

TAU-Physics at Belle (1)

— $\tau \rightarrow \mu\gamma$ and $\tau \rightarrow e\gamma$ —

名古屋大学 大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻高エネルギー物理学実験研究室

大島 隆義、居波 賢二、早坂 圭司

ohshima, kenji, hayasaka@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

はじめに

高エネルギー研究所の加速器グループはそのずば抜けた優秀さを、KEKB ファクトリーにおいて世界最強度ルミノシティーを達成することにより世界に顕示した。現在のルミノシティーは $1.3 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$ であり、未だ記録を更新中である。また、このすばらしい環境のもとで Belle グループの研究者も負けじと注目を引く物理成果を報告し続けている。特に、最近の結果では、 $B \rightarrow \phi K_S$ 崩壊事象の CP 非保存が標準理論の予測値と大きく異なる数値を示し、new physics の可能性を示唆するものか、として今後のデータの振る舞いが大きな関心を呼んでいる。

この B ファクトリーのエネルギー領域では、タウ・レプトン対の生成断面積は B 中間子対の断面積とほぼ等しい ($\sigma(e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-) \simeq 0.9 \text{ nb}$; $\sigma(e^+e^- \rightarrow B\bar{B}) \simeq 1.0 \text{ nb}$.)。したがって、KEKB は B ファクトリーであるとともにタウ・ファクトリーでもある。そして、前者が第三クォーク・ファミリーの b クォークを対象とするのに対し、後者は第三レプトン・ファミリーのタウ・レプトンを研究対象とするわけだ。Belle では名古屋大、奈良女、東北大、中央大、台湾大、KEK で構成される “Tau & Two-photon subgroup” (リーダー：林井 (奈良女)、上原 (KEK)) がタウ物理解析を進めている。

本稿では、このタウ・レプトン (τ -lepton) 研究についてのわれわれの視点をはじめに展開する。そして、多くの課題の中から今回は Lepton Flavor Violation (LFV)、特に、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ と $\tau \rightarrow e\gamma$ に絞り、現状を報告する。¹

1. τ 物理の特徴

τ の特徴

τ は最も重い荷電レプトンであって、ハドロンに崩壊する唯一のレプトンである。electron の 3,477 倍、muon の 17 倍の質量は、物理研究の領域を著しく拡大する。この様子は Particle Physics Booklet でみることができる。muon の

¹Tau を τ 、または tau、あるいはタウと書いた。原稿完成後に統一しようと考えたが、それぞれにフィーリングの違いを気分として持たせたので最終的な統一が難しくなった。ご容赦ください。

崩壊モードは 3 種 (保存則を破るモードを加えると 7 種) であるのに対し、 τ は 140(189) 種の崩壊モードがリストアップされている。また、electron には 1.5 ページが、muon には 6 ページが割かれているのに対し、 τ には 23 ページを費している。

一方、寿命は安定な electron や muon ($\tau_\mu = 2.2\mu\text{s}$) と比べ、0.3 ps と大変短く、大量に蓄積する実験が行えないため、超精密測定が難しい。

τ 対の生成から崩壊の elementary な流れを図 1 に示す [1]。強い相互作用から弱い相互作用まで、electron や muon ではとても被いきれない物理領域が展開している様子が分かる。

さらに、崩壊モード数が単に著しく多いだけでなく、質量の大きさは gauge boson などへの結合力を強くする。もっとも簡単な例は、 $\tau^- \rightarrow \nu_\tau W^-$ の電弱崩壊ダイアグラム (図 2) に見ることができる：

$$\Gamma \sim \alpha_W^2 \left(\frac{m_\tau}{M_W} \right)^4 m_\tau \quad (1)$$

τ のこのような特性が、標準理論を越えた未知の物理 (Beyond the Standard Model: 以下、Beyond Physics と記す) に高い感度を与えるわけである。

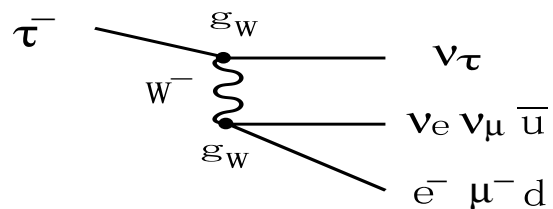


図 2: $\tau^- \rightarrow \nu_\tau W^-$ 崩壊

τ 物理の眺望

図 3 に τ 物理の展開図を示す。Belle 実験での高統計データを前提として、(1) 稀崩壊あるいは禁止崩壊モードを探索する *Rare physics*, (2) 高精度測定により標準理論の精密検証あるいはそのズレとしての *Beyond Physics* を探索する *Precision physics*, そして、(3) *Bread & Butter physics* と

