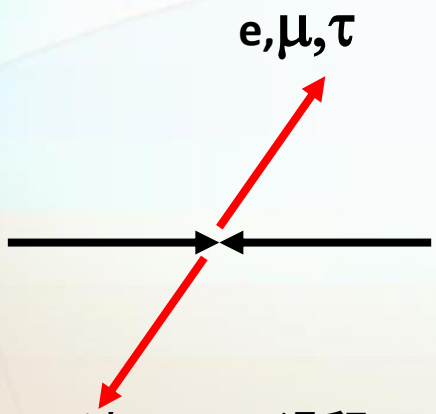
ここでB-factoryで生成される事象と、

タウ事象とその他の事象の違い、を見てみよう

Bファクトリーで生成されるイベント

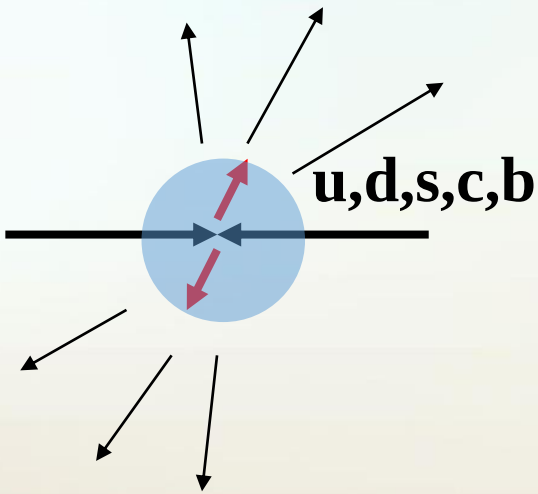
- Bファクトリーで生成されるのは$B\bar{B}$だけではない！

レプトン

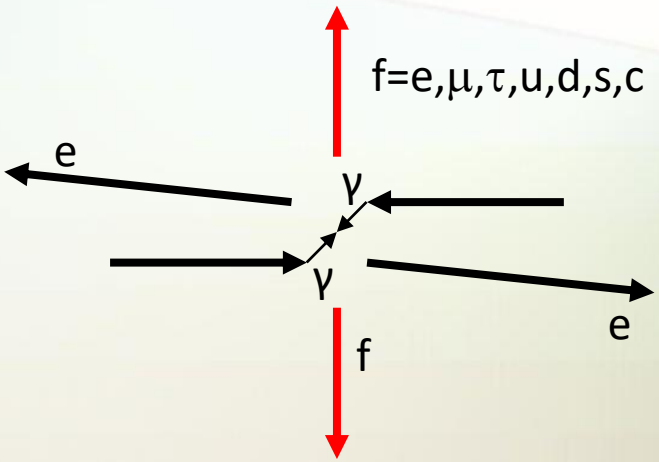


ee→eeはBhabha過程と呼ばれる。一緒にγが生成される過程はradiativeという形容詞がつく（Radiative Bhabha =ee→eeγ）

クォーク



2光子過程（ee→γγ→eeff）

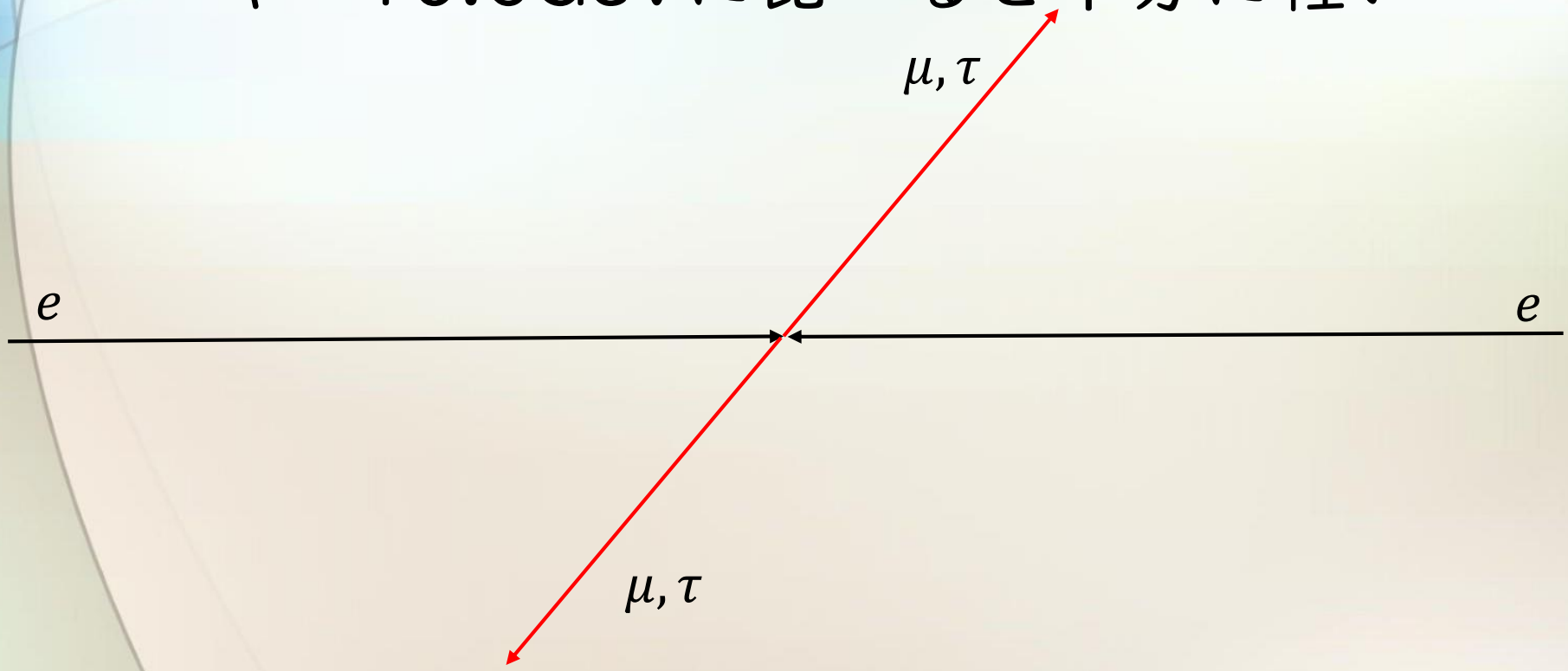


σ(μμ)~σ($d\bar{d}$)~σ($c\bar{c}$)~σ($b\bar{b}$)~σ(ττ)~1nb
σ(bhabha)~120xσ(ττ)
σ(eeee)~40xσ(ττ), σ(eeμμ)~20xσ(ττ),
σ(eeuu)~10xσ(ττ)

B以外の素粒子も十分大量に

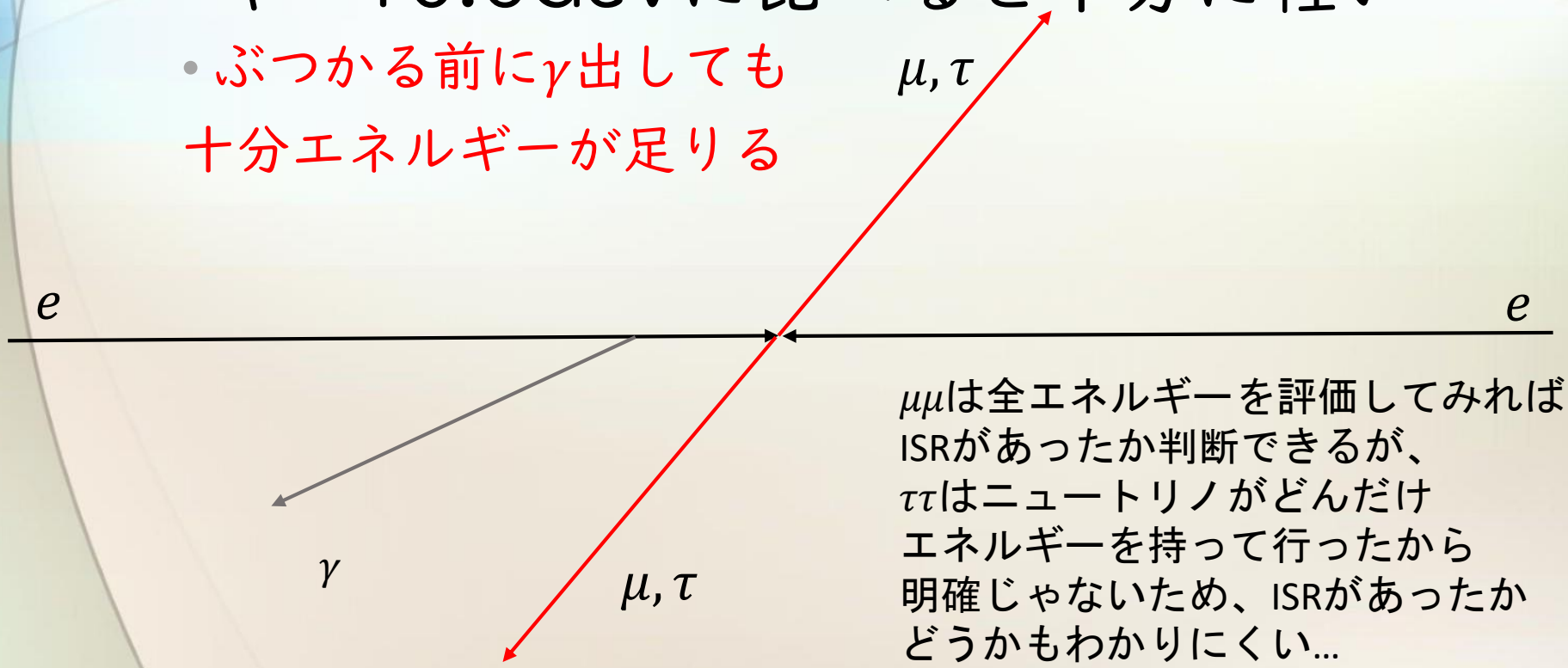
Initial State Radiation (ISR)

- $\tau\tau$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)

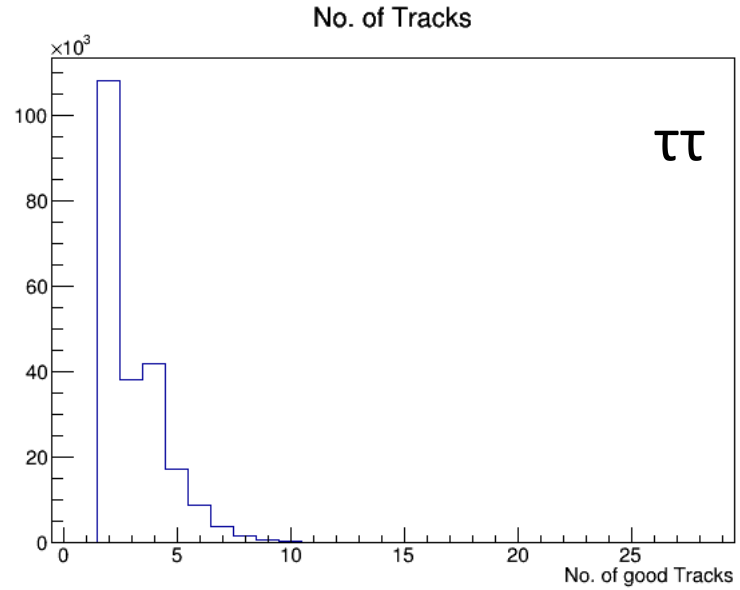
- $\tau\tau$とか$\mu\mu$とかはBファクトリーのエネルギー10.6GeVに比べると十分に軽い
- ぶつかる前にγ出しても十分エネルギーが足りる

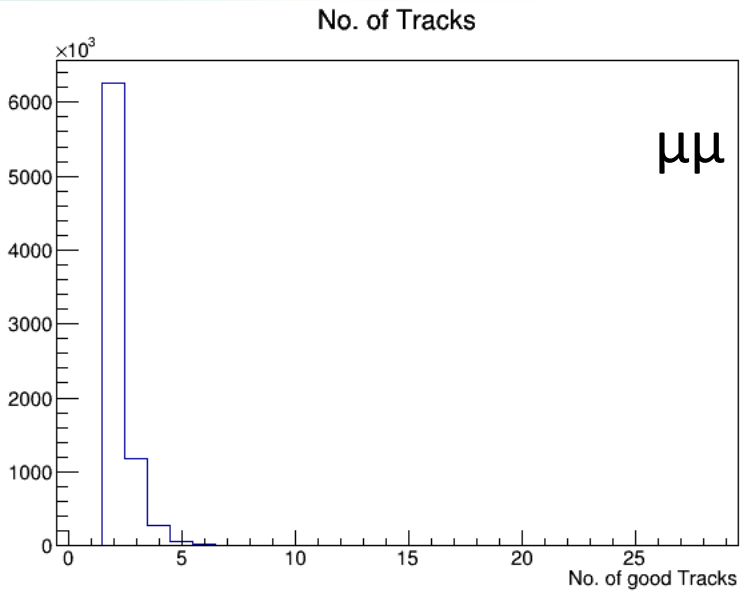


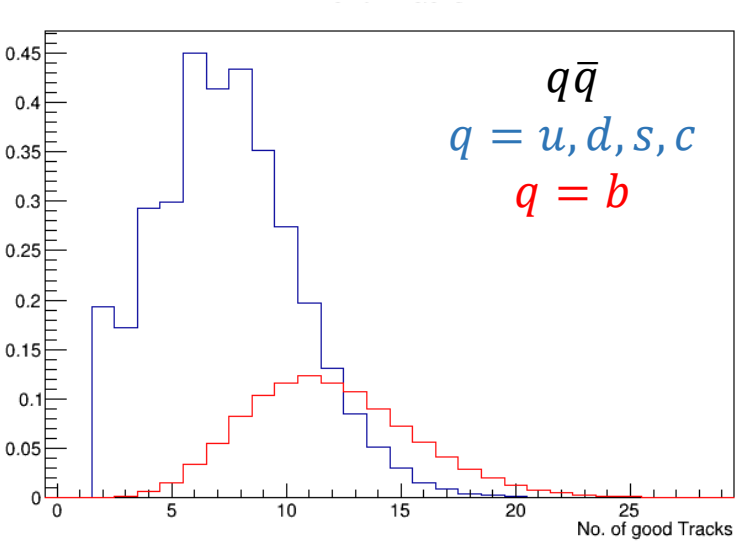
$\mu\mu$は全エネルギーを評価してみればISRがあったか判断できるが、$\tau\tau$はニュートリノがどんだけエネルギーを持って行ったから明確じゃないため、ISRがあったかどうかもわかりにくい…

