

Belle 実験における τ 物理解析の現状

佐藤 功視 (名大理)

2005.03.07

科研費特定領域第三回研究会
「質量起源と超対称性物理の研究」

- Belle τ グループ
- KEKB 加速器/Belle 検出器
- 超対称模型と LFV
- $\tau \rightarrow l\pi^0, l\eta, l\eta'$ 事象の探索
- その他の解析
- まとめ

- Lepton Flavor Violation (LFV) 事象の探索

- $\tau \rightarrow \ell\pi^0, \ell\eta, \ell\eta'$

- $\tau \rightarrow \ell\gamma$

- $\tau \rightarrow \ell K_S$

- $\tau \rightarrow 3\ell$

- $\tau \rightarrow \Lambda\pi$

- 2nd class current の探索

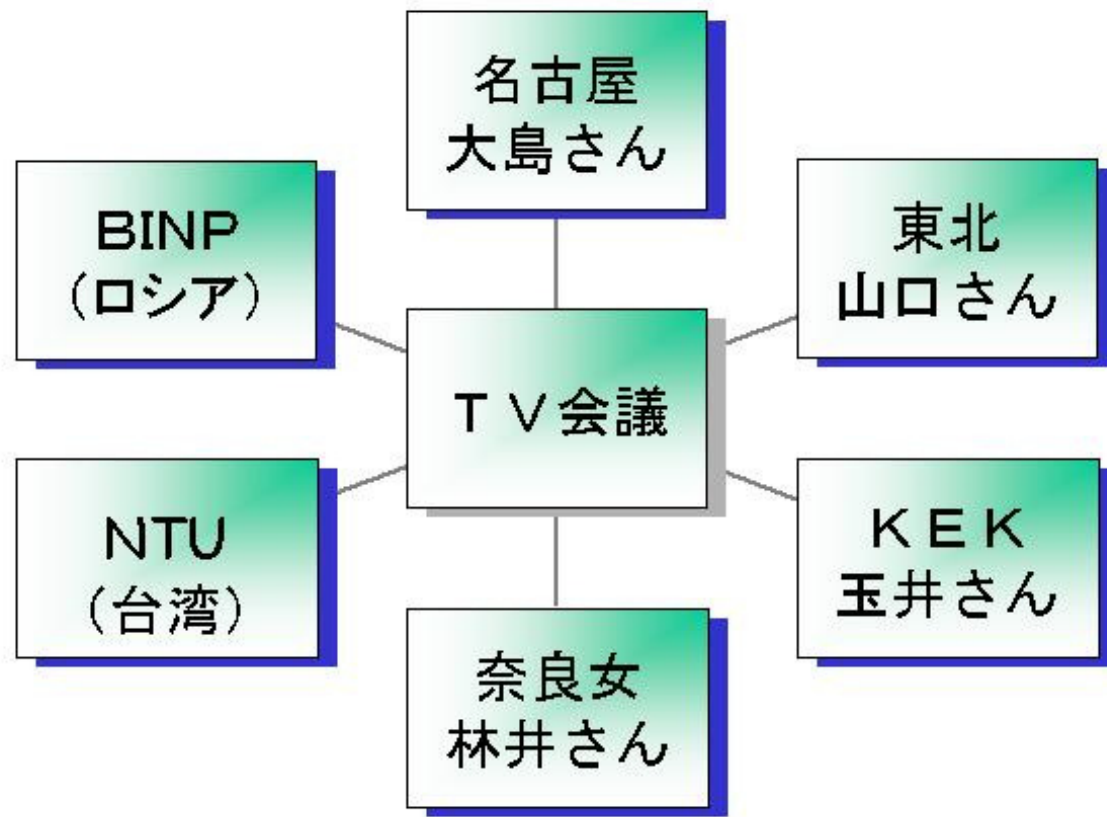
- $\tau \rightarrow \pi\eta\nu$

- $\tau \rightarrow \pi\omega\nu$
($\tau \rightarrow 3h\pi^0\nu$)

- Spectral Function の測定

- $\tau \rightarrow \pi\pi^0\nu$

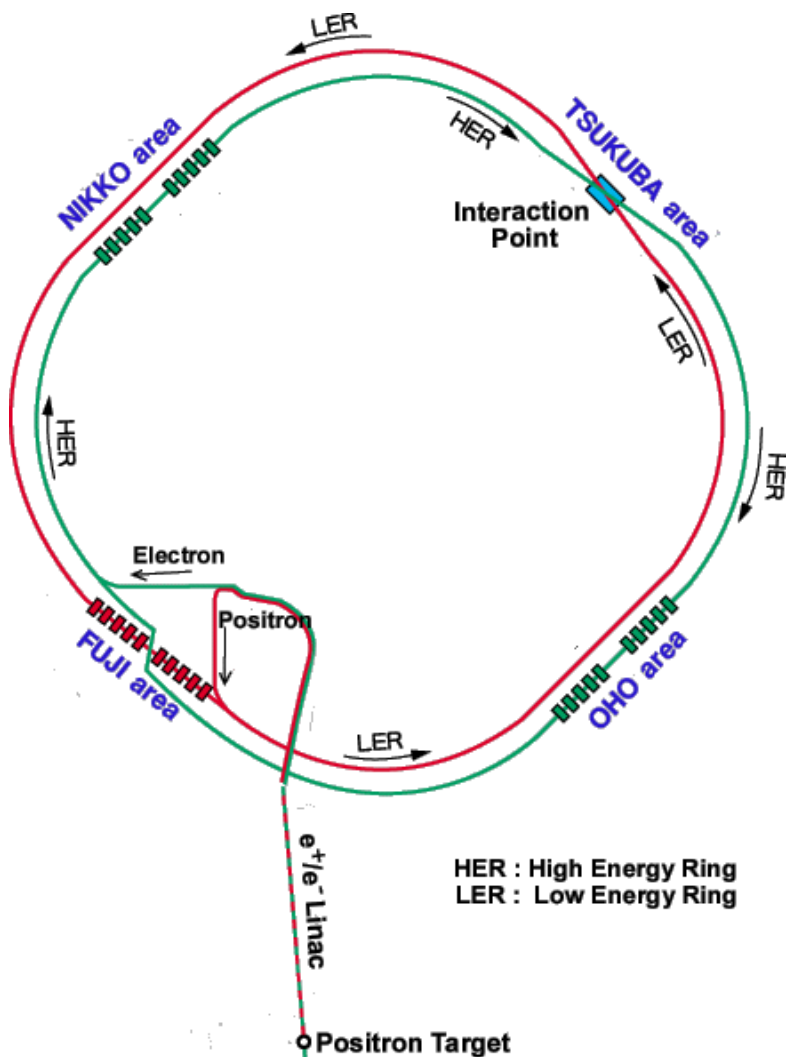
- τ EDM/MDM の測定



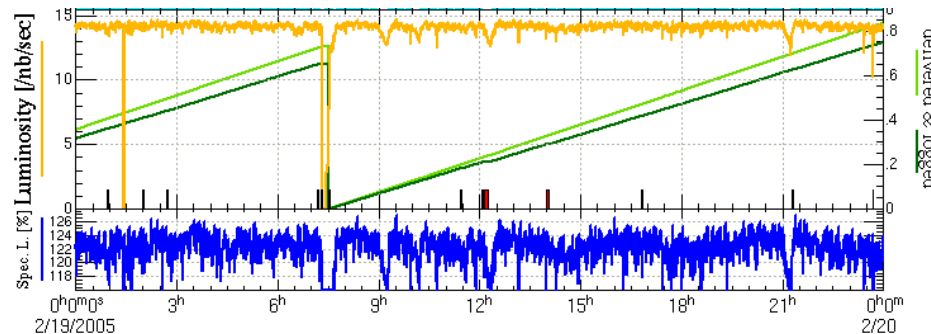


KEKB 加速器

非対称エネルギー e^+e^- コライダー
 $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV} : \Upsilon(4s)$ 共鳴上
 \Rightarrow B ファクトリー



Performance snapshot ('05/02/19)



世界最高のルミノシティ

$$L_{\text{peak}} = 15.16 \text{ nb}^{-1}/\text{sec}$$

$$\int_{\text{day}} L dt = 1082.8 \text{ pb}^{-1}$$

$$\int_{\text{total}} L dt = 370.660 \text{ fb}^{-1}$$

生成断面積

$$B\bar{B} : 1.05 \text{ nb} \quad \tau\tau : 0.89 \text{ nb}$$

B ファクトリー = τ ファクトリー!