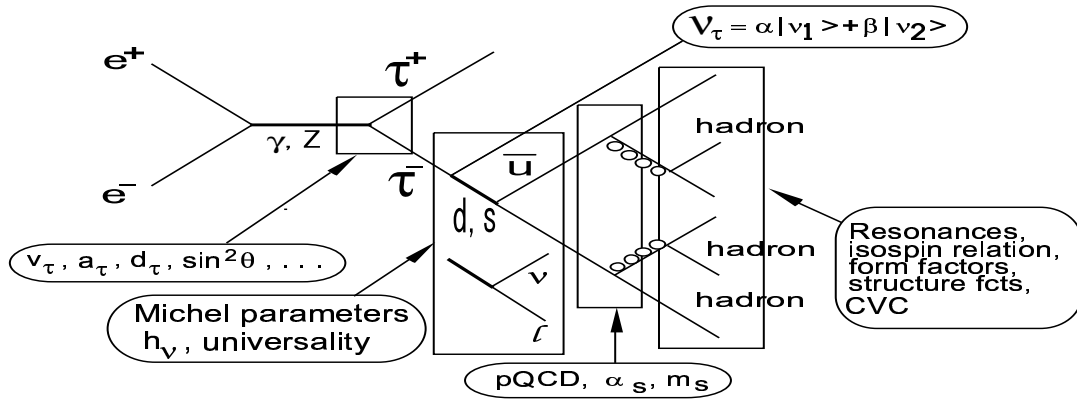


図 1: Tau-lepton's Nutshell

眺めるのが著者の視点である。(1)は“Sensitivity Frontier”であり、(2)は“Precision Frontier”と位置付ける。

2. Belleでのタウ・データの特徴

統計量

τ 研究の変遷 (表 1) をみよう。1975 年の τ 発見の昔から LEP まで一気にジャンプする。 τ 研究はもっぱら e^+e^- collider ($e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 反応) による。B ファクトリー以前の段階では ARGUS ($\sqrt{s} = 10$ GeV) ならびに BEPC (4 GeV) の実験があり、収集したデータ量はほぼ $10^5 \tau$ 対サンプルである。LEP ならびに SLD では Z^0 peak 域で測定し、これらもほぼ同様に 10^5 の τ 対サンプル量である。LEP はさらに 100 GeV 以上のエネルギー領域で測定したが、サンプル量ははるかに少ない。これが、 τ 発見直後の創成期に続く、標準理論の観点からの τ -lepton の広角的な検証研究時期 (第二期) である。

B ファクトリー (KEKB-Belle, PEP-II-BaBar, CESR-CLEO) は、桁違いのサンプル量 (a few $\times 10^7 \tau$ 対/年) の収集を可能とし、Beyond Physics を探る Sensitivity Frontier ならびに Precision Frontier の第三期の開拓を進めている。本稿で報告する LFV は、まさにこの物理の代表格である。2-3 年の内には 500 fb^{-1} 、つまり、 5×10^8 の τ 対サンプル量を得る。荒っぽい話をすれば、検出効率 10%、バックグラウンドなしであれば、single event sensitivity $\sim 10^{-8}$ になる訳だ。

τ データの特異性

非対称 e^+e^- 衝突実験 B ファクトリーのもとで考える。

1. $B\bar{B}$ やその他 $q\bar{q}$ ($q = u, d, s, c$) 過程と比べ、 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ は multiplicity が低い。これは事象選別に利点を生む。その一方で、終状態粒子の運動量が比較的高くなり ($p^{max} \sim 6-7 \text{ GeV}/c$)、粒子識別が難しく

表 1: τ 研究の変遷

第二期	($10^5 \tau$ -pairs recorded): BEPC (4 GeV), ARGUS (10 GeV) LEP & SLD (on Z^0) LEP (small samples at > 100 GeV)
第三期	($10^{8-9} \tau$ -pairs will be produced): KEKB-Belle (10 GeV asym.) PEP-II-BaBar (10 GeV asym.) CESR-CLEO (10 GeV sym.)
第四期	($10^{10-11} \tau$ -pairs will be produced): SuperB (10 GeV asym.)