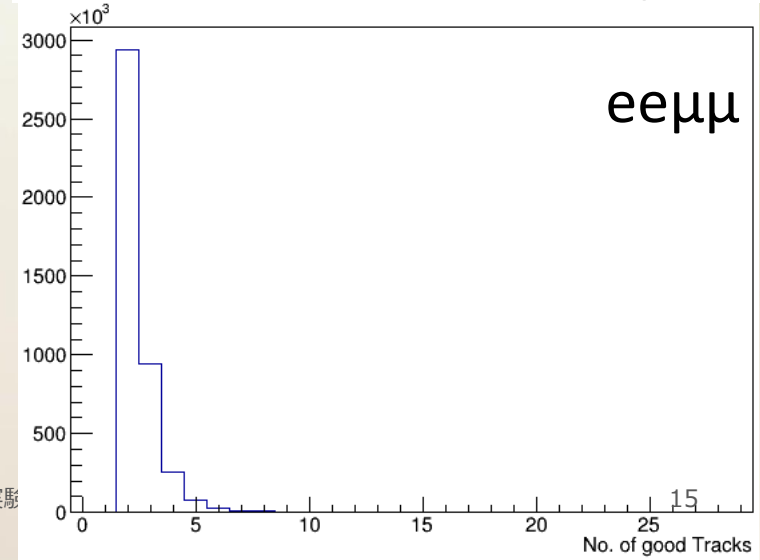
MC10 BGx1
Good track>=2

観測される荷電飛跡（粒子）の本数

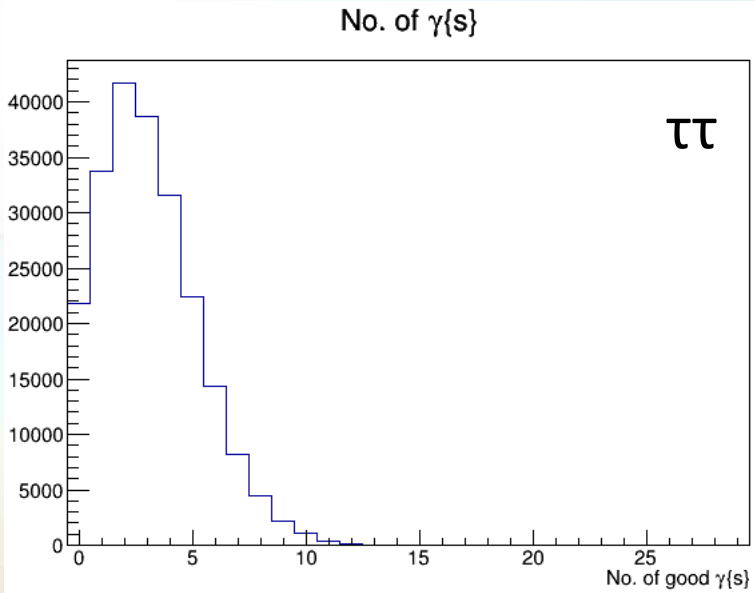


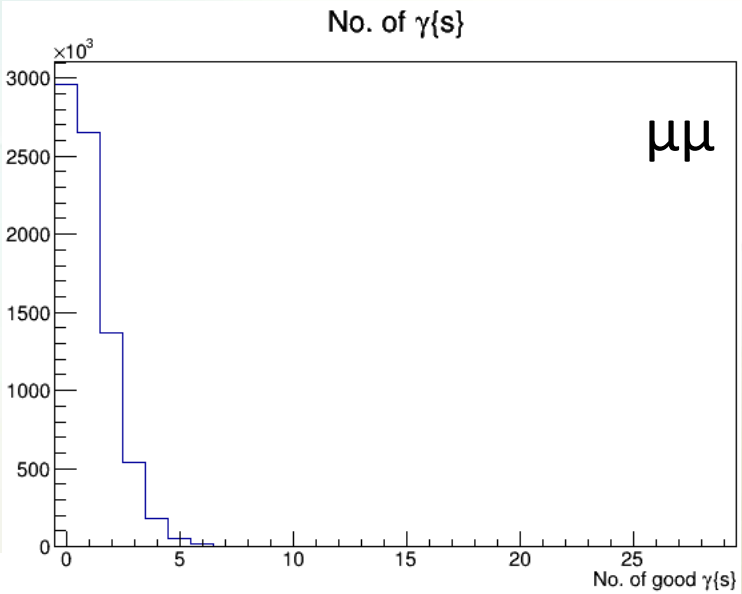


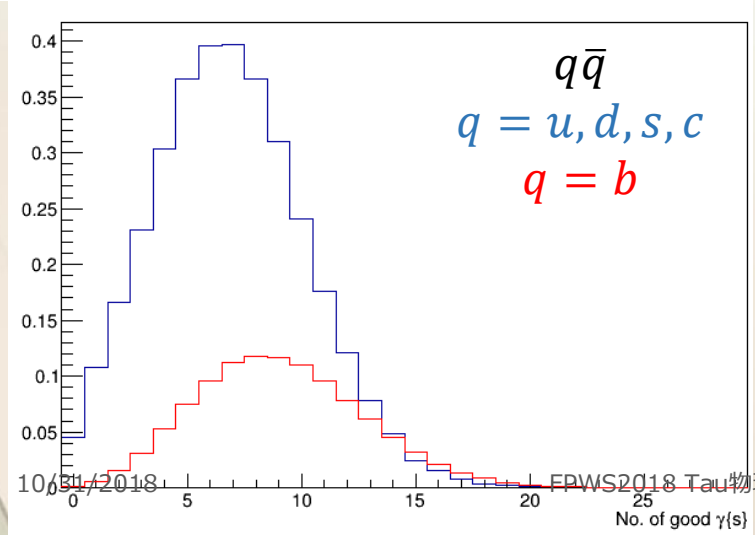


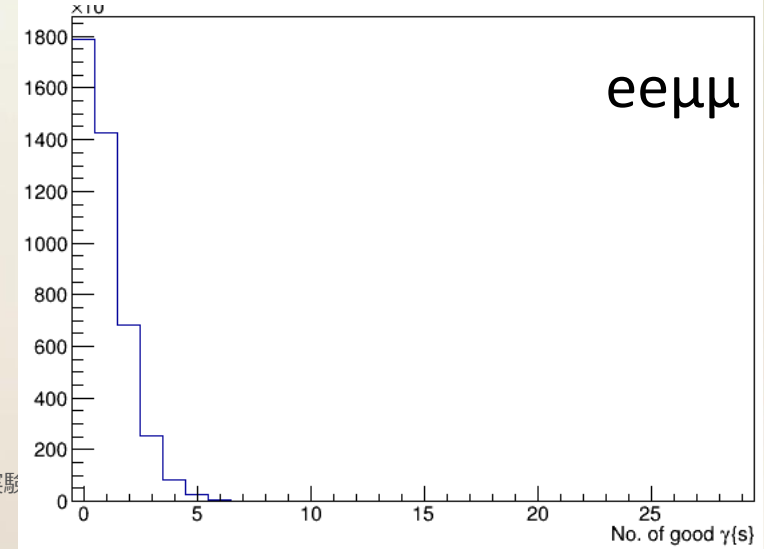


観測される光子数

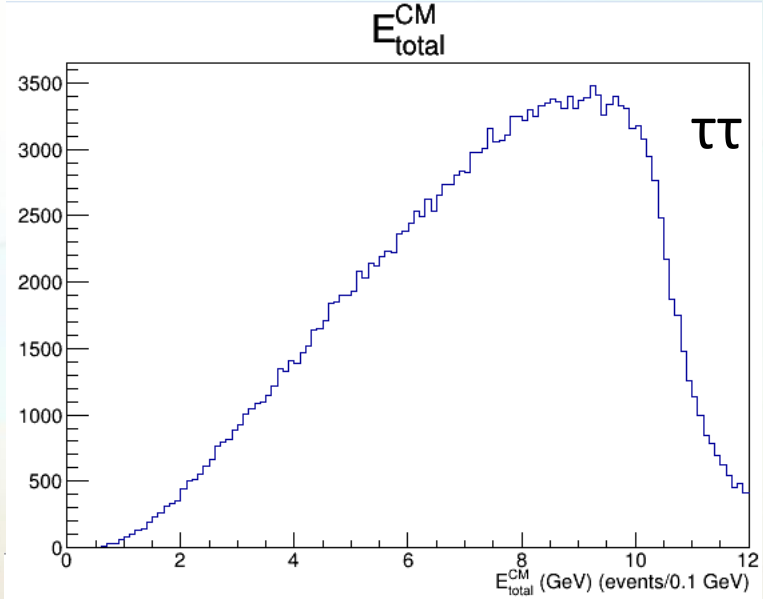

No. of γ{s}
ττ
No. of good γ{s}

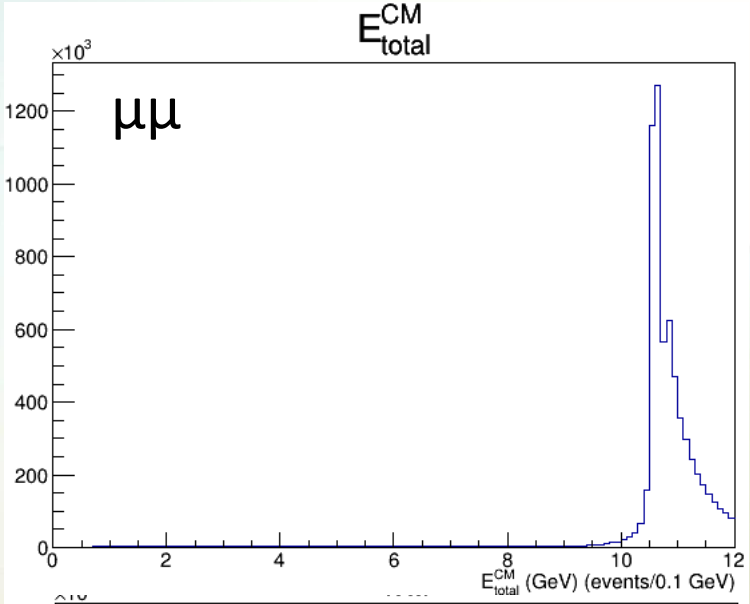

No. of γ{s}
×10³
μμ
No. of good γ{s}

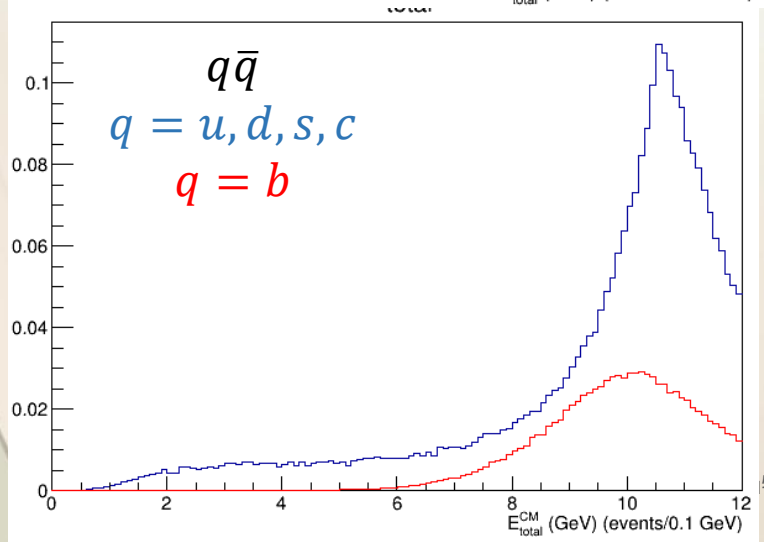

$q\bar{q}$
$q = u, d, s, c$
$q = b$
No. of good γ{s}

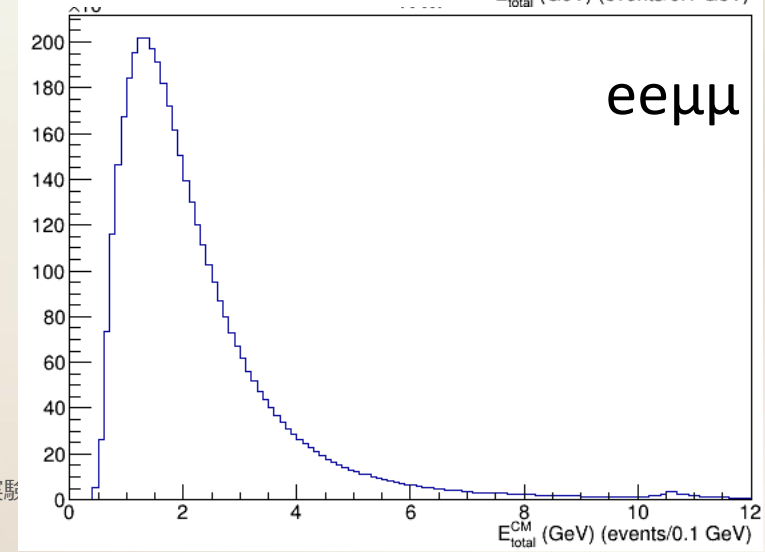

eeμμ
No. of good γ{s}

観測される全エネルギー（重心系）









タウのいいとこ・わるいとこ

- 荷電粒子の本数が他の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）

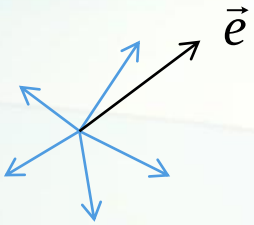
- Bファクトリーの$\sqrt{s}$=10.6 GeVに比べてタウペア3.5GeVはかなり低いのでタウは高運動量で生成される。（B中間子はほぼ止まってる）→どっちのタウの子か分離しやすい
- タウの方向はよくわかんない