Lepton Flavor Violation (LFV): Lepton の香りの破れ

- 標準模型 : Lepton Flavor は保存
cf) ニュートリノ振動 : 中性 Lepton セクターでの LFV
- 超対称模型 : (荷電 Lepton セクターにおける) LFV を予言

⇒ LFV の発見 = 標準模型を越える物理の発見 (超対称性?)

各 LFV mode の分岐比の大きさは模型の詳細に依存

- $\tau \rightarrow l\gamma$ ($l = e, \mu$)
最小超対称標準模型 (MSSM) + right-handed ν
- $\tau \rightarrow 3l, l\eta$
MSSM + Higgs mediated

Parameter によって $10^{-7} \sim 10^{-9}$ の分岐比を予言

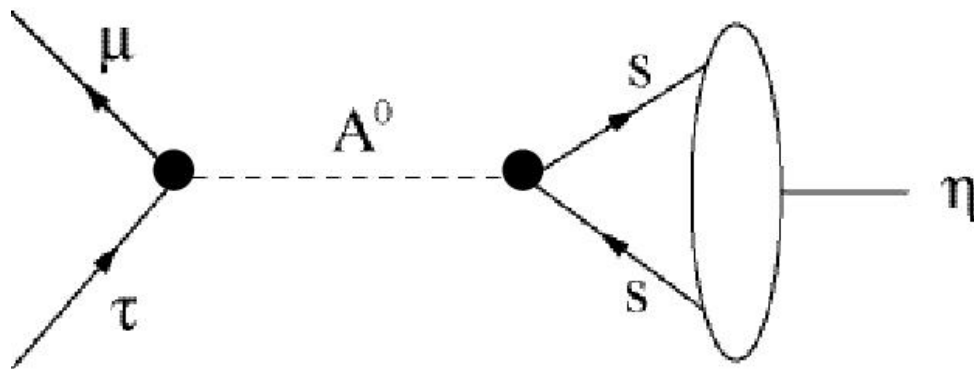
⇒ Belle 実験の感度で到達可能な範囲!

- どの模型が正しいか?
- 模型の parameter space を制限

$\tau \rightarrow \ell\eta, \ell\pi^0, \ell\eta'$

Large $\tan\beta (= \langle H_u \rangle / \langle H_d \rangle)$ at MSSM \implies Higgs mediated process
 $\tau \rightarrow \mu\eta$ の崩壊分岐比が大きくなる

$$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\eta) : \mathcal{B}(\tau \rightarrow 3\mu) : \mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma) = 8 : 1.5 : 1$$



$$Br(\tau \rightarrow \mu\eta) = 0.84 \times 10^{-6} \times \left(\frac{\tan\beta}{60}\right)^6 \left(\frac{100\text{GeV}}{m_A}\right)^4$$

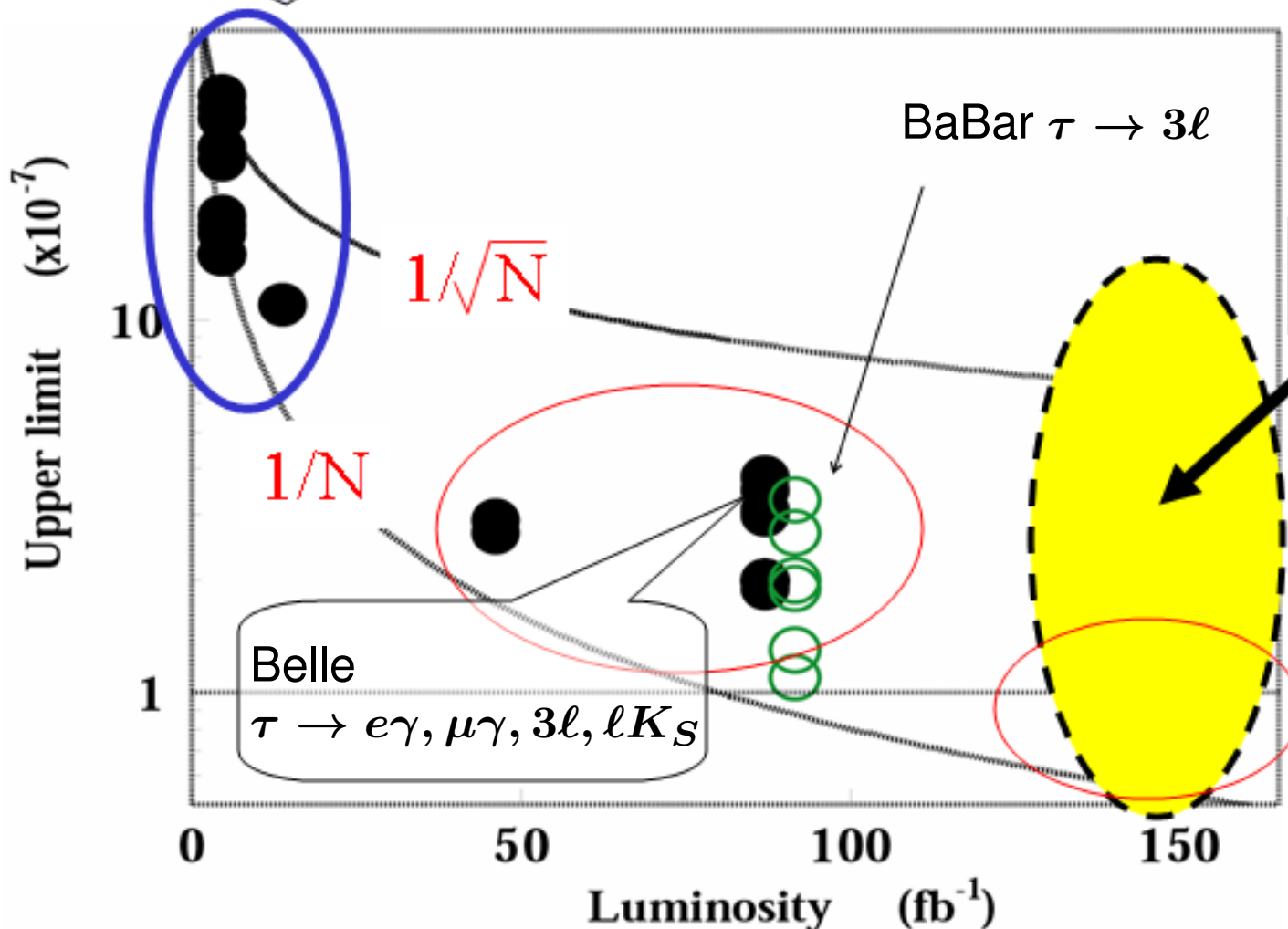
M. Sher Phys.Rev.D66 05731(2002)

$\tau \rightarrow \ell M^0$ ($\ell = e, \mu; M^0 = \pi^0, \eta, \eta'$) をまとめて探索

LFV 事象探索の現状

CLEO Result (PDG 2004)