なる。

2. τ 崩壊は必ずニュートリノを伴う。しかも、レプトニック崩壊であればニュートリノ対となる。したがって、exclusive な事象選別は不可能である。仮に、崩壊粒子の 4 元運動量が推測できたとすると、1 ニュートリノ放出であれば欠損 (missing) 質量 $\simeq 0$ で崩壊粒子が τ であるか判別ができる。しかし、ニュートリノ対では如何ともしがたい。現実には、対生成の両サイドのニュートリノ放出のため、 τ の 4 元運動量は構成できない。
3. τ 対の生成方向もニュートリノ放出のため一義的には構成できない。両サイドの τ が 1 ニュートリノの放出であれば、initial radiation がいないとの前提のもとで運動学的には τ の方向を決めることができる。ただし、解は二つある。LEP のようにエネルギーが高ければ、終状態粒子は拡がらず τ の生成方向を反映する；また、 $\beta (\simeq 1)$ が充分高いため崩壊点が分離・検出でき τ 方向を測ることができるとともに、事象選別に有効である。B ファクトリーのエネルギーは充分高くなく ($\beta = 0.87-0.97$; $\gamma = 2-4$)、このよう

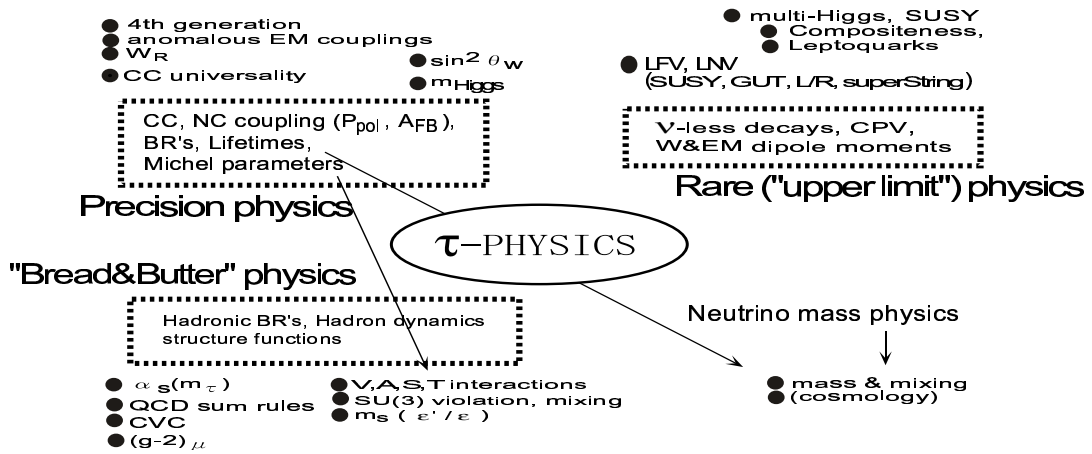


図 3: Perspective View of Tau Physics

な利点はない。

4. $B\bar{B}$ と違い $\tau^+\tau^-$ 生成の Q value が大きいので、initial state radiation が広いエネルギー領域にわたり、かつ頻度高く分布する。大半の radiation photon はビームパイプ中へ逃げるため、上記のニュートリノと同じく信号の同定を一層難しくする。
5. 対称衝突と非対称衝突の違いを生ずるか？との問いには、物理解析では総体的に本質的な違いが今のところない。

これらの観点から、tau の exclusive 崩壊事象を抽出する LFV 探索 (tag サイドはニュートリノを伴う tau の generic な inclusive 崩壊である) が困難さが少なく、高い感度を達成できる利点があるわけだ。

3. Lepton Flavor Violation 崩壊の探索

3.1 $\tau \rightarrow \mu\gamma$

図 4 に $\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$, $\text{Br}(\tau \rightarrow e\gamma)$ の探索の推移を示す。80 年代から測定がはじまり、ここで報告する Belle 実験が Beyond Physics に感度をもつレベル $\mathcal{O}(10^{-7})$ にはじめて達した。

(1) Physics

レプトン数非保存は標準理論では禁止遷移である。しかし、Beyond Physics では、新しい gauge 粒子との相互作用を通じて現れる稀崩壊であり、大いに期待される有望株である。それらは、GUT, Left-Right symmetry, SUSY, Superstring, Supergravity, Technicolor の理論モデルなどである。崩壊比はモデルにより当然異なるが、 $\mu \rightarrow e\gamma$ に