*SMの範囲内で

Thrust vector

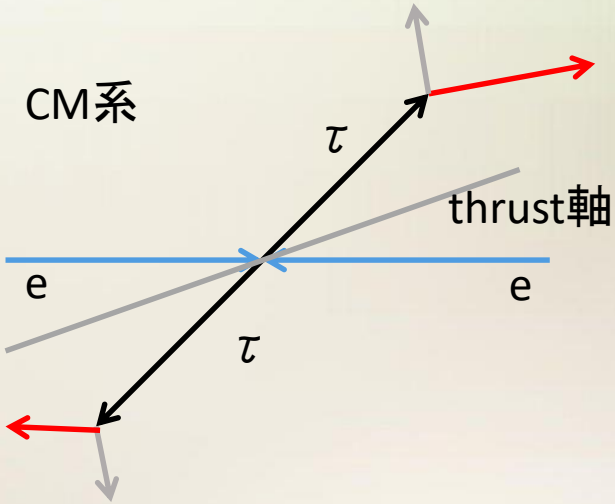
見えている荷電粒子
光子全ての和

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



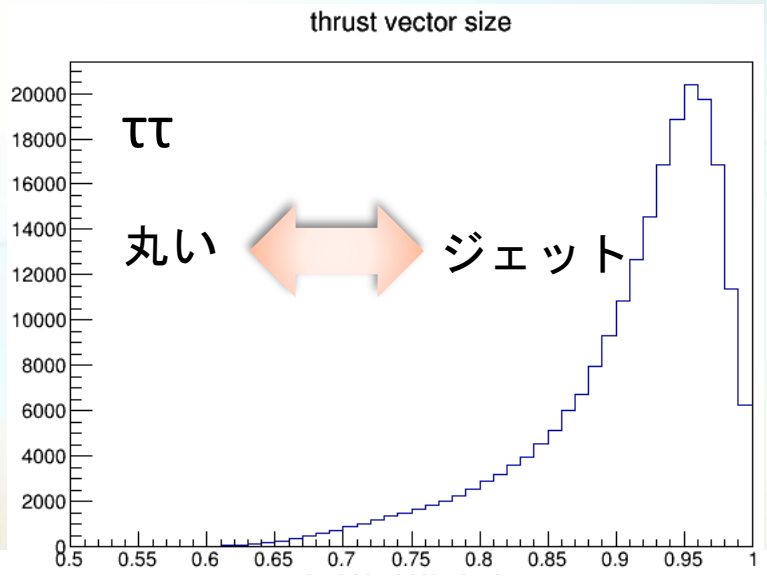
いろいろな $\vec{e}$ に対してＴを計算して
最も大きなＴを与える $\vec{e}$ を向きとして
大きさをＴとするベクトルをThrust vector
と呼ぶ。
→見えている荷電粒子、光子が
一番運動量を落とす方向

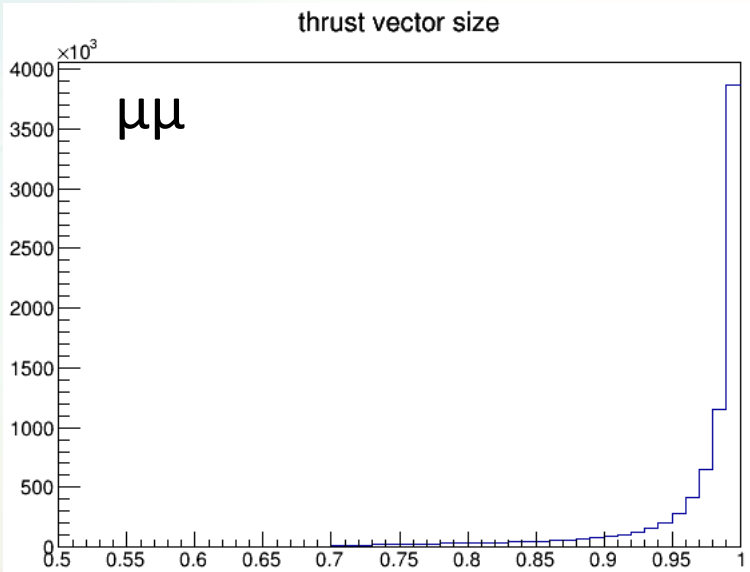
τ対事象は、ニュートリノが
あって、τの方向が決められない
ので、その“代用品”として便利

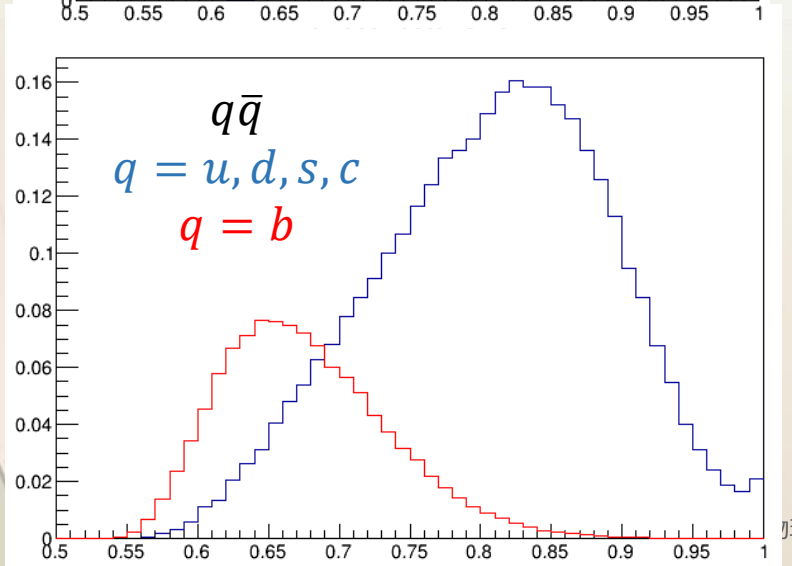


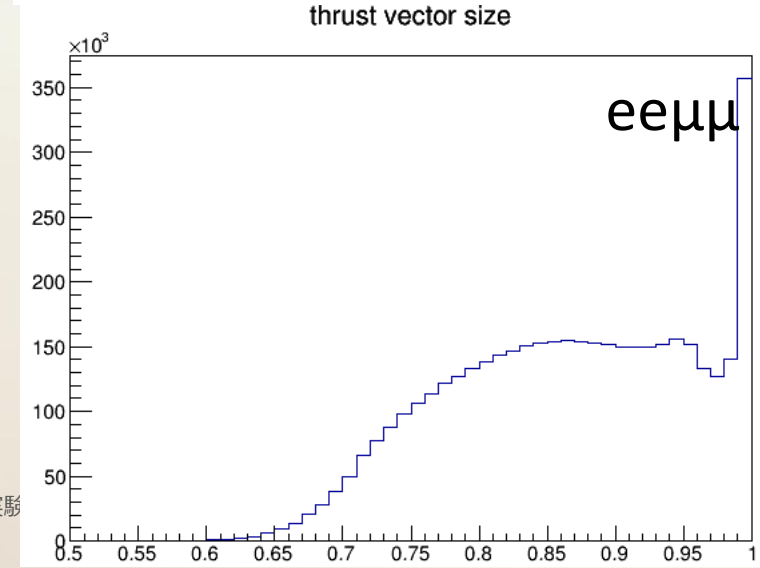
似たような概念に、acoplanarityと
sphericityがある。

thrustの大きさ


thrust vector size
ττ
丸い
ジェット


thrust vector size
×10³
μμ


$q\bar{q}$
$q = u, d, s, c$
$q = b$


thrust vector size
×10³
eeμμ

タウ事象の特徴（まとめ）

- trackの本数（photonの数）

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

- Total energy (逆の相関：欠損運動量)

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

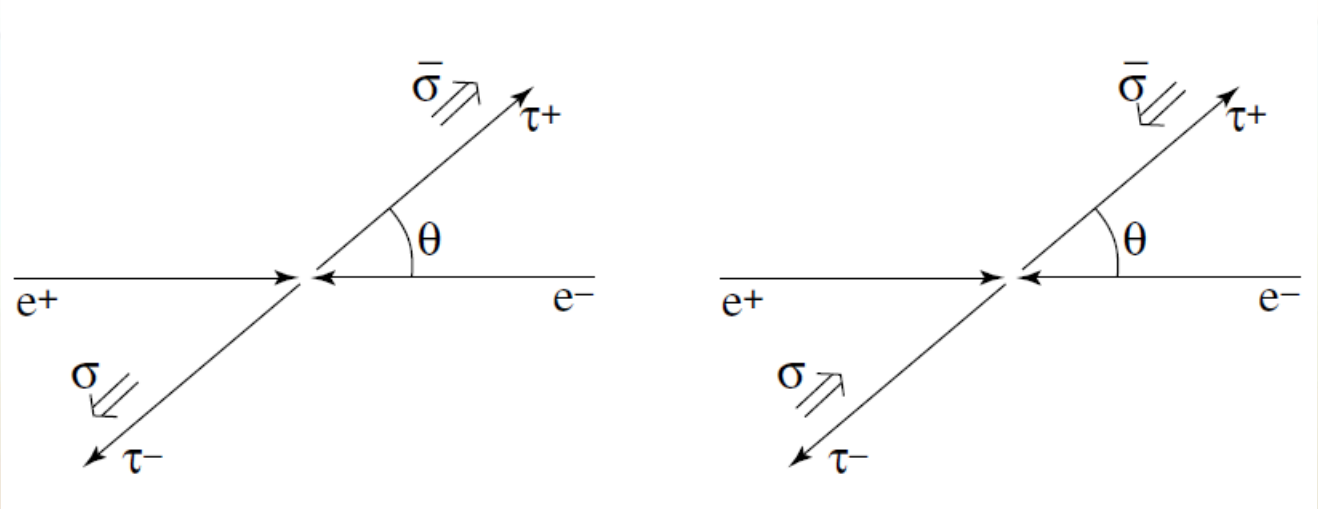
- size of thrust vector

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

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

あまり使われていないτの特徴

- τは対生成（$\tau^+\tau^-$）しているので、



スピンの情報はcorrelateしている。
スピンが重要な解析は反対側のタウの
情報を見るとよい。

τの崩壊とhelicity

最も簡単なτ→πν崩壊

h_τ:ヘリシティ、$x_\pi=E_\pi/E_{beam}$

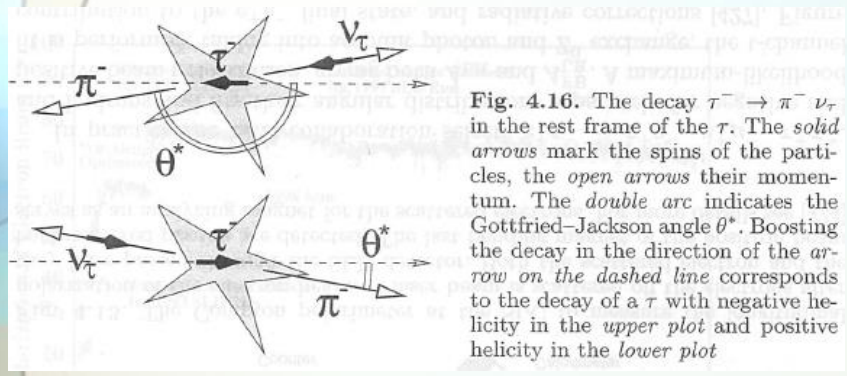
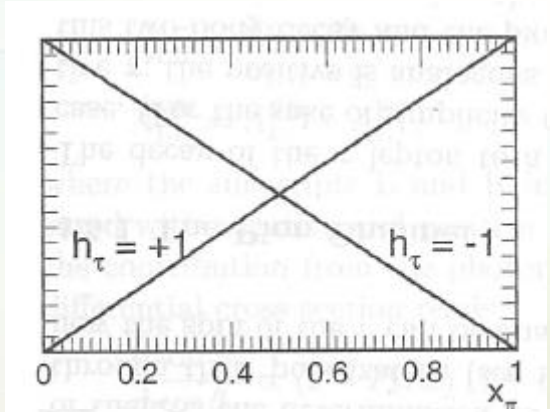


Fig. 4.16. The decay $\tau^- \to \pi^- \nu_\tau$ in the rest frame of the τ. The *solid arrows* mark the spins of the particles, the *open arrows* their momentum. The *double arc* indicates the Gottfried–Jackson angle θ^*. Boosting the decay in the direction of the *arrow on the dashed line* corresponds to the decay of a τ with negative helicity in the *upper plot* and positive helicity in the *lower plot*



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

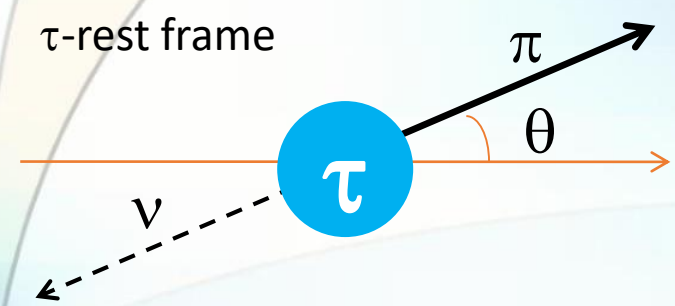
$$\frac{d\Gamma}{dx_\pi} \propto 1 + h_\tau (2x_\pi - 1).$$

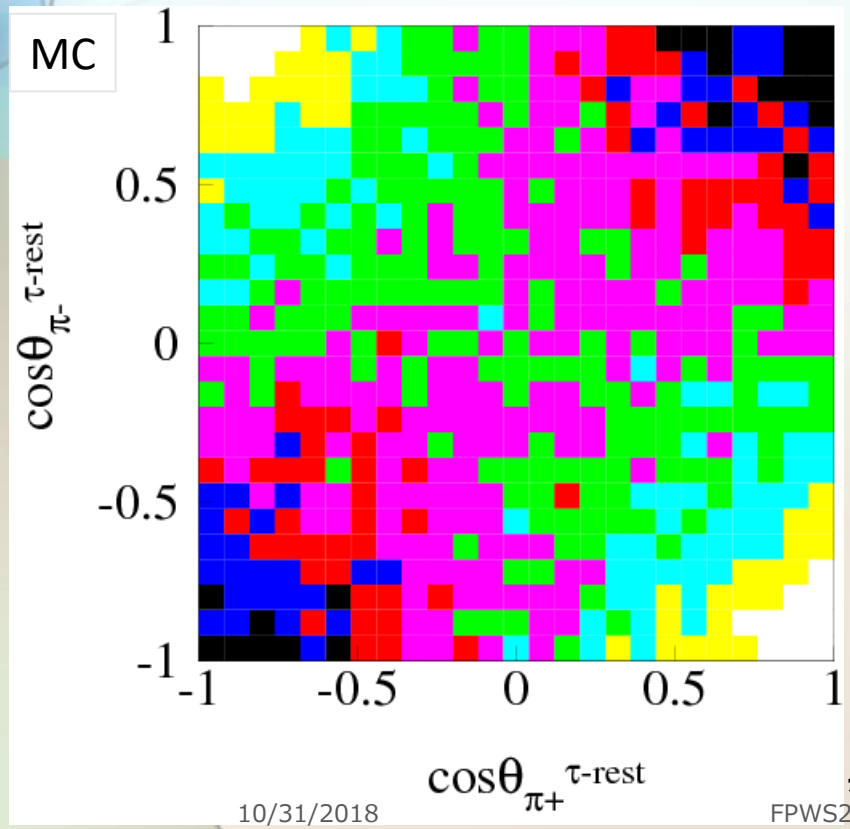
逆に言うとτのヘリシティはこの手の分布を通してだけ見ることができる。

五分五分で混ざってるとただの平らな分布

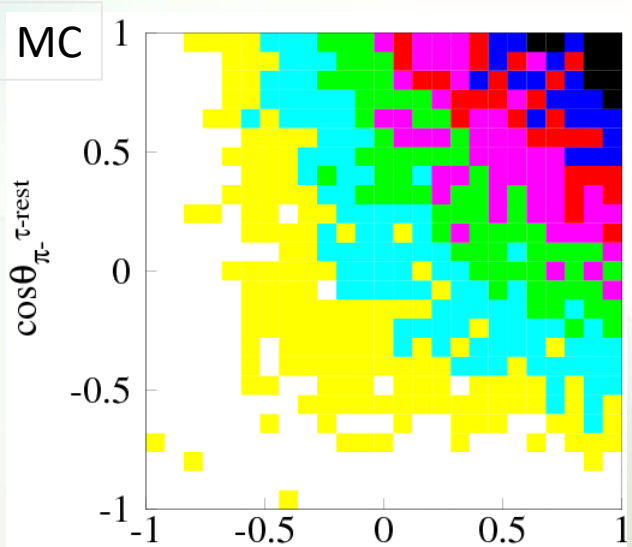
A.Shtal: Physics with Tau Leptons
ISBN: 978-3-540-66267-9 (Print)
978-3-540-48458-5 (Online)