$$\tau \rightarrow e\gamma, \mu\gamma, 3l, lK_S, e\pi^0, \mu\pi^0, \mu\eta$$

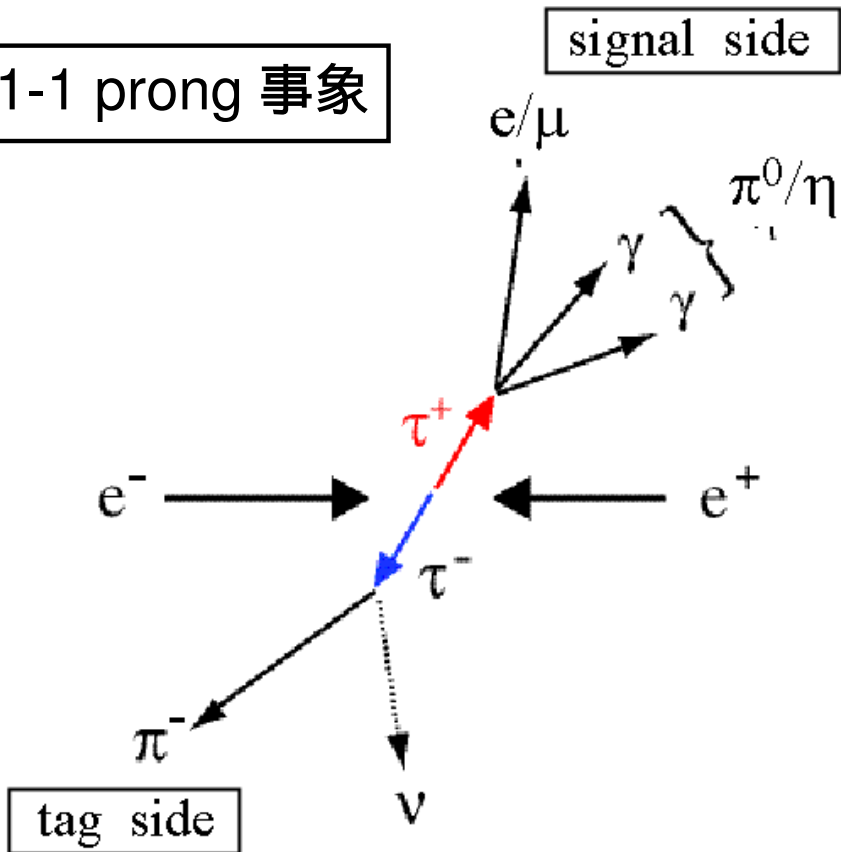


今回の探索

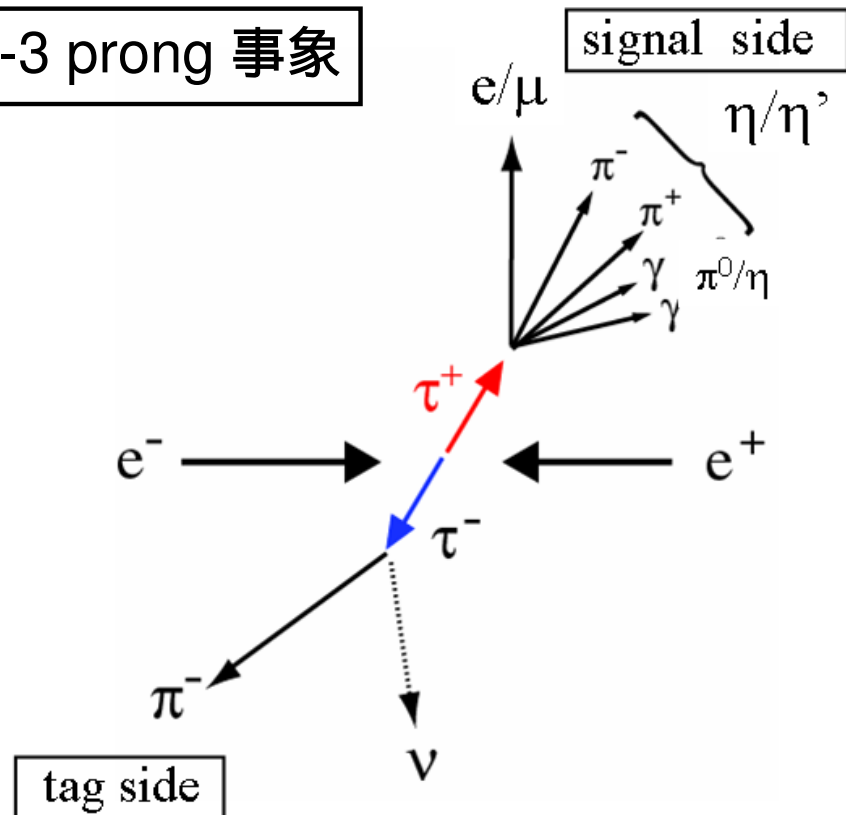
154 fb⁻¹ の
データを使用

$\tau \rightarrow \ell M^0$ 事象の探索

1-1 prong 事象



1-3 prong 事象



$$\left. \begin{aligned} \text{不変質量: } M_{inv} &= \sqrt{E_{\ell M^0}^2 - p_{\ell M^0}^2} \\ \text{エネルギー差: } \Delta E &= E_{\ell M^0}^{CM} - E_{\text{beam}}^{CM} \end{aligned} \right\}$$

信号事象:

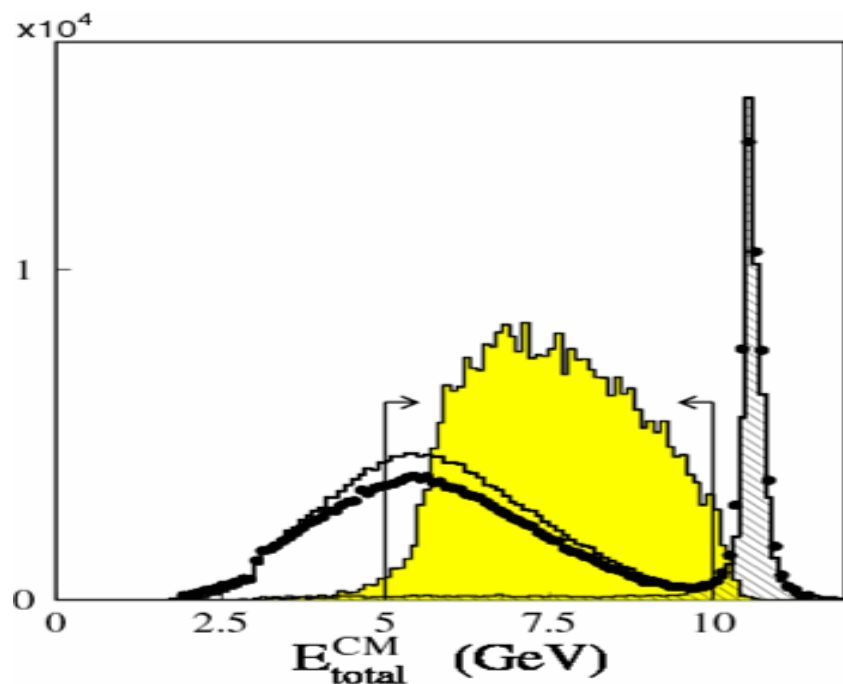
neutrino 無し of τ の崩壊
 $\Rightarrow M_{inv} = m_\tau, \Delta E = 0$

ΔE - M_{inv} 平面で信号事象数を評価

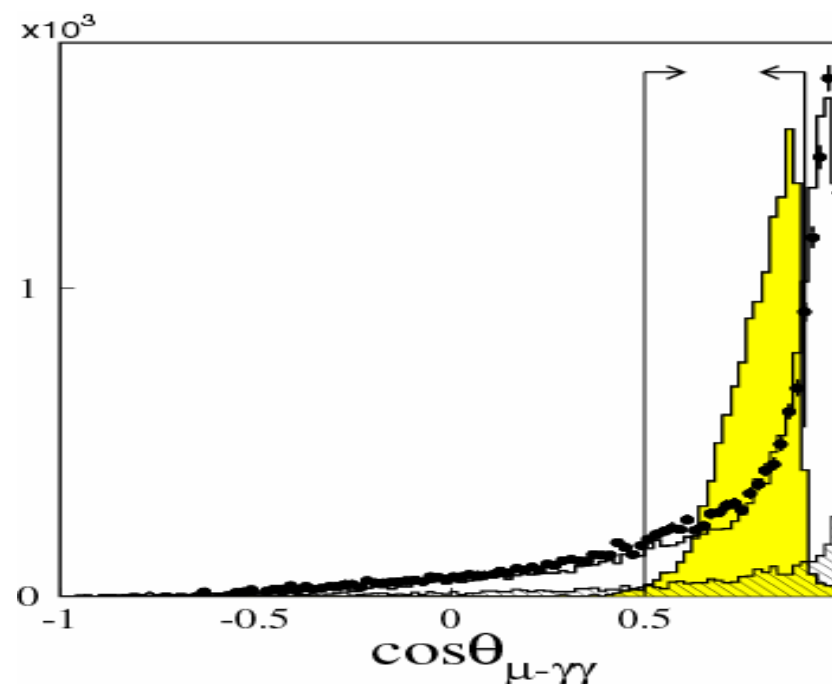
背景事象、信号事象の振る舞い \Rightarrow Monte Carlo simulation

Bhabha, $\mu\mu$, two-photon, $q\bar{q}$, $\tau\tau$

\blacktriangle : Data, \blacksquare : Signal MC, \square : BG MC \textbackslash : BG MC($\tau\tau$ 以外)