$\tau \rightarrow \mu\gamma$ ● / $\tau \rightarrow e\gamma$ ○ Experimental & Theoretical Status

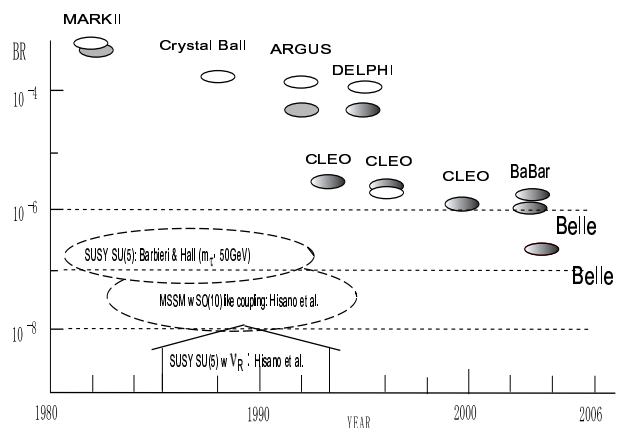


図 4: 実験の推移

比べ、 τ 質量の大きさから前節で指摘したような要因により崩壊比が $10^{5\sim6}$ 倍増倍される利点がある。

$\tau \rightarrow \mu\gamma$ はクォークセクターでの $b \rightarrow s\gamma$ 過程と同じダイアグラムが書ける (図 5(a))。後者においては仮想フェルミオンとして重質量の top quark の寄与が大きく、B 中間子崩壊を介して $\mathcal{O}(10^{-4})$ の分岐比を生ずる。一方、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ では top quark がニュートリノに置き換わるが、ニュートリノ質量が超軽量のため、その寄与からの分岐比は無視し得る程小さい。また、シーソー機構によりニュートリノ質量を与える右巻き重ニュートリノ (ν_R) が仮想フェルミオンとして働いたとしても、逆に、その超重質量 ($M_{\nu_R} \sim 10^{15}$ GeV) のため、この場合も分岐比は検出できない程小さい ($\text{Br} \propto 1/M_{\nu_R}^2$) と考えられる。

しかし、存在が予想される超対称性 (SUSY) が電弱相互作用スケールで破れ、超対称性粒子が、たとえば、超レプト

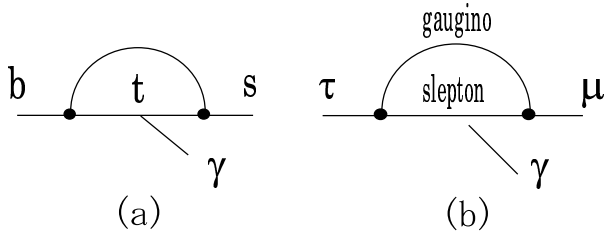


図 5: (a) $b \rightarrow s\gamma$, (b) $\tau \rightarrow \mu\gamma$

ンと超 gauge 粒子が図 5(b) の仮想状態を構成するならば、B ファクトリーで検出し得る分岐比 ($\text{Br} = \mathcal{O}(10^{-7\sim-9})$) を持ち得る (図 4) [2]。よって、new world への入口をこの崩壊事象の検出に求めることができ、そのため探索結果が大きく期待されるわけである。

Mimimal SUSY Standard Model では、

$$\begin{aligned} \text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma) \\ = 1.3 \times 10^{-7} \left(\frac{\tan\beta}{60} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ (TeV)}}{M_{\text{SUSY}}} \right)^4 \end{aligned} \quad (2)$$

と計算する [3]。

$\tau \rightarrow e\gamma$ は世代を跨ぐ遷移であるため、多くの場合 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ より遥かに分岐比が小さいと考えられている。しかし、レプトンの質量パターン (ordering) によっては $\text{Br}(\tau \rightarrow e\gamma) \gg \text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$ があり得るわけで、両反応の探索が重要なのである [4]。

(2) Belle 実験

KEKB-Belle 実験はこの高エネルギーニュースですすでに幾度も報告されているので、加速器やスペクトロメータについては省略する。たとえば、参考文献 [5] を参照されたい。

ここでは、まずオンライン・データ収集のためのトリガーの簡単な説明から入ろう。

Tau trigger & Event classification

実験のトリガーシステムは level-1,3,4 (L1,L3,L4) から構成される。L1 はハードウェアトリガーであり、L3,L4 はオンライン、オフライン ソフトウェアトリガーである。