$\tau^- \to \pi^- \nu / \tau^+ \to \pi^+ \nu$ で見る相関

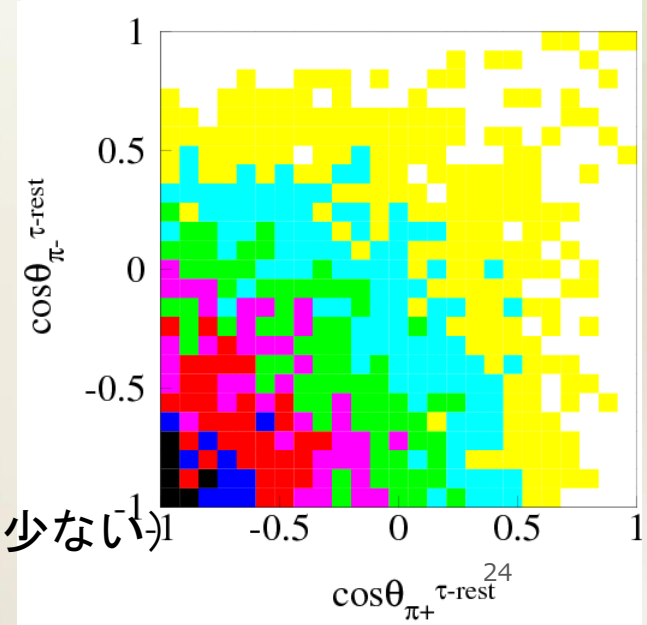




hel. of τ^- =1



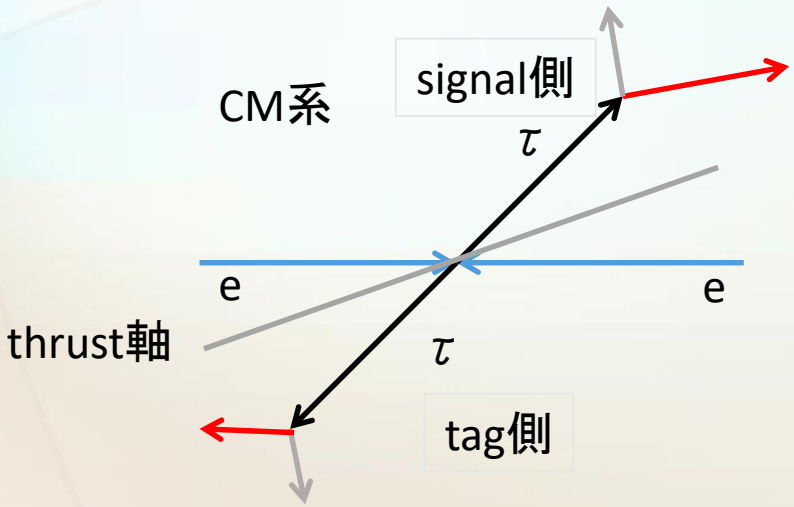
hel. of τ^- =-1



黒（多い）⇔白（少ない）

一般的なτの解析

- τはペアでできるので…



1. 見たい崩壊をしてるτをsignal側
もう片方をtag側と呼ぶ。
2-a. signal側がHadronic崩壊の時は、
tag側にleptonic崩壊を要求する。
2-b. signal側がLeptonic崩壊の時は、
tag側には同じLeptonがこないよう
要求する。
3. 欠損運動量、欠損質量は大きい
4. Thrust vectorの大きさは１付近だが
１よりは小さい
5. signal側とtag側は十分よく分離
されている。

タウ解析のいいとこ・わるいとこ

- 荷電粒子の本数が他の事象に比べて少ない
- 光子の数も少ない

タウ解析のいいとこ・わるいとこ

- 荷電粒子の本数が他の事象に比べて少ない
- 光子の数も少ない

ので

タウ解析のいいとこ・わるいとこ

- 荷電粒子の本数が他の事象に比べて少ない
- 光子の数も少ない

ので

解析で簡単⇔工夫のしようがない

見たい崩壊？

一般的には…

- 新物理探索
- 標準模型の精密測定

見たい崩壊？

一般的には…

- 新物理探索

標準模型で０なものがどれくらい０なのか？

- 標準模型の精密測定

標準模型の予測とどれくらい一致しているのか？

見たい崩壊？

- 新物理探索

τLFV、τCPV(+EDM)

- 標準模型の精密測定

分岐比の測定

質量スペクトル解析

Lorentz structure解析

見たい崩壊？

- 新物理探索

τLFV、τCPV(+EDM)

- 標準模型の精密測定

分岐比の測定（|Vus|,lepton universality,…)

質量スペクトル解析

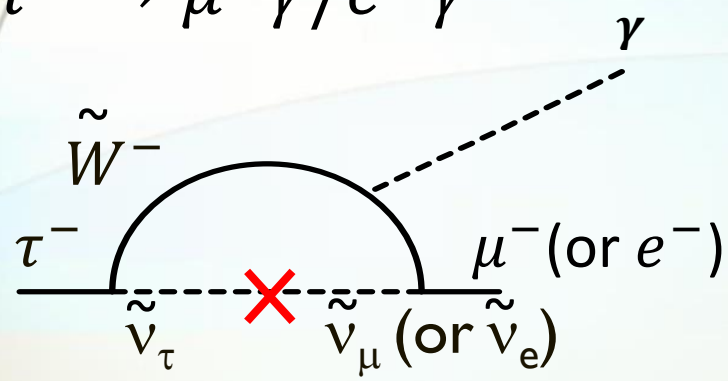
Lorentz structure解析(Sterile neutrino, Charged Higgs,…)

τ LFVでは、どんなモードが考えられる？

- とりあえず、電荷保存とスピン保存は守る
  - $\tau^- \to \mu^- \gamma / e^- \gamma$ 一番あり得そうなモード
  - $\tau^- \to \mu^- \mu^+ \mu^-$ ($\tau^- \to \ell^- \ell^+ \ell^-$, $\ell = e, \mu$) 一番解析が楽なモード
  - $\tau^- \to \mu^- e^+ \mu^-$, $e^- \mu^+ e^-$ Lepton numberも破れているモード
    double charged Higgs?(H^{++})
  - $\tau^- \to \mu^- \eta$ ($\tau^- \to \ell^- P^0$, $P^0 = \pi^0, \eta, \eta'$,Ks^0) Higgs mediated で enhance されそうなモード
  - $\tau^- \to \mu^- \pi^+ \pi^-$ ($\tau^- \to \ell^- h^+ h^-$, $h = \pi, K$) これもHiggs mediated
  - $\tau^- \to \mu^+ \pi^- \pi^-$ ($\tau^- \to \ell^+ h^- h^-$) LNV, H^{++}
  - $\tau^- \to \pi^- \Lambda / \pi^- \Lambda$ ($\tau^- \to h^- \Lambda$)LFVだけじゃなくてBaryonNV
    他にも$\tau \to \ell V^0$,$\tau \to \ell h^0 h^0$など

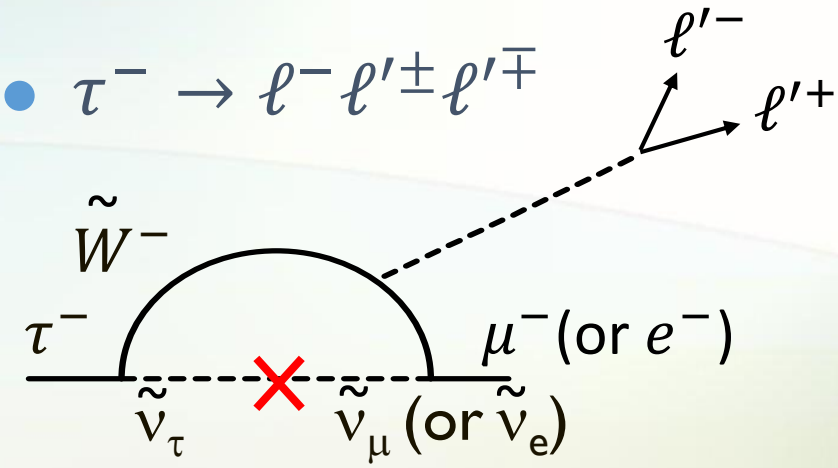
様々なLFV崩壊（I）

- $\tau^- \to \mu^-\gamma / e^-\gamma$



cf. $\mu^- \to e^-\gamma$

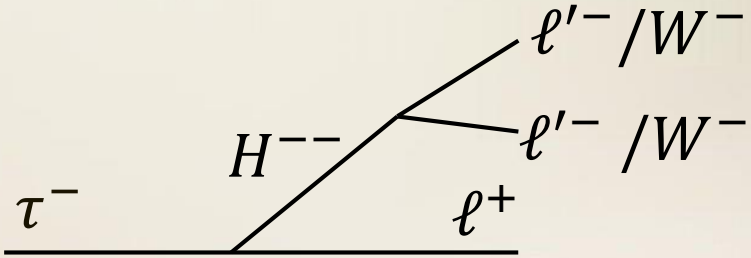
- $\tau^- \to \ell^-\ell'^{\pm}\ell'^{\mp}$



cf. $\mu^- \to e^-e^+e^-$

$h = \pi, K$

- $\tau^- \to \ell^+\ell'^-\ell'^- / h^-h^-$



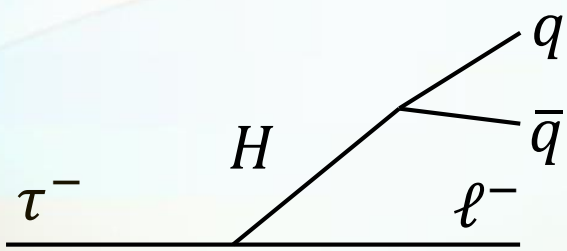
cf. μ 崩壊では対応なし

※ここで出した過程は一例です。
この過程で必ず引き起こされるとは
限りません。

様々なLFV崩壊（2）

- $\tau^- \to \ell^- P^0 / \ell^- h^+ h'^-$

  $P^0 = \pi^0, \eta, \eta', h^\pm = \pi^\pm, K^\pm$



cf. $\mu^- \to e^-$転換

- $\tau^- \to h^- \Lambda / \bar{\Lambda}$

複雑すぎて絵が描けません

※$\Lambda(uds)$:中性バリオン

レプトン数をL，バリオン数をBとすると、

	$\tau^- \to h^- \Lambda$	/	$h^- \bar{\Lambda}$
レプトン数	1	0	0
バリオン数	0	1	−1
B−L	−1	1	−1
B+L	1	1	−1

GUTはB-Lは保存するようにできている

信号の見分け方（1）

- τLFV崩壊はニュートリノを含まないので、<u>完全再構成できる</u>

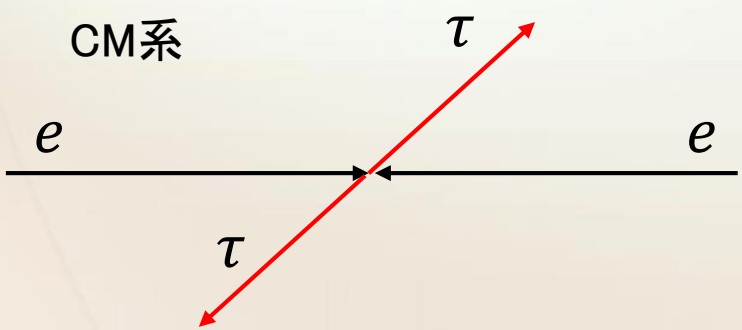
→信号はタウの子供候補の４元運動量を足し合わせて不変質量を組むとタウ質量付近になるはず。

そんなわけで、τLFVを見ようとすることは人類で初めてτレプトンピークを見ようとする試みでもあります。

信号の見分け方(2)