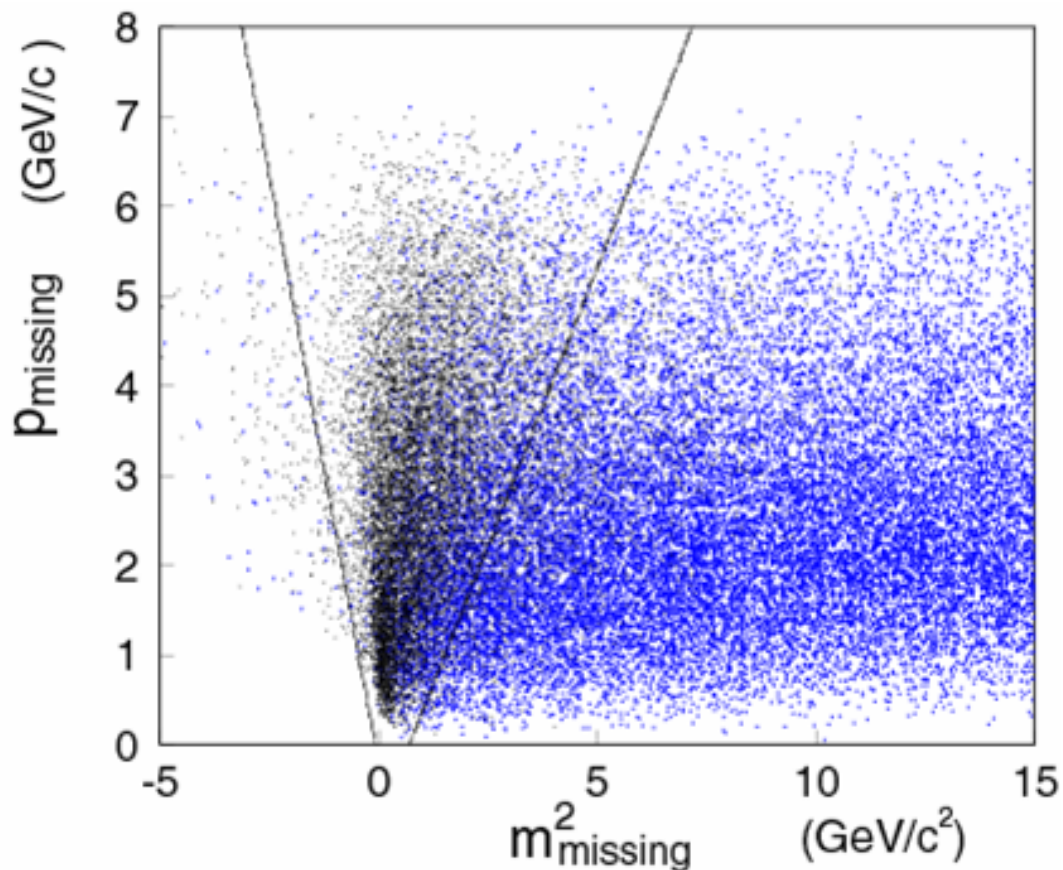
$5 \text{ GeV} < E_{\text{total}}^{\text{CM}} < 10 \text{ GeV}$
 \Rightarrow Bhabha, $\mu\mu$ 事象の抑制



$0.5 < \cos \theta_{\mu\eta} < 0.92$
 \Rightarrow $\tau\tau$ 事象の抑制

欠損質量 m_{miss} と欠損運動量 p_{miss} の情報を利用

- 信号事象: 欠損運動量 = tag side の ν の運動量 \Rightarrow 欠損質量 ~ 0
 - 一般の $\tau\tau$ 事象: signal side と tag side の両方に ν を含む
- $\Rightarrow p_{miss}-m_{miss}$ 分布に違い



黒: Signal MC

青: $\tau\tau$ MC

背景事象の抑制率

$$\tau\tau : 3.8 \times 10^{-6}$$

$$q\bar{q} (q=u, d, s) : 3.0 \times 10^{-7}$$

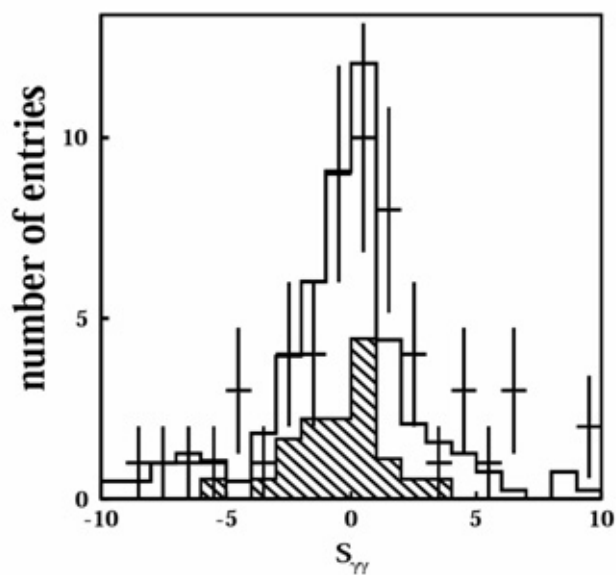
$$\mu\mu : 3.4 \times 10^{-8}$$

$$\text{Bhabha} : 3.0 \times 10^{-7}$$

π^0, η, η' mass 分布

π^0, η, η' mass 分布 ($\tau \rightarrow \mu M^0$)

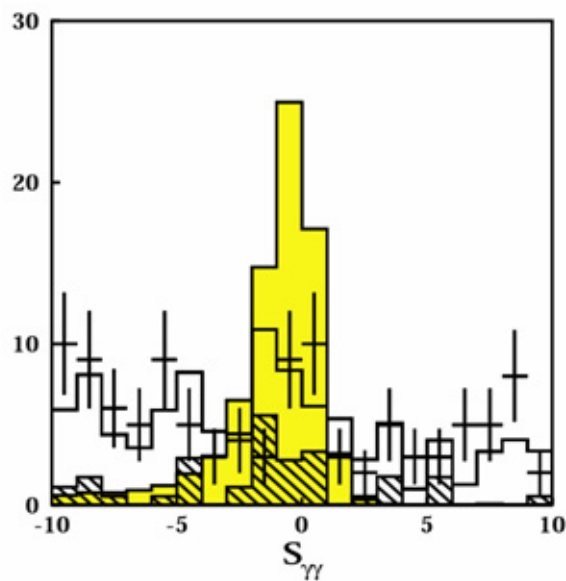
† : Data, ■ : Signal MC, □ : BG MC ▨ : BG MC($\tau\tau$ 以外)



$$-3 < S_{\gamma\gamma}^{\pi^0} < 3$$

$$S_{\gamma\gamma}^{\pi^0} = \frac{m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0}}{\sigma_{\gamma\gamma}}$$

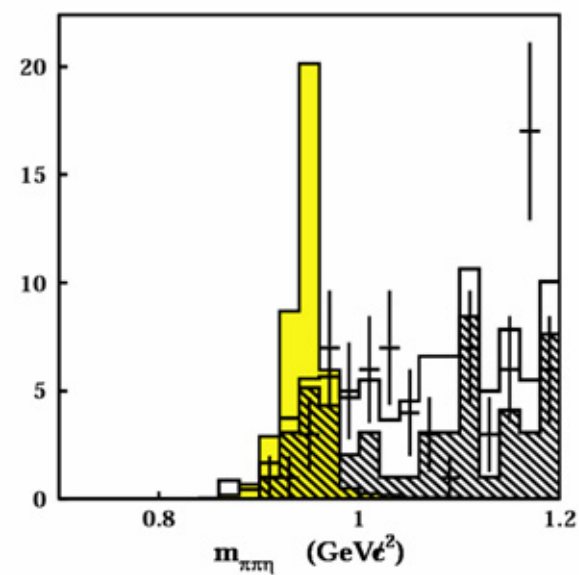
$$\sigma_{\gamma\gamma} \sim 5.2 \text{ MeV}/c^2$$



$$-5 < S_{\gamma\gamma}^{\eta} < 3$$

$$S_{\gamma\gamma}^{\eta} = \frac{m_{\gamma\gamma} - m_{\eta}}{\sigma_{\gamma\gamma}}$$

$$\sigma_{\gamma\gamma} \sim 12 \text{ MeV}/c^2$$



$$0.9074 < m_{\eta'} < 0.9824 \text{ GeV}$$

(3σ 領域)

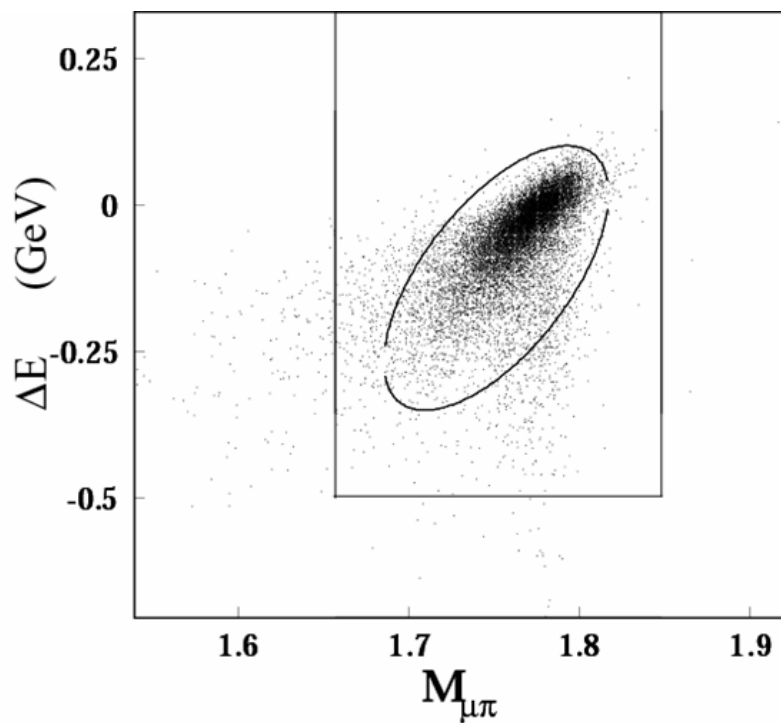
$$\sigma_{\gamma\gamma} \sim 14 \text{ MeV}/c^2$$