- τLFV崩壊はニュートリノを含まないので、<u>完全再構成できる</u>

→Bファクトリーで対生成されるタウに関してはもう1つ利用できる変数があります。



エネルギー保存則を考えると

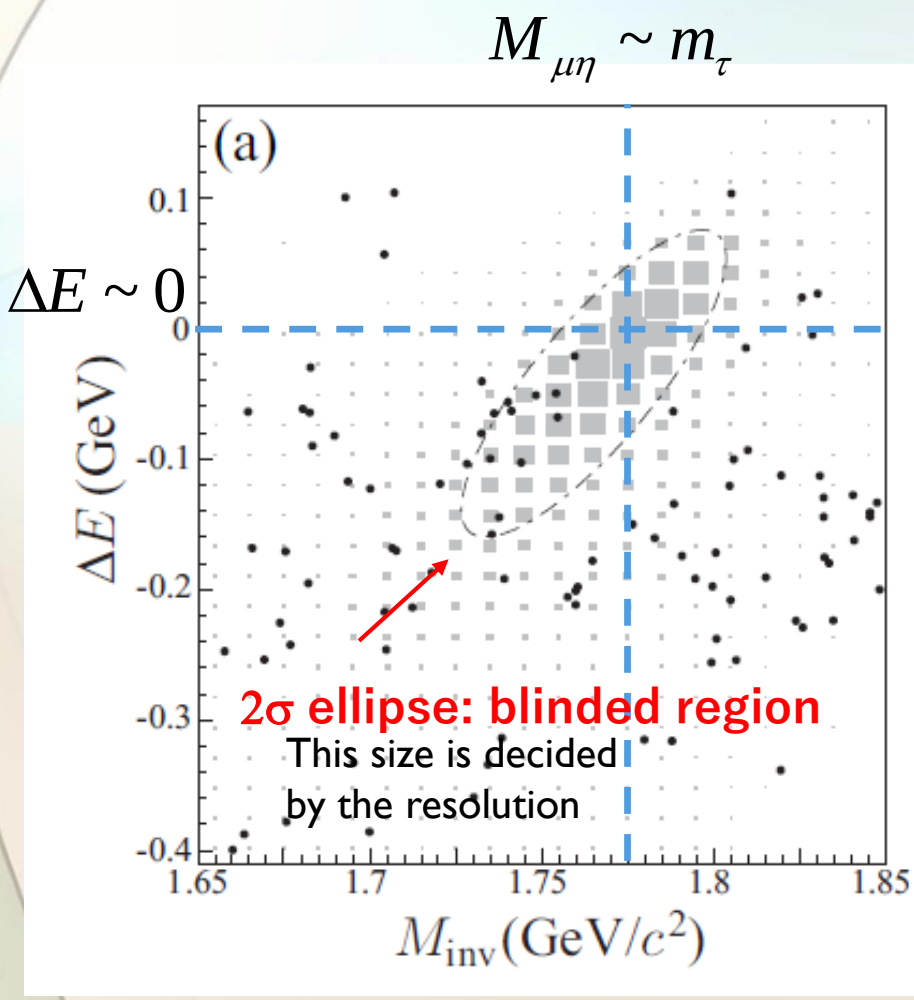
$$2E_e^{CM} = 2E_\tau^{CM}$$

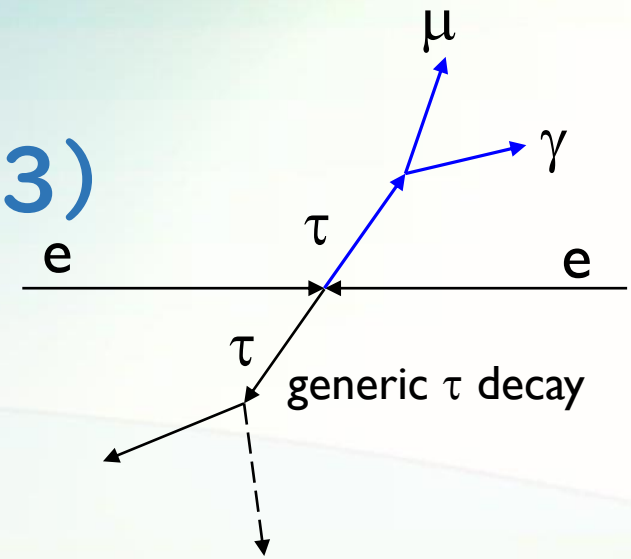
よって

$$\Delta E = E_\tau^{CM} - E_e^{CM} = 0$$

E_e^{CM}はわかっているので例えばμとγのエネルギーからΔEを評価してあげると信号なら0付近の値になるはず。

信号の見分け方（その3）



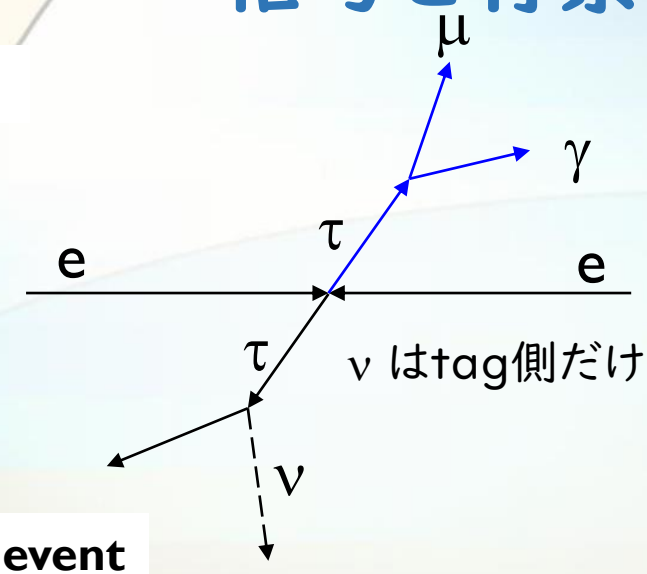


- 実際には先ほどのΔEと再構成した不変質量との2次元平面を考える
- 検出器には測定精度（分解能）があるので、実際の信号は広がりを持って観測される

グレーの■が信号事象のシミュレーション結果。■が大きいほど信号事象が現れる確率が高い

信号と背景事象候補

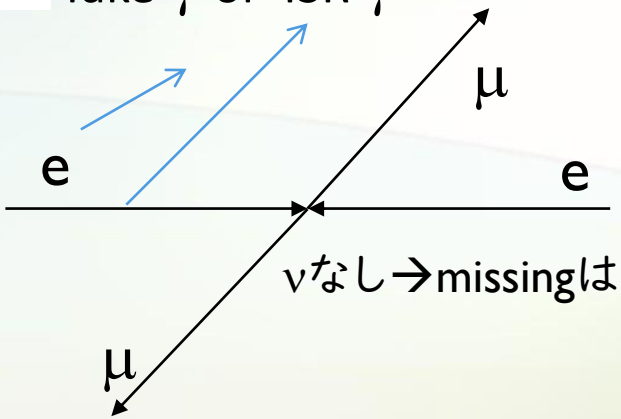
signal



ν はtag側だけ!

μμ event

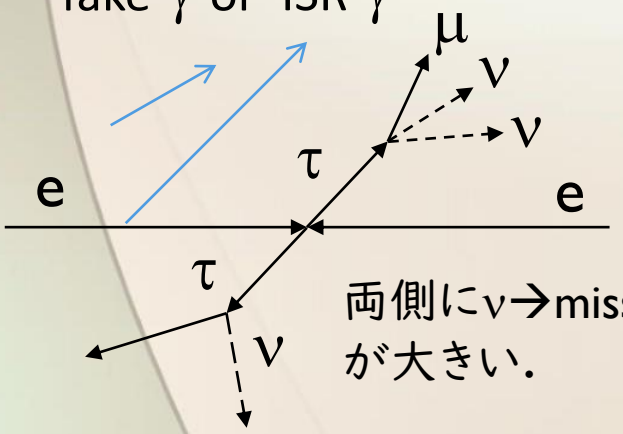
fake γ or ISR γ



νなし→missingはほぼ0

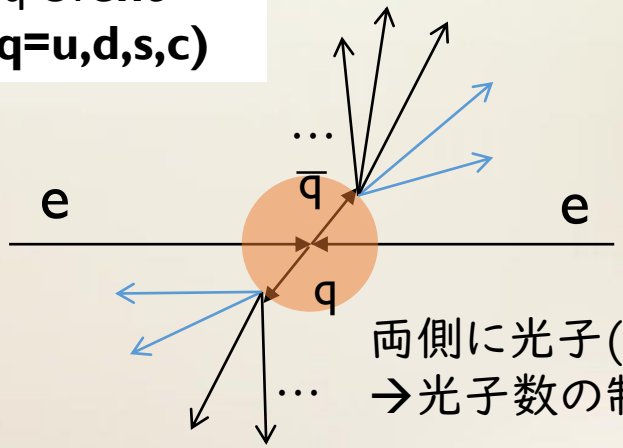
SM ττ event

fake γ or ISR γ



両側にν→missing mass
が大きい.

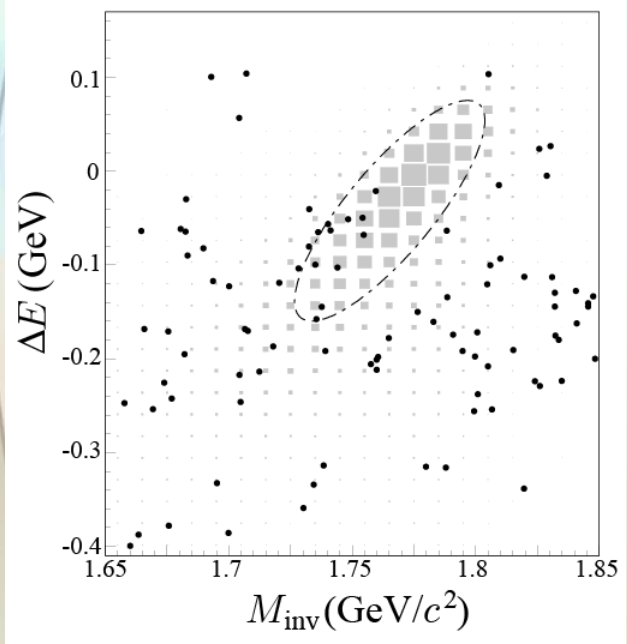
$q\bar{q}$ event
(q=u,d,s,c)



両側に光子(π^0)がたくさん
→光子数の制限が有効

τ→μγの憂鬱

- Belle Ⅰの結果（550fb^{-1}）



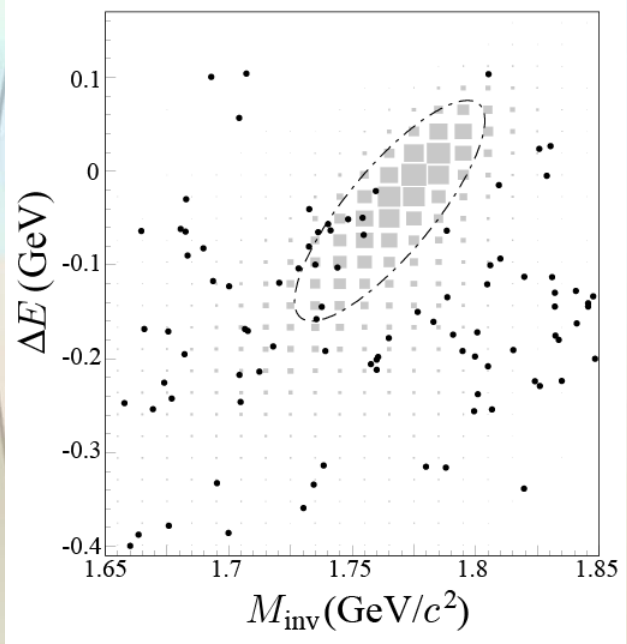
主な背景事象

τ→μνν+γ ⇒PIDでは信号と同一

Signal extractionを行う平面
■がSignalの集中度を表す
・は実際に観測されたデータ

τ→μγの憂鬱

- Belle Ⅰの結果（550fb^{-1}）



主な背景事象

τ→μνν+γ ⇒PIDでは信号と同一

γの出自

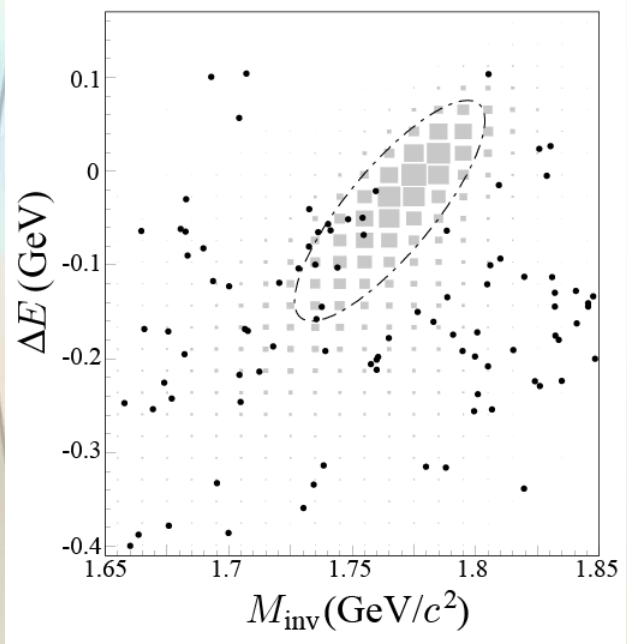
ISR: 90%

BeamBG: 10%

Signal extractionを行う平面
■がSignalの集中度を表す
・は実際に観測されたデータ

τ→μγの憂鬱

- Belle Ⅰの結果（550fb^{-1}）



Signal extractionを行う平面
■がSignalの集中度を表す
・は実際に観測されたデータ

主な背景事象

τ→μνν+γ ⇒PIDでは信号と同一

γの出自

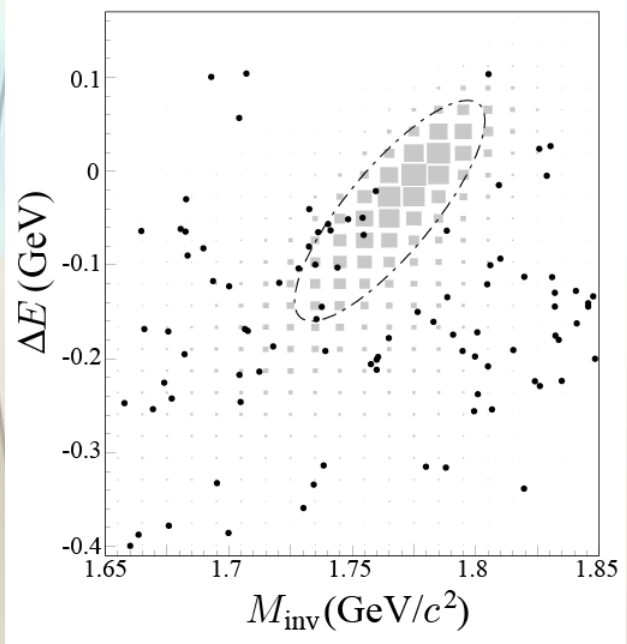
ISR: 90%

BeamBG: 10%

→SuperKEKBになってbeamBGが劇的に増える可能性

τ→μγの憂鬱

- Belle Ⅰの結果（550fb^{-1}）



Signal extractionを行う平面
■がSignalの集中度を表す
・は実際に観測されたデータ

主な背景事象

τ→μνν+γ ⇒PIDでは信号と同一

γの出自

ISR: 90%

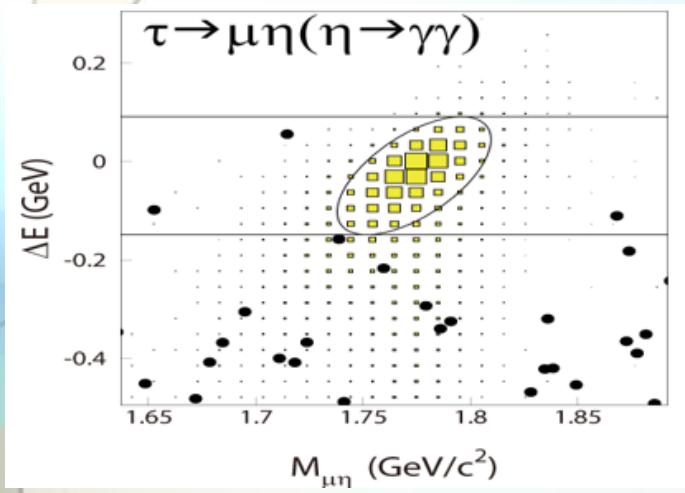
BeamBG: 10%

→SuperKEKBになってbeamBGが劇的に増える可能性

⇒ISRの方は統計に従って増加

9→900？！

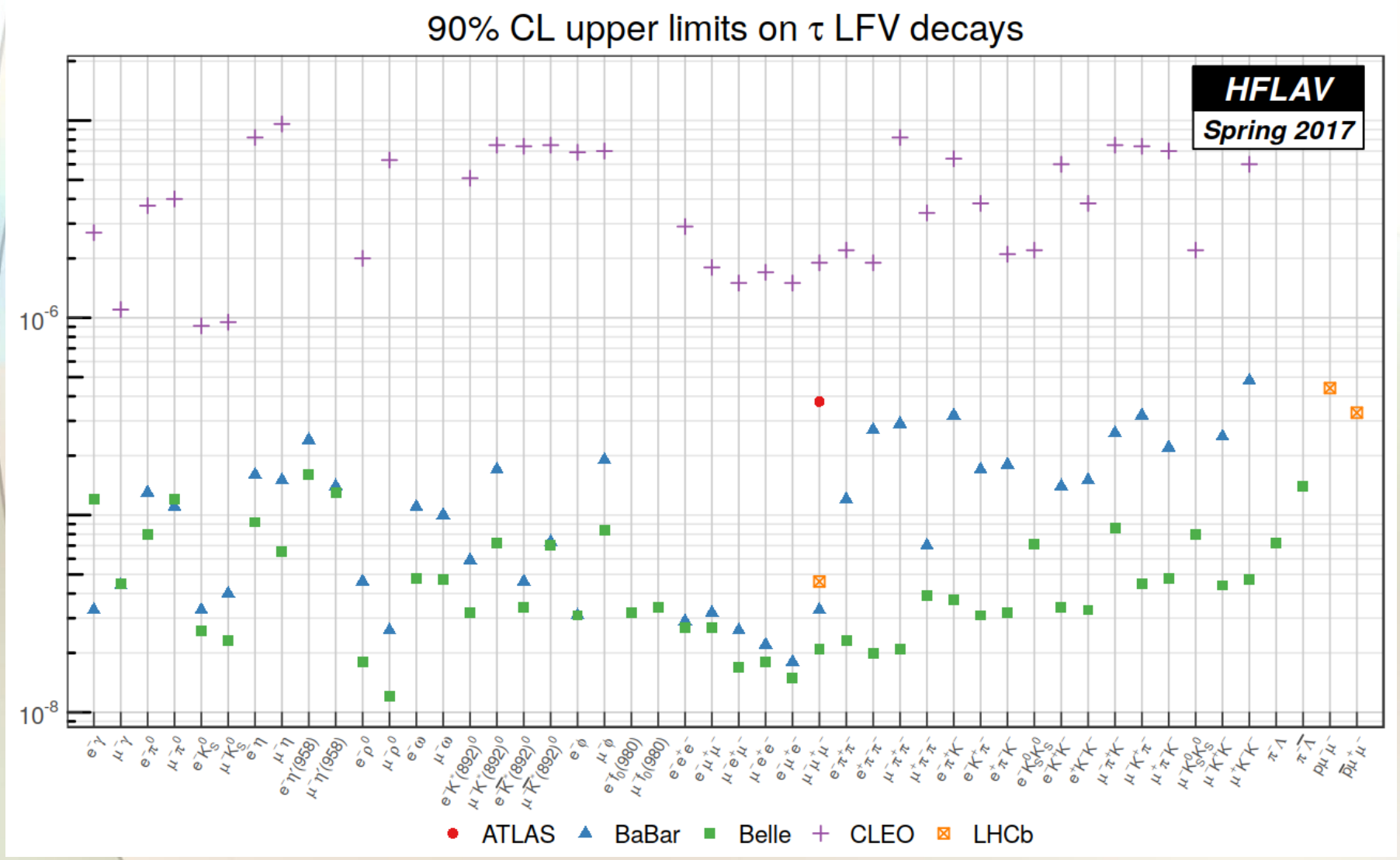
実際の解析と結果の評価



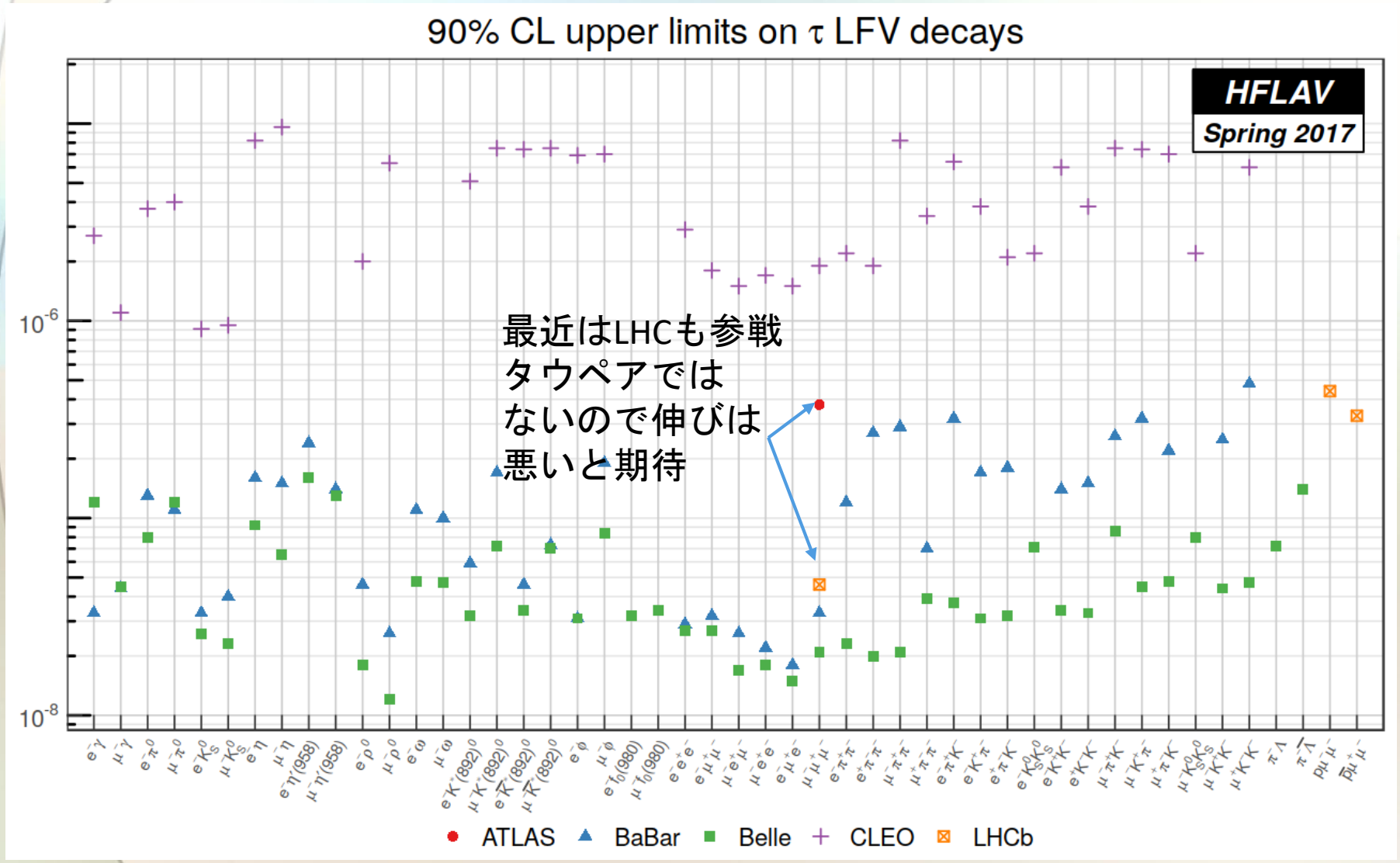
- 実際の解析では楕円の中のデータは見ないで進める。（信号を恣意的に引き出してしまうのを防ぐため：blind analysis）

平行線の間は背景事象は均等に分布していると仮定して平行線の間の事象数を数えて面積比から楕円の中に分布すると期待される背景事象数を推定する。
楕円の中を見た時、背景事象より有意な数の信号が見られれば発見！そうでなければ統計操作によって信号数の上限値を評価→分岐比の上限値

今までの結果


90% CL upper limits on τ LFV decays
HFLAV
Spring 2017
10^{-6}
10^{-8}
ATLAS
BaBar
Belle
CLEO
LHCb

今までの結果


90% CL upper limits on τ LFV decays
HFLAV
Spring 2017
10^{-6}
10^{-8}
最近はLHCも参戦
タウペアでは
ないので伸びは
悪いと期待
ATLAS
BaBar
Belle
CLEO
LHCb

$\tau \to \mu\gamma, \mu\eta, \mu\mu\mu$解析の特徴

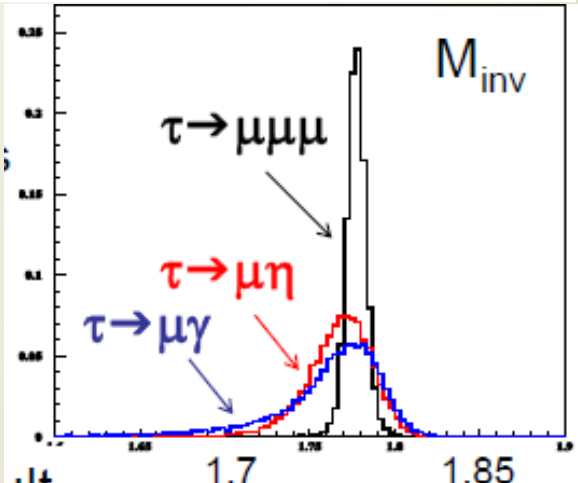
- 一般論として

信号終状態にγがある時 ：ISR や fake γと区別が付けにくい。そもそもγのエネルギー分解能は荷電粒子の運動量分解能よりも悪い。

	BG rejection	Mass resolution
τ→μγ	very hard	bad (γ)
τ→μη	hard (but η mass window helps)	bad (2γ, but η mass window helps)
τ→μμμ	easy(μID x3)	good (only charged tracks)

しかも、τ→μγ は登場粒子2つなので、
力学的な情報もとぼしい

	Main BG
τ→μγ	ee→μμ+γ, τ→μνν+γ, τ→πν+γ
τ→μη	ee→μμ+γγ, τ→μνν+γγ, τ→πν+γγ
τ→μμμ	ee→μμμμ,eeμμ



Belle IIでは…

- Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake γが増えると考えられている（fake γの起源は衝突に参加しなかった電子や１回前のBhabha過程）
- 上限値$=\frac{s_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}}$

	BG free	BG 多い
	$\propto 1/L$	$\propto 1/\sqrt{L}$
	$\propto L$	$\propto L$
	一定	$\propto \sqrt{L}$

$N_{\tau\tau} = \sigma L$:解析に使ったタウペア事象数
生成断面積×積分ルミノシティ
s_{90}: 信号数の上限値
ε:信号検出効率

CPV in tau decays

- ＬＦＶ同様荷電レプトンセクターにCPVは見えていません。ニュートリノは見つかりそう
  →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が起きる

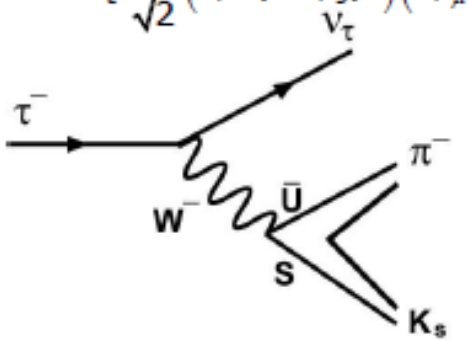
- どんなモードで？
  →$\tau^{\pm} \to \pi^{\pm} K_S^0 \nu$ (Phys. Rev. Lett. 107, 131801 (2011))
- どういう形でＣＰＶを見るのか？
  →τ^+とτ^-の崩壊で角度分布の違いを見る

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

-Effective Hamiltonian

SM

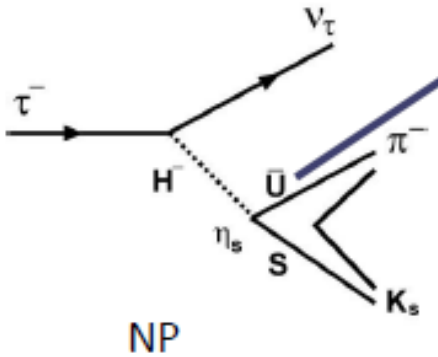
$$H_{SM} = \sin\theta_c \frac{G}{\sqrt{2}}\left(\bar{\nu}\gamma^{\mu}(1-\gamma_5)\tau\right)\left(\bar{s}\gamma_{\mu}(1-\gamma_5)u\right)$$



Scalar Boson

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

複素結合定数



NP

$$J_{\mu}^{K\pi} = \langle K(p_1)\pi(p_2)|\bar{s}\gamma_{\mu}u|0\rangle$$
$$= (p_1 - p_2)^{\nu} T_{\nu\mu} F(Q^2) + Q_{\mu} F_s(Q^2)$$

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

形状因子：F　（ベクター）
　　Fｓ（スカラー）

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

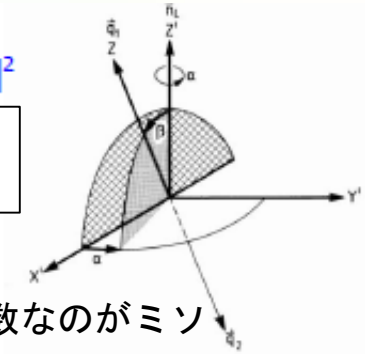
$$F_H(Q^2) \equiv \langle K(p_1)\pi(p_2)|\bar{s}u|0\rangle$$

微分崩壊率とCPV

$$\frac{d\Gamma(\tau^-)}{dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta} = \left[A(Q^2) - B(Q^2)(3\cos^2\Psi - 1)(3\cos^2\beta - 1)\right]\cdot|F|^2 + m_\tau^2|F_s|^2$$

$$- C(Q^2)\cos\beta\cos\psi\cdot\mathrm{Re}(FF_s^*(\eta_s))$$

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 Ks 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)

$$A_i^{\mathrm{cp}} = \frac{\iiint_{Q^2_{1,i}}^{Q^2_{2,i}} \cos\beta\cos\psi\left(\frac{d\Gamma_{\tau-}}{d\omega} - \frac{d\Gamma_{\tau+}}{d\omega}\right)d\omega}{\frac{1}{2}\iiint_{Q^2_{1,i}}^{Q^2_{2,i}}\left(\frac{d\Gamma_{\tau-}}{d\omega} + \frac{d\Gamma_{\tau+}}{d\omega}\right)d\omega}$$

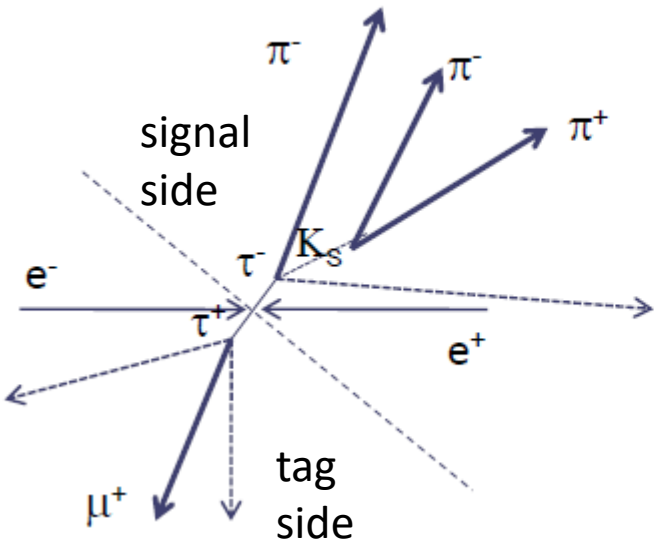
$$\simeq \langle\cos\beta\cos\psi\rangle^i_{\tau-} - \langle\cos\beta\cos\psi\rangle^i_{\tau+}$$

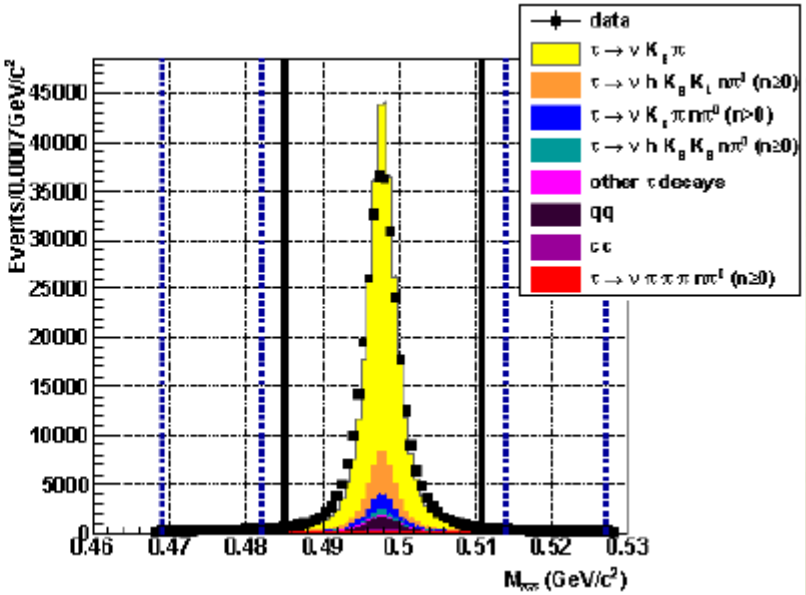
with $d\omega = dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta$.