信号事象数: ΔE - M_{inv} 平面で評価

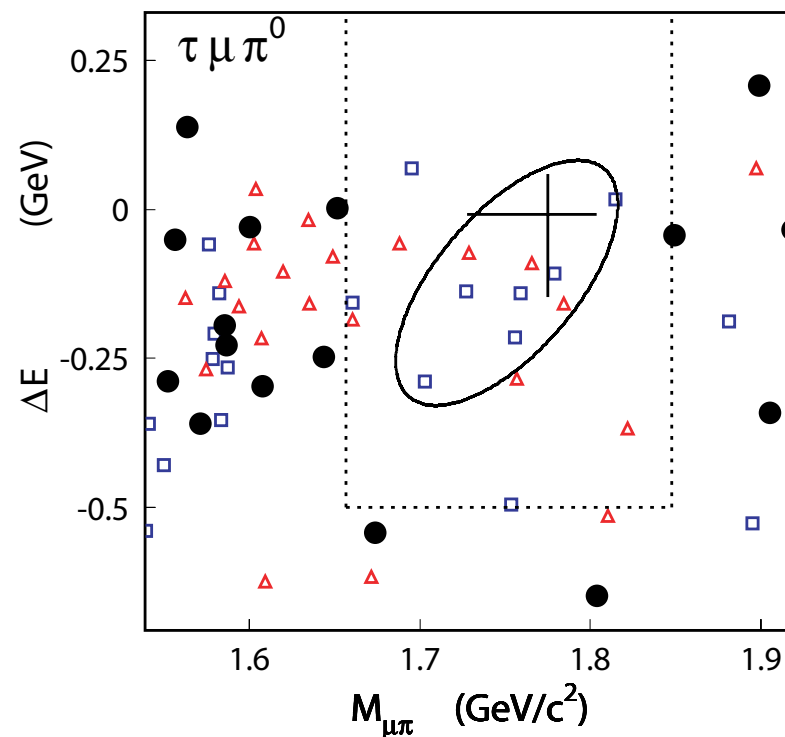
背景事象数の見積もりが終わるまで信号領域 (楕円領域) を隠しておく (Blind Analysis)

Signal MC で分解能を評価して $\pm 5\sigma$ 領域を Blind.

Signal MC



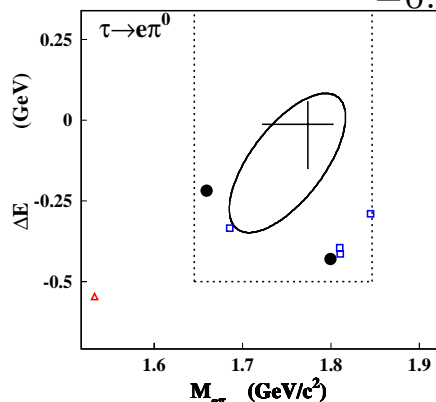
Data(●), BG MC : $\tau\tau$ (□), $q\bar{q}$ (○)



信号領域における背景事象数 \leftarrow side band 領域のデータの分布から見積もる

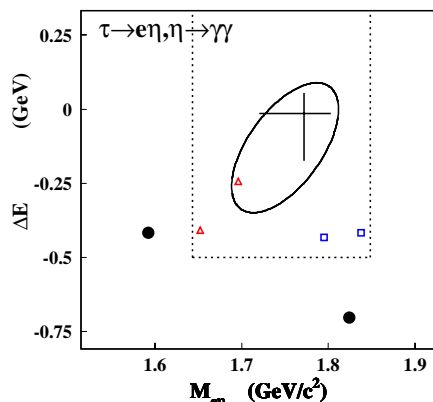
$\tau \rightarrow e\pi^0$

$0\text{ev}/0.0^{+0.4}_{-0.0}$



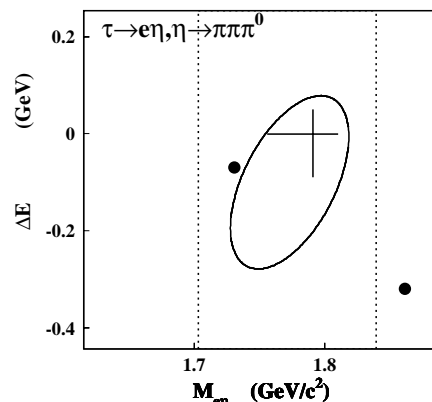
$\tau \rightarrow e\eta, \eta \rightarrow \gamma\gamma$

$0\text{ev}/0.2 \pm 0.2$



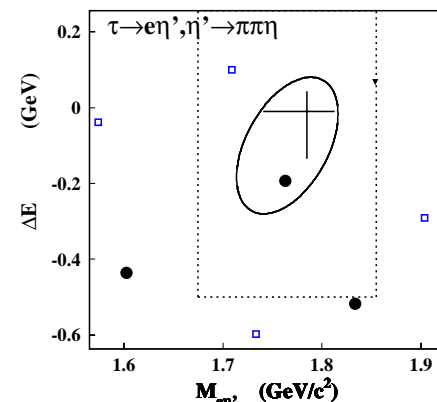
$\tau \rightarrow e\eta, \eta \rightarrow 3\pi$

$0\text{ev}/0.2 \pm 0.2$



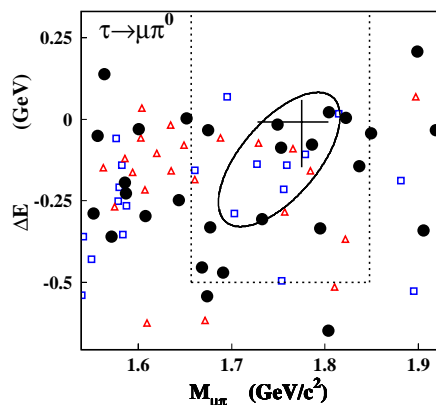
$\tau \rightarrow e\eta'$

$1\text{ev}/0.3 \pm 0.2$



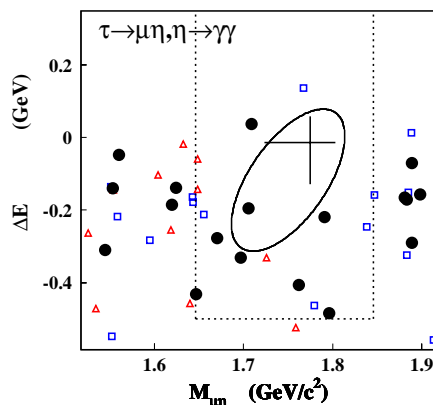
$\tau \rightarrow \mu\pi^0$

$5\text{ev}/3.0 \pm 0.9$



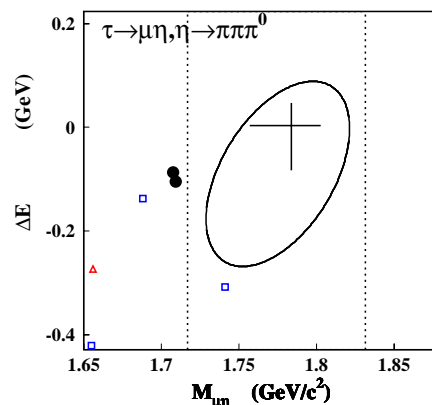
$\tau \rightarrow \mu\eta, \eta \rightarrow \gamma\gamma$

$1\text{ev}/3.9 \pm 1.5$



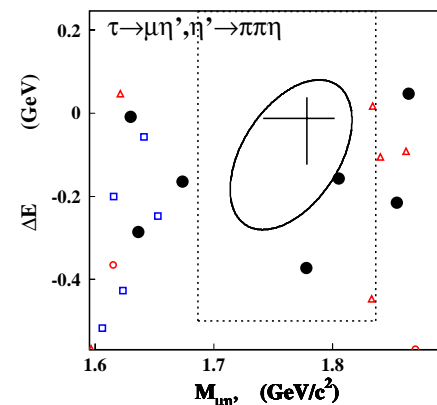
$\tau \rightarrow \mu\eta, \eta \rightarrow 3\pi$

$0\text{ev}/0.6 \pm 0.4$



$\tau \rightarrow \mu\eta'$

$0\text{ev}/0.9 \pm 0.6$



予想した背景事象数と信号領域内に見つかった事象数は consistent
 \Rightarrow 信号事象は見つからなかった \Rightarrow 崩壊分岐比の上限値を設定

$$\mathcal{B} < \frac{s_0}{2\epsilon\mathcal{B}_{M^0}N_{\tau\tau}}$$

ϵ : 信号検出効率 (4.70 ~ 8.51 %)

 $N_{\tau\tau} = 140M$: τ pair の数

 \mathcal{B}_{M^0} : π^0, η, η' 再構成 mode の崩壊分岐比

 s_0 : 信号事象数の上限値

 \Rightarrow Feldman-Cousins method で評価

さらに系統誤差を考慮 : POLE (J. Conrad, et al., PRD012002 (2003))

Preliminary Results (まもなく論文投稿予定)

Mode	U.L. of \mathcal{B} @ 90% C.L.
$\tau^- \rightarrow e^- \eta$	2.4×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \eta$	1.5×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^- \pi^0$	1.9×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \pi^0$	4.1×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^- \eta'$	10×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \eta'$	4.7×10^{-7}

これまでの結果を 10 ~ 64 倍改善

初めての探索

	CLEO	Belle	Belle/CLEO
Luminosity 検出効率 ϵ	4.7fb^{-1}	154fb^{-1}	33
$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	7.2%	8.0%	
$\eta \rightarrow 3\pi$	none	7.2%	1.7
N_{obs}	0	1	
U.L. of \mathcal{B} ($\times 10^{-7}$)	96	1.5	1/64

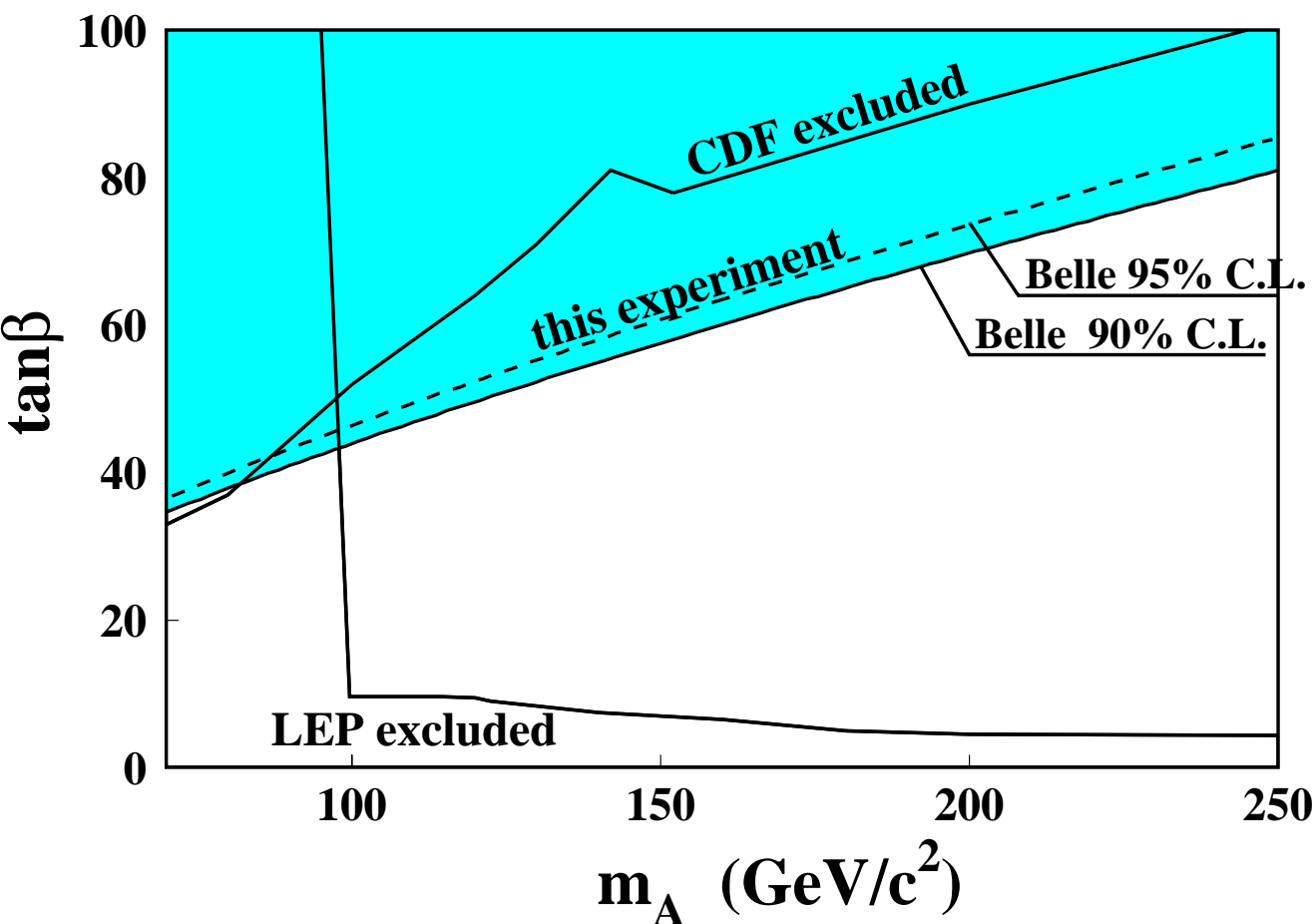
- 33 倍もの統計を使いながらも効率的な事象選択により背景事象を同レベルに押さえることに成功。
- $\eta \rightarrow 3\pi$ mode も解析することで検出効率を1.7 倍にまで改善

結果 $\tau \rightarrow \mu\eta$ の崩壊分岐比の上限値を 64 倍改善！

MSSM パラメータに対する制限

$$Br(\tau \rightarrow \mu\eta) = 0.84 \times 10^{-5} \times \left(\frac{\tan\beta}{60}\right)^6 \left(\frac{100\text{GeV}}{m_A}\right)^4$$

$$< 1.5 \times 10^{-7} \quad \Rightarrow \tan\beta, m_A \text{ に対する制限}$$



CDF Result (95%C.L):
 $p\bar{p} \rightarrow A/\phi bb \rightarrow bbbb$
 PRL86, 4472 (2002)

LEP Result (95%C.L):
 LEP Higgs Working Group

ほぼ全ての m_A の領域で
 CDF に勝る制限を与えた

Baryon Number Violating mode (expected from GUT?)

$\tau^- \rightarrow \Lambda \pi^-$: $B - L$ violating

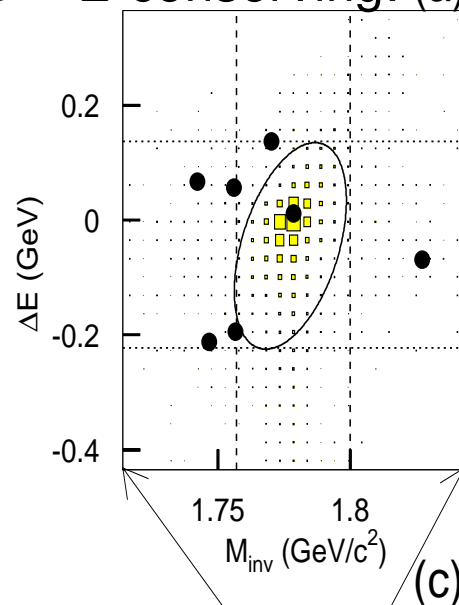
$\tau^- \rightarrow \bar{\Lambda} \pi^-$: $B - L$ conserving

	con.	vio.
Eff(%)	11.8	11.7
#(ev) in side-band	5	5
Expected	1.7 ± 0.8	1.7 ± 0.8
Observed	1	0
s_{90}	2.77	1.47
$\mathcal{B}(\times 10^{-7})$	< 1.3	< 0.70