実験的に
測るのはこっち

使ったデータと選別条件

- Belle実験で収集された７００fb^{-1}



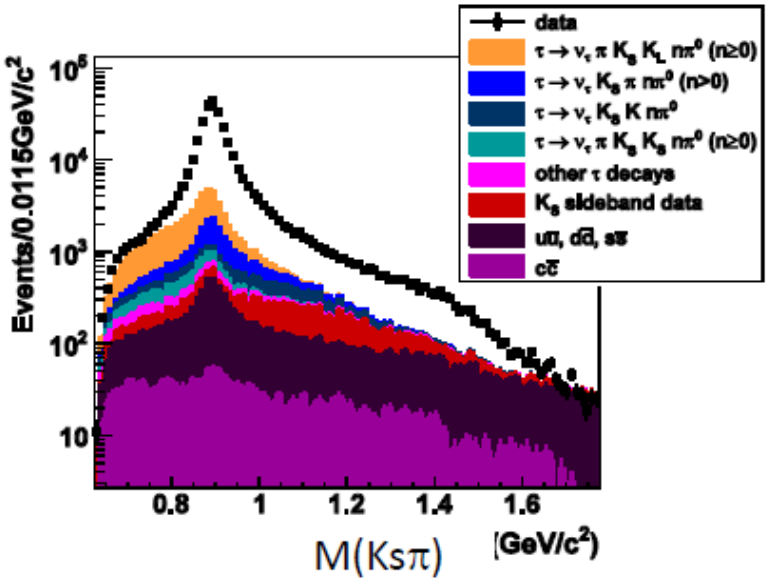


荷電粒子４本（３－１）
Ks^{0}がある。（質量、飛距離）、πID
tag sideはレプトニック崩壊

Ks^{0}候補の質量分布
→Ks^{0}じゃないＢＧはほとんどない

CPV評価に使ったイベント

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



- **CP rate-asymmetry (Observed level)**

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

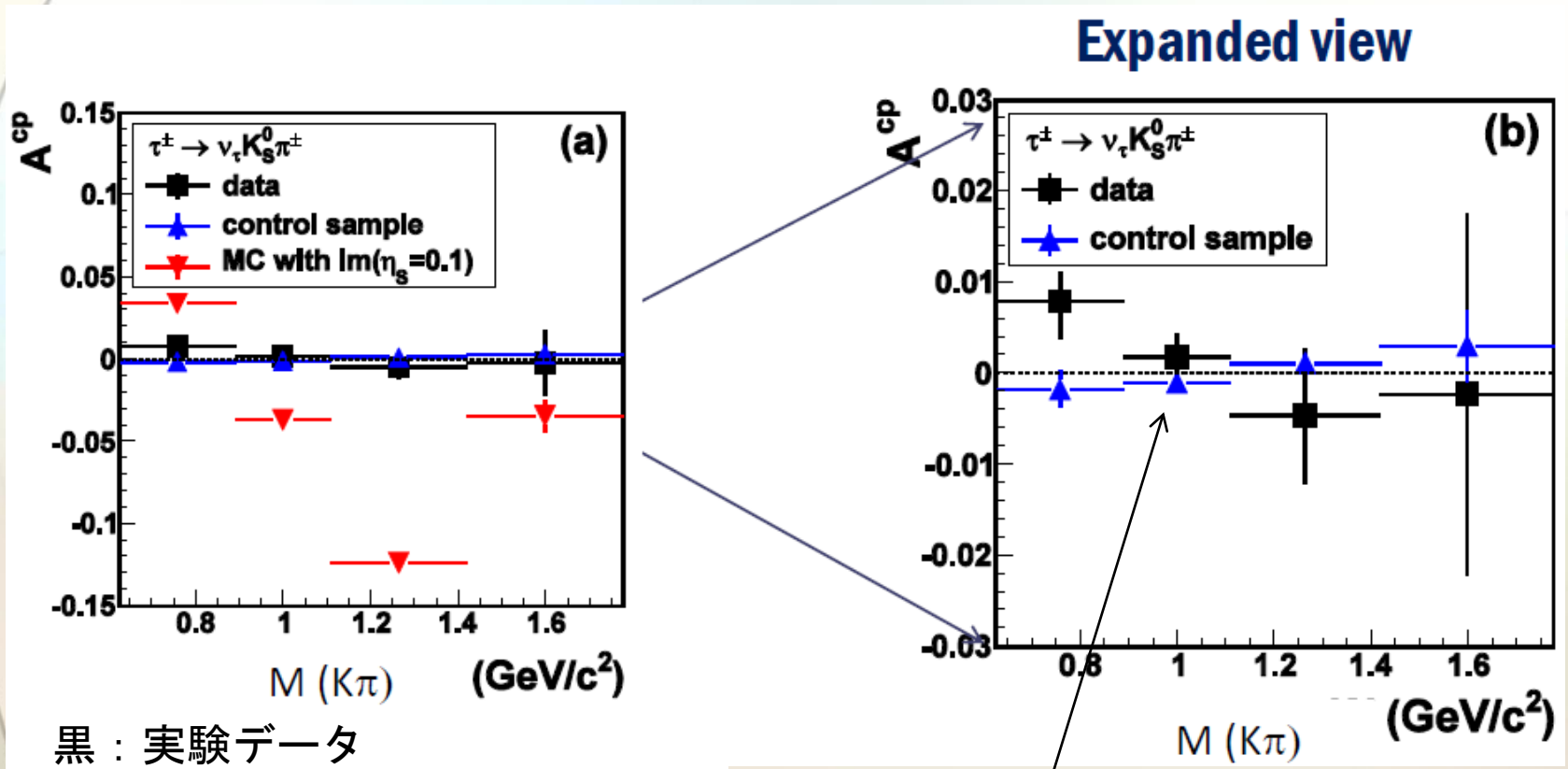
- ちゃんとした評価をするには補正が必要

補正？

- 検出器→O(10^{-3})
  - 4π覆ってないことの補正
  - 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)　→O(10^{-4})
  - Lab系（測定）とＣＭ系（評価）の違い
- τ→πππνが役立つ
  - Ks^0はない(ΔS=0)が終状態は信号と同じ

⇒τ→πππν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

$$A_{cp} = (1.8 \pm 2.1(stat) \pm 1.4(sys))x10^{-3}$$

ηに焼きなおす

- $|\mathrm{Im}(\eta_s)| < (0.012\text{-}0.026)$ 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**

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

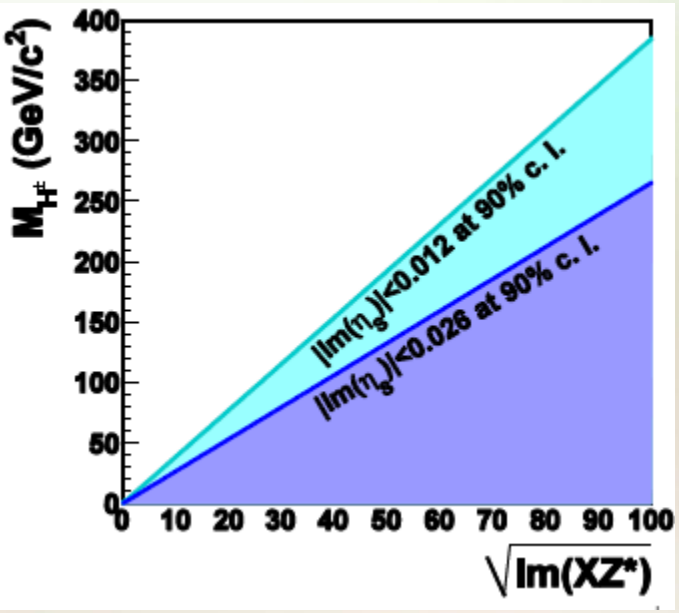
$M_{H^\pm}$: mass of lightest charged Higgs in MHDM

Z : complex coupling constant btw Higgs and lepton.

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

■ **The result ($\mathrm{Im}(\eta_s)$<0.026) limits the couplings**

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



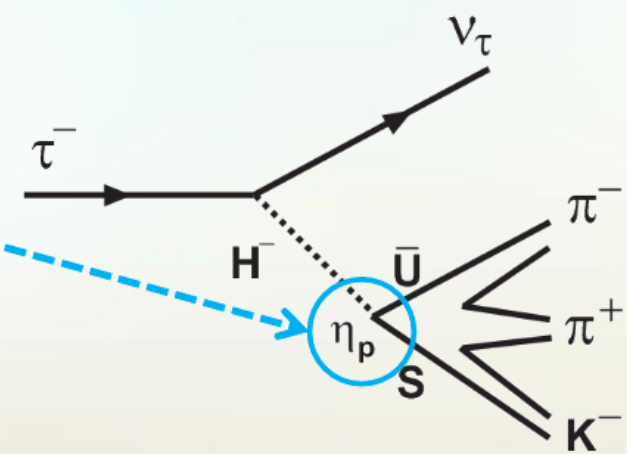
Belle IIでのタウCPV測定

- 系統誤差の最も大きい寄与はControlled sample ($\tau \to \pi\pi\pi\nu$)なので、統計量の向上に従って小さくなると期待できる。
- 現状O(10^{-3})で測られている精度は、O($10^{-4\sim-5}$)　になると期待できる。

CPV in τ→Kππν

τ→Ksπνと同じ感じだが、今度はスカラーではなく擬スカラーが

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



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

Kπ 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Kπ π系の方向
のなす角をβとすると
cosβ>0 <0の非対称性
のτ+/-での差を見ると
CPVが見える。
また、Kπ π静止系での
Kの向きをγとすると
sinγsinβ
sinγcosβもCPを破る

Belle 1, BaBarでは
解析されていない

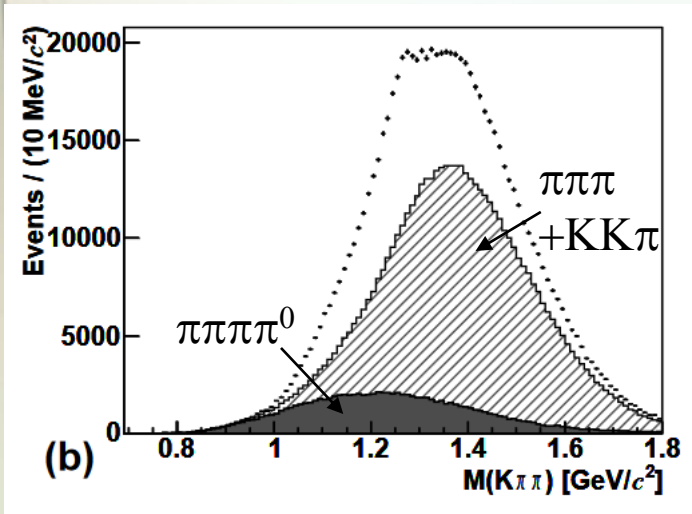
Belle IIでの期待

- 実は$\tau \to K\pi\pi\nu$の解析はやっかい。
- $Br(\tau \to \pi\pi\pi\nu) \sim 10\%$, $Br(\tau \to \pi\pi\pi\pi^0\nu) \sim 4.5\%$,

$Br(\tau \to K\pi\pi\nu) \sim 0.3\%$なのでmisIDが効く

Belle IIでの期待

- 実はτ→Kππνの解析はやっかい。
- Br(τ→πππν)~10%, Br(τ→ππππ^0ν)~4.5%, Br(τ→Kππν)~0.3%なのでmisIDが効く