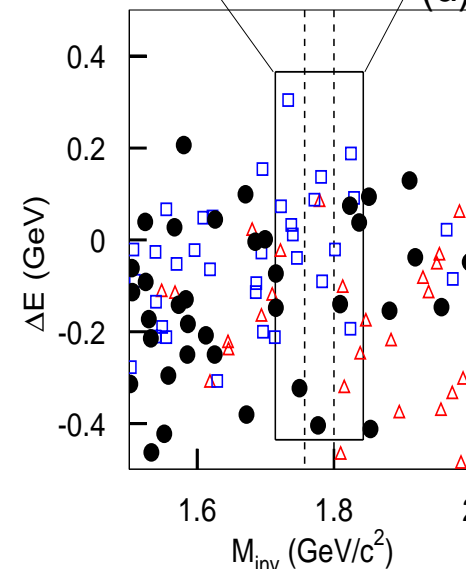
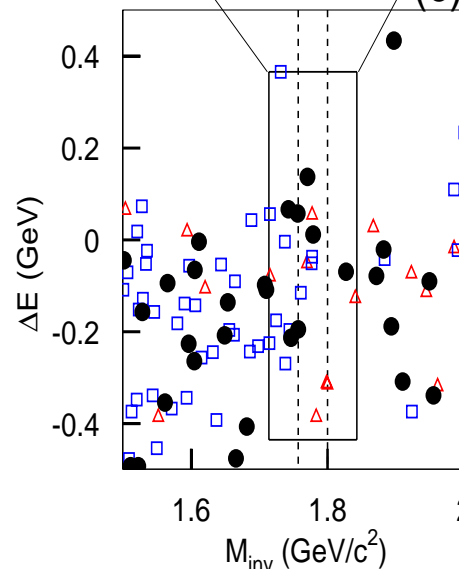
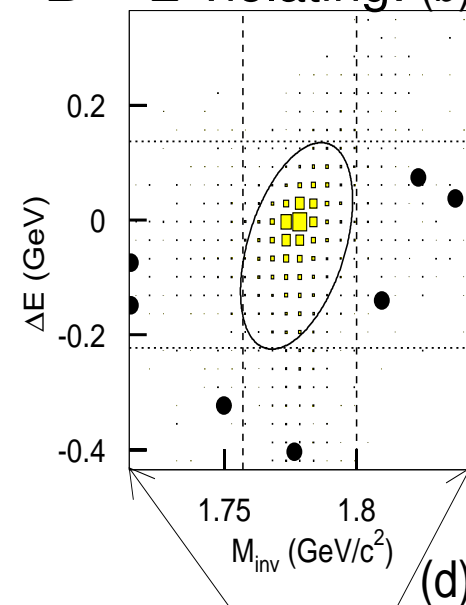
s_{90} : Signal UL @90% C.L.
(evaluated by POLE)

投稿論文準備中

$B - L$ conserving: (a)



$B - L$ violating: (b)



2nd class current: 標準模型で $\mathcal{B} \sim 10^{-5}$ が予言される稀崩壊現象であるが未発見。

current	J^{PG}	mode	$: J^{PG}$
1st class	$0^{++}, 0^{--}, 1^{+-}, 1^{-+}$	$\tau \rightarrow a_1(1260)\nu$	$: 1^{+-}$
2nd class	$0^{+-}, 0^{-+}, 1^{++}, 1^{--}$	$\tau \rightarrow b_1(1235)\nu$ ($b_1 \rightarrow \pi\omega$)	$: 1^{++}$

$\tau \rightarrow \pi \omega \nu$ には b_1 以外からの寄与が存在
 \Rightarrow 角分布が異なる

Fitting function:

$$F(\theta) = \frac{N}{4} \left\{ 3(1 - \epsilon)(1 - \cos^2 \theta) + 2\epsilon \right\}$$

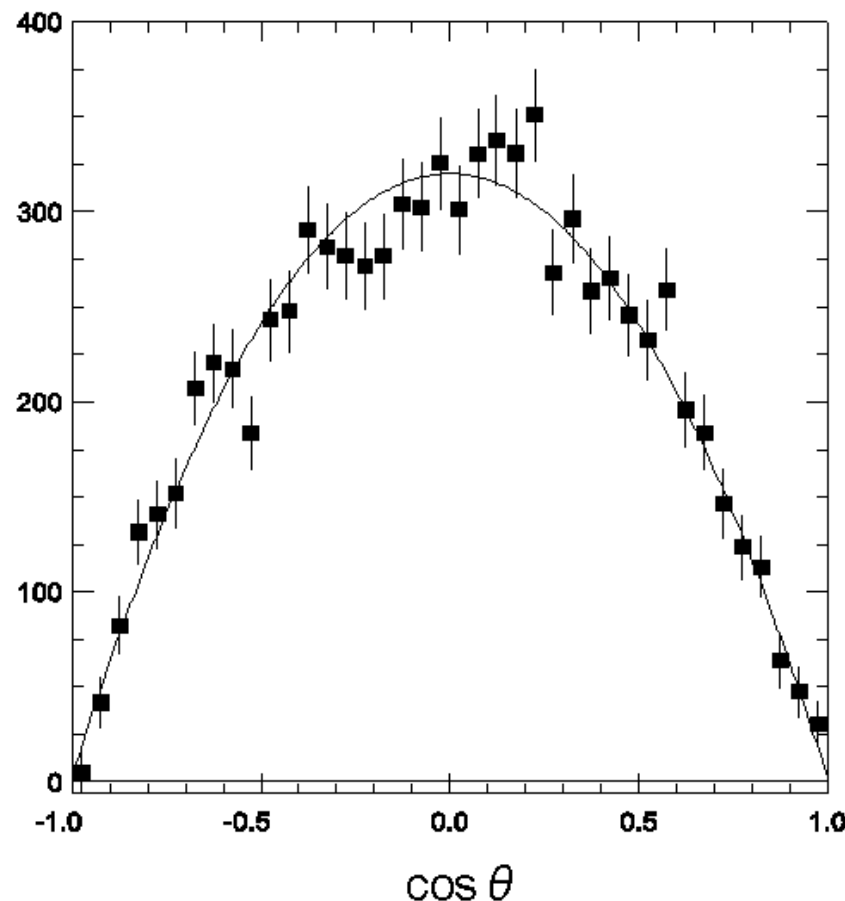
$\epsilon \neq 0 \Rightarrow$ 2nd class current

Preliminary (4.4fb^{-1})

Fitting result: $\epsilon = (1.50 \pm 1.25) \times 10^{-2}$

Upper Limit: $\epsilon < 0.036$ @95% C.L.

Previous Limit(ALEPH): $\epsilon < 0.086$ @95% C.L.



Spectral Function $v^{\pi\pi^0}$ の測定

⇒ Muon の異常磁気能率への Hadronic な寄与

$$v^{\pi\pi^0} \propto |F_\pi(s)|^2$$

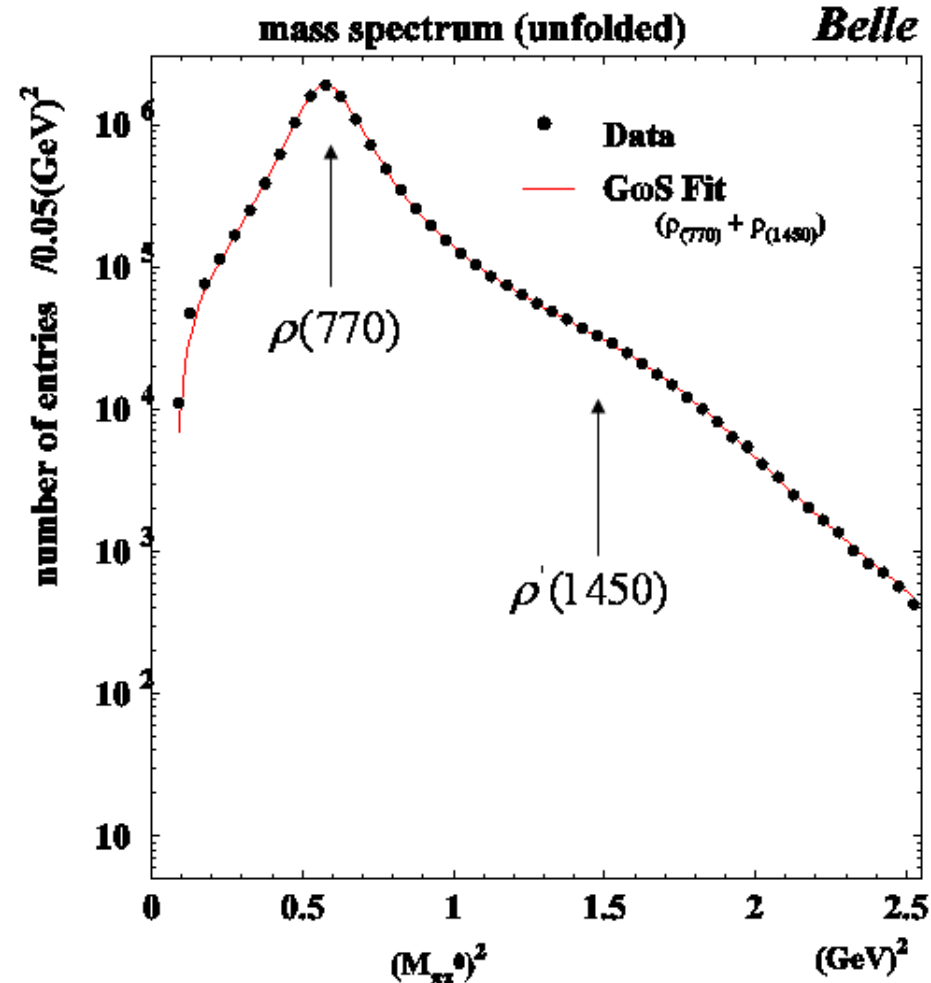
$$F_\pi(s) = \frac{1}{1 + \beta} (BW_\rho + \beta BW_{\rho'})$$

:Pion form factor

Breit-Wigner form

(Gounaris–Sakurai model)

$$BW_\rho = \frac{M_\rho^2 + d \cdot M_\rho \Gamma_\rho}{(M_\rho^2 - s) + f(s) - i\sqrt{s}\Gamma_\rho}$$



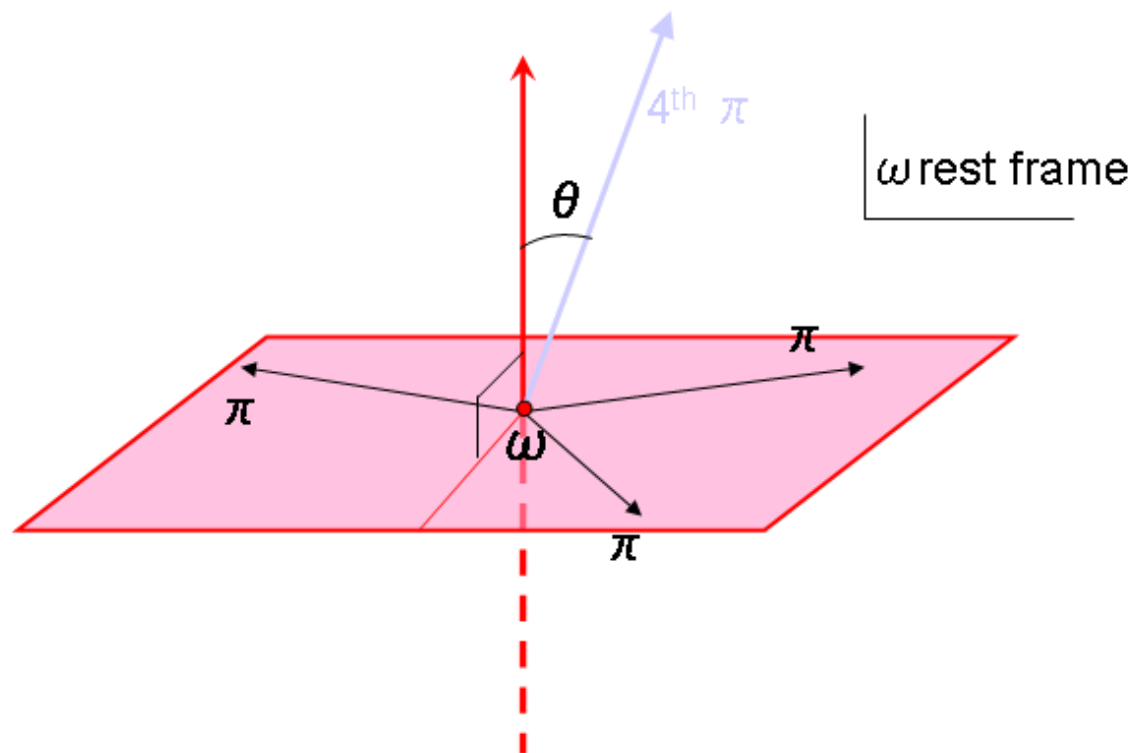
- LFV 事象の探索: 現在の我々の中心課題
 - Belle 実験で収集された 154fb^{-1} のデータを用いて $\tau \rightarrow \ell\pi^0, \ell\eta, \ell\eta'$ の 6 mode を探索
 - 効率的な事象選択により背景事象を押さえることに成功。 η の再構成モードを増やすことで検出効率を改善
 \Rightarrow 過去の実験に対して 10 ~ 64 の改善
 - MSSM の parameter $\tan\beta, m_A$ に対する制限
現在もっとも強い制限の一つ
 - 他の LFV mode の探索 (update) も継続中
- 他の解析も進行中
 - 2nd class current
 $\tau \rightarrow \pi\omega\nu, \tau \rightarrow \pi\eta\nu$
 - Spectral Function
 $\tau \rightarrow \pi\pi^0\nu$
 - τ EDM/MDM

Mode $\tau^- \rightarrow$	$e^- \eta,$ $\eta \rightarrow \gamma\gamma$	$e^- \eta,$ $\eta \rightarrow 3\pi$	$\mu^- \eta,$ $\eta \rightarrow \gamma\gamma$	$\mu^- \eta,$ $\eta \rightarrow 3\pi$	$e^- \pi^0$	$\mu^- \pi^0$	$e^- \eta'$	$\mu^- \eta'$
Track recon.	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
M^0 recon.	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	2.0	4.0	4.0
π^0 veto	5.5	–	5.5	–	–	–	5.5	5.5
e ID	1.0	1.0	–	–	1.0	–	1.0	–
μ ID	–	–	2.0	2.0	–	2.0	–	2.0
Trigger	0.5	0.1	0.2	0.1	0.7	0.4	0.1	0.1
Beam BG	2.3	2.1	2.3	2.1	2.3	2.3	2.1	2.1
Luminosity	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
\mathcal{B}_{M^0}	0.7	1.8	0.7	1.8	–	–	3.4	3.4
MC stat.	1.4	1.7	1.1	1.6	0.9	0.8	1.2	1.1
MC models	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Total	7.0	5.8	7.2	6.0	4.2	4.5	8.4	8.6

Mode	Subdecay mode	ϵ (%)	\mathcal{B}_{M^0} (%)	$N_{\text{side}}^{\text{DATA}}$ (ev.)	$N_{\text{side}}^{\text{MC}}$ (ev.)	s_0 (ev.)
$\tau^- \rightarrow e^- \eta$	$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	5.68	39.43	2	0	2.3
	$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	6.84	22.6	1	0	2.2
$\tau^- \rightarrow \mu^- \eta$	$\eta \rightarrow \gamma\gamma$	8.03	39.43	9	9.2 ± 2.3	1.4
	$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	7.15	22.6	2	0.8 ± 0.3	1.9
$\tau^- \rightarrow e^- \pi^0$	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	4.70	98.798	0	0.7 ± 0.7	2.4
$\tau^- \rightarrow \mu^- \pi^0$	$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	6.36	98.798	16	12.5 ± 2.7	6.9
$\tau^- \rightarrow e^- \eta'$	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	8.51	17.5	2	0.8 ± 0.3	4.2
$\tau^- \rightarrow \mu^- \eta'$	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta$	8.41	17.5	5	5.5 ± 1.9	1.6

$\tau \rightarrow \pi\omega\nu$: decay angle θ

θ : define the ω decay angle θ as the angle, in the ω rest frame, between the normal to the ω decay plane and direction of the 4th π



Preliminary Results

$$\int L dt = 154\text{fb}^{-1}:$$

Mode	UL of $\mathcal{B} \times 10^{-7}$
$\tau^- \rightarrow e^- \pi^0$	1.9×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \pi^0$	4.1×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^- \eta$	2.4×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \eta$	1.5×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^0 \eta'$	10×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \eta'$	4.7×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \bar{\Lambda} \pi^-$	1.3×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \Lambda \pi^-$	0.7×10^{-7}

Mode	$\int L dt$	UL of $\mathcal{B} \times 10^{-7}$
$\tau^- \rightarrow e^- \gamma$	87fb^{-1}	3.8×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- \gamma$		3.1×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^- e^+ e^-$	87fb^{-1}	3.5×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^- \mu^+ \mu^-$		2.0×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^+ \mu^- \mu^-$		2.0×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- e^- e^+$		1.9×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^+ e^- e^-$		2.0×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^-$		2.0×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow e^- K_S$	46fb^{-1}	2.9×10^{-7}
$\tau^- \rightarrow \mu^- K_S$		2.7×10^{-7}