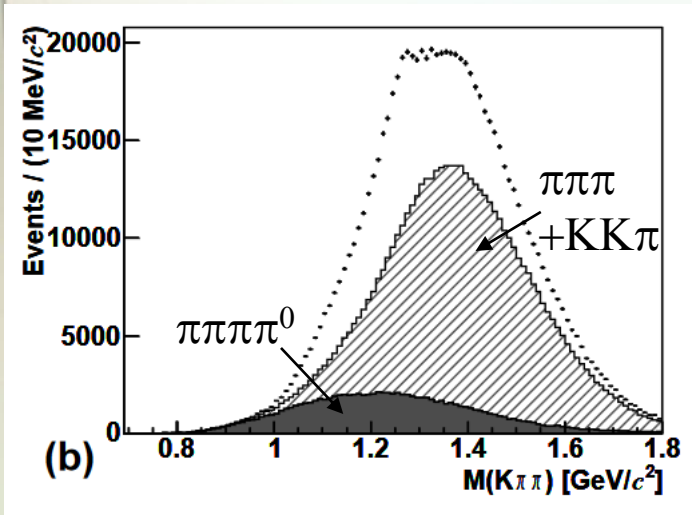


Belle だとKππの倍以上πππが居た

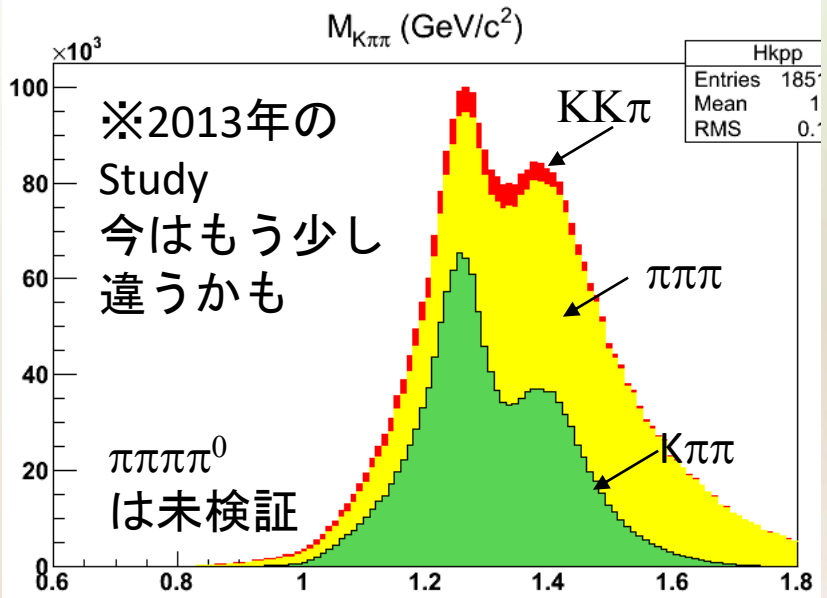
Phys.Rev.D81,113007(2010)

Belle IIでの期待

- 実はτ→Kππνの解析はやっかい。
- Br(τ→πππν)~10%, Br(τ→ππππ^0ν)~4.5%, Br(τ→Kππν)~0.3%なのでmisIDが効く→Belle IIでは改善（と言っても１：１程度）



Phys.Rev.D81,113007(2010)

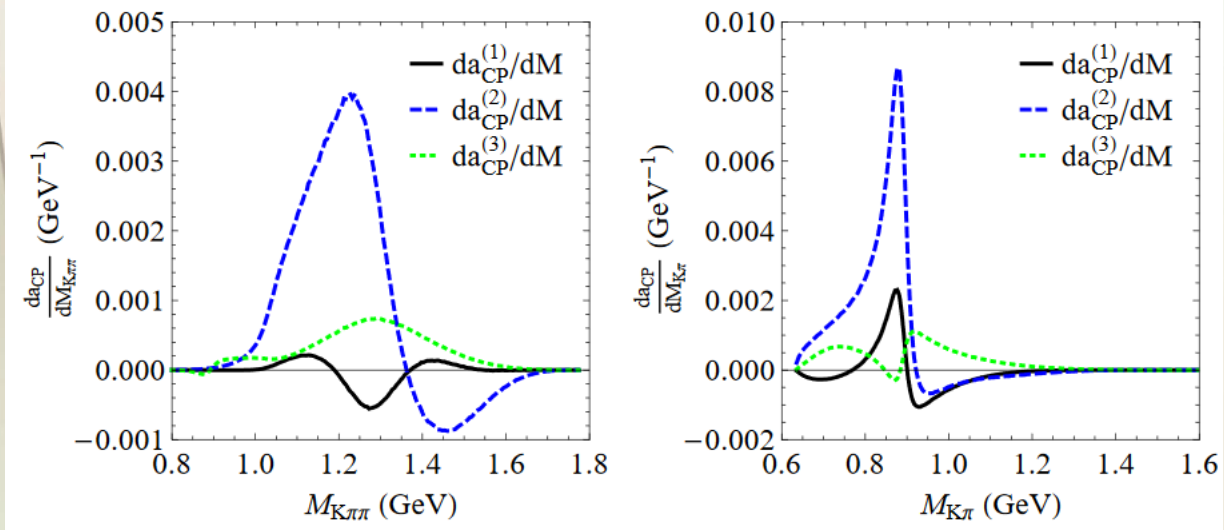


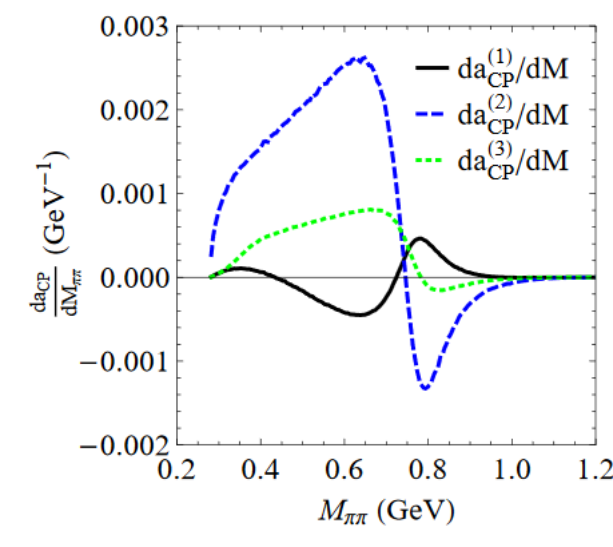
M(Kππ) (GeV/c²)

CPV in τ→Kππν

- τ→Ksπνでは、M(Ksπ)毎でAcpを評価

→３体なので、 M(Kππ), M(Kπ), M(ππ)で





1=sinβsinγ,2=sinβcosγ,3=cosβ

Phys. Rev. D78, 113008 (2008)

BaBarのτCPVの結果

- こいつがやっかい

BaBarのτCPV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

$$A_Q = \frac{\Gamma(\tau^+ \to \pi^+ K_S^0 \bar{\nu}_\tau) - \Gamma(\tau^- \to \pi^- K_S^0 \nu_\tau)}{\Gamma(\tau^+ \to \pi^+ K_S^0 \bar{\nu}_\tau) + \Gamma(\tau^- \to \pi^- K_S^0 \nu_\tau)}$$

$A_Q = (0.33 \pm 0.01)\%$ in SM due to CPV in $K^0 - \overline{K}^0$ 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 σ 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？

- $\tau \to K\pi\nu$, $\tau \to K\pi\pi\nu$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。）

CPV in tau decays;

- Tau physics offers a variety of CPV observables (rate, angular asymmetries, triple products, ...) that can be studied to search for new sources of CPV.

- Interesting recent result:

$$A_\tau \equiv \frac{\Gamma(\tau^+ \to \pi^+ K_S \bar{\nu}_\tau) - \Gamma(\tau^- \to \pi^- K_S \nu_\tau)}{\Gamma(\tau^+ \to \pi^+ K_S \bar{\nu}_\tau) + \Gamma(\tau^- \to \pi^- K_S \nu_\tau)} = (-3.6 \pm 2.3 \pm 1.1) \cdot 10^{-3}$$

(BaBar'2011)

$$A_\tau^{SM} = (3.6 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$$

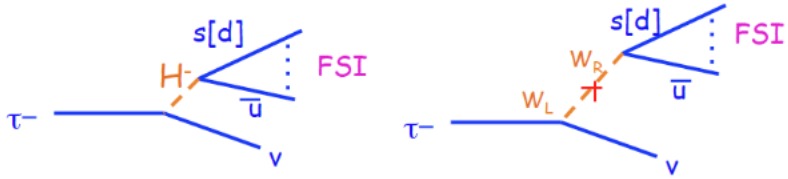
(due to $K^0 - \bar{K}^0$ mixing)

[Bigi & Sanda, 2005]
[Grossman & Nir, 2011]

2.8σ discrepancy!

- Belle has also searched for CPV in this decay mode through a difference in the angular distributions, finding a null result at the 0.2–0.3% level [*Belle, 2011*].

- NP explanations? *[Bigi, 2012]*
  - Charged Higgs?
  - W_L-W_R mixing?
  - LQ?



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

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

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

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

普通はG_λ（親粒子）とG_ρ（娘粒子）は同一だと思うのだが、
敢えて別にしておく

Lepton universality(2)

- μ→eνν,τ→μνν,τ→eννの分岐比から

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

- もしくはτ→πν,τ→Kνの分岐比から

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{B(\tau \to h\nu_\tau)}{B(h \to \mu\bar{\nu}_\mu)} \frac{2m_h m_\mu^2 \tau_h}{(1+\delta R_{\tau/h}) m_\tau^3 \tau_\tau} \left(\frac{1-m_\mu^2/m_h^2}{1-m_h^2/m_\tau^2}\right)^2$$

$$\delta R_{\tau/\pi} = (0.16 \pm 0.12)\%$$

$$\delta R_{\tau/K} = (0.90 \pm 0.22)\%$$

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

どこまで１に近づけるか？

Lepton universality(2)

- μ→eνν,τ→μνν,τ→eννの分岐比から

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

- もしくはτ→πν,τ→Kνの分岐比から

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{B(\tau \to h\nu_\tau)}{B(h \to \mu\bar{\nu}_\mu)} \frac{2m_h m_\mu^2 \tau_h}{(1+\delta R_{\tau/h}) m_\tau^3 \tau_\tau} \left(\frac{1-m_\mu^2/m_h^2}{1-m_h^2/m_\tau^2}\right)^2$$

$$\delta R_{\tau/\pi} = (0.16 \pm 0.12)\%$$

$$\delta R_{\tau/K} = (0.90 \pm 0.22)\%$$

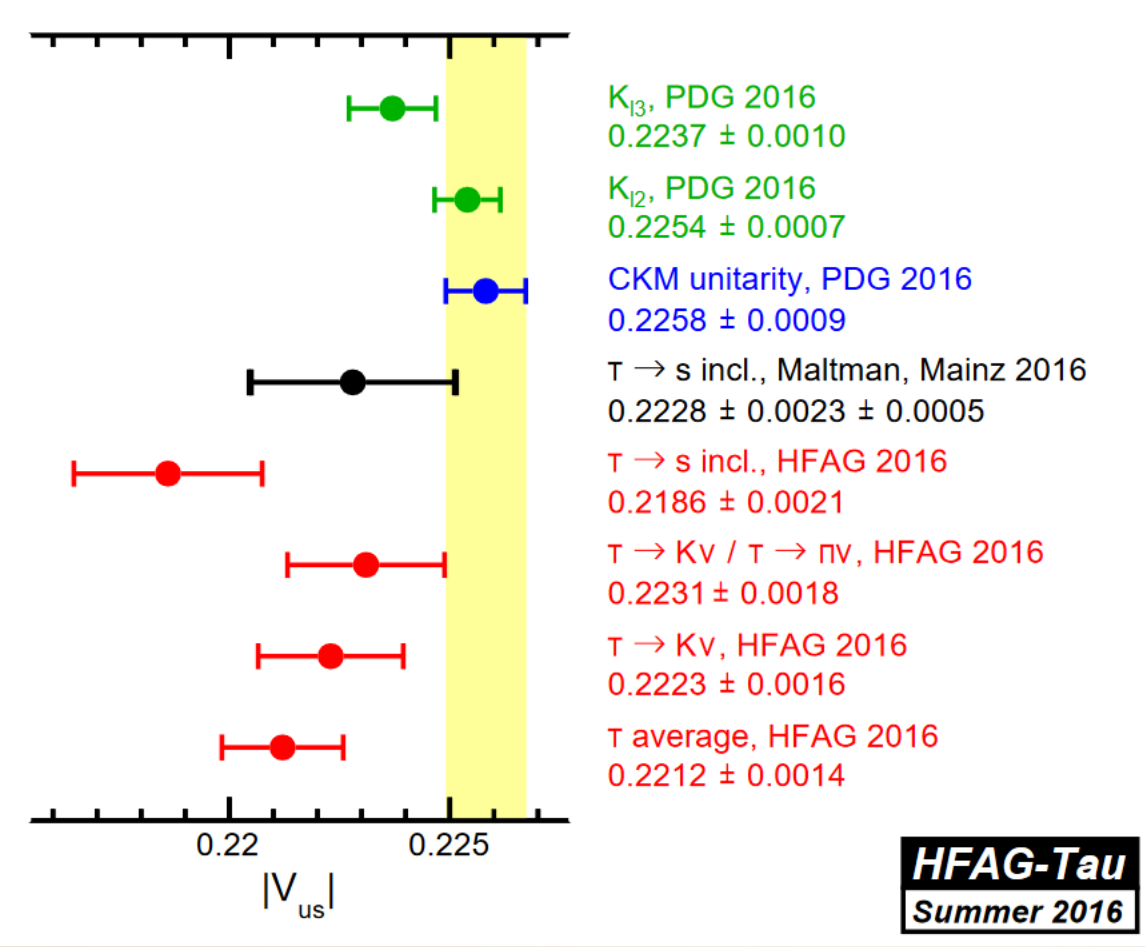
$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_\pi = 0.9961 \pm 0.0027 \qquad \left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_K = 0.9860 \pm 0.0070$$

めでたしめでたし？

どこまで１に近づけるか？ $\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_{\tau+\pi+K} = 1.0000 \pm 0.0014$

Vusの測定

- どうもτでVusを測るとKで測ったのと違った結果になる（小さい）



再びPDG

Γ_3	$\mu^- \overline{\nu}_\mu \nu_\tau$	[1]	$(17.39 \pm 0.04)\%$
Γ_4	$\mu^- \overline{\nu}_\mu \nu_\tau \gamma$	[2]	$(3.67 \pm 0.08) \times 10^{-3}$
Γ_5	$e^- \overline{\nu}_e \nu_\tau$	[1]	$(17.82 \pm 0.04)\%$
Γ_6	$e^- \overline{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	[2]	$(1.83 \pm 0.05)\%$
Γ_9	$\pi^- \nu_\tau$	[1]	$(10.82 \pm 0.05)\%$
Γ_{10}	$K^- \nu_\tau$	[1]	$(6.96 \pm 0.10) \times 10^{-3}$

- サブパーセントレベルの測定

⇒統計誤差だけではなく系統誤差の精度を上げる必要がある。

タウ解析の系統誤差

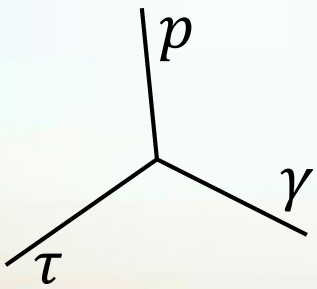
- トラック数・光子数がBの解析に比べて圧倒的に少ない→見ている運動量／エネルギー領域が異なる

☆独自の系統誤差評価が必要

様々なLFV崩壊（ちなみに…）

- $\tau^- \to \bar{p}\gamma$を考えないのですか？と時々聞かれます。

陽子質量1GeV, タウ質量1.8GeVなので可能そうです。



こういう実効相互作用がある程度の
（Belle II実験で見えるくらいの）
強さであったとするとくるっと回すと
仮想タウを通じて陽子崩壊を引き起こしそうです。

我々のリストには陽子が関係するLFV崩壊は入れていません。