タウ粒子対過程に対して、L1 では主に 3 種類のトリガーロジックが重要である。飛跡トリガー、エネルギートリガーとそのコンビネーショントリガーである。飛跡トリガーは主に飛跡検出器 (CDC) のワイヤヒットパターンによって再構成された飛跡の本数 (2 本)、開きの角度 (135 度以上) の情報を用いてロジックが構成される。エネルギートリガーは電磁カロリメータ (ECL) で測定されたエネルギーとそのヒットパターンを元に構成される。コンビネーショント

リガーはその中間を補間する条件でロジックが組み立てられている。

L3,L4 トリガーでは、主にソフトウェアで再構成された飛跡が衝突点付近から伸びているかによってイベント選別を行なう。L3 では $|z| < 5\text{cm}$ の条件を、L4 では $|r| < 1\text{cm}$, $|z| < 4\text{cm}$, 横運動量 $p_t > 0.3\text{GeV}/c$ の条件を満たす飛跡が 1 本以上あることを要求する。

このようなトリガーでの効率、一般的なタウの崩壊では 95% 以上となっている。

トリガー収集されたデータは、解析前段階の pre-selection についで $\tau\tau$ 事象の純度をあげる。この事象選別基準項目はつぎに述べるデータ解析段階の選別項目と重なる (しかし、選別基準値は異なる) ものが多いため以下に譲る。

Signal

信号事象は、信号 τ が ($\mu\gamma$) を構成し、他方の τ は 1 荷電粒子 (ただし、muon でない) に崩壊する任意のモード (1 charged-particle + $n\gamma$ + X(missing)); 分岐比=68% であるとした (図 6)。したがって、選別事象は

$$(\mu\gamma) \{ \mu + n\gamma + X \} \quad (3)$$

である。 μ は muon でない荷電粒子を意味する。

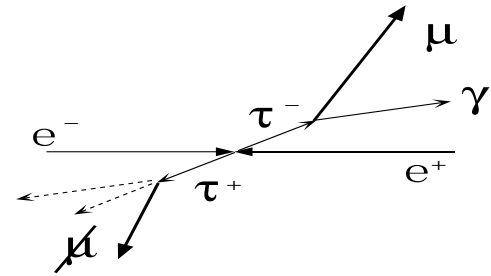


図 6: 信号選択パターン

信号事象の最終判断は、 $\mu\gamma$ の不変質量 ($M_{\mu\gamma}$) が τ 質量 ($m_\tau = 1.777 \text{ GeV}/c^2$) を持ち、かつ、そのエネルギー ($E_{\mu\gamma}^{\text{CM}}$) は CM 系におけるビームエネルギー ($E_{\text{beam}}^{\text{CM}}$) に等しい ($\Delta E \equiv E_{\text{beam}}^{\text{CM}} - E_{\mu\gamma}^{\text{CM}} = 0$) という要請である。 $M_{\mu\gamma}$ ならびに ΔE の分解能は、各々

$$\sigma_{M_{\mu\gamma}} \simeq 23/15 \text{ (MeV}/c^2);$$

$$\sigma_{\Delta E} \simeq 75/34 \text{ (MeV)}$$

である (分布が非対称であるため、低エネルギー側/高エネルギー側の σ 値を示した)。

また、解析においては先入観や偏見を避けるため、解析の初段から信号領域を被い、選別基準、分岐比導出の手順や系統誤差の評価などすべてが確立してのちに被いを外す

blind analysis 法を採用した。被った信号領域 (Blind 領域) は $1.70 \text{ GeV}/c^2 < M_{\mu\gamma} < 1.85 \text{ GeV}/c^2$ である。

Background

実験感度は、(1) 統計量 (積分ルミノシティ)、(2) (信号事象の存在を判断する物理量の) 分解能、(3) S/BG 比に大きく依存する。特に、稀崩壊事象の探索は、バックグラウンド事象 (BG) を如何に、そして、どこまで抑えられるかによる。

データならびにモンテカルロ・シミュレーション (MC) の詳細な検討から、主要な BG は、大角度の高エネルギー initial state radiation photon を伴う generic な $\tau\tau$ 反応 ($\gamma\tau\tau$) であることを把握した。具体的には、 τ の一つが $\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}$ 崩壊して、initial radiation の光子と組んで τ を構成する。そして、他方の τ が non-muonic な 1 track を生ずる崩壊事象である。

$\gamma\tau\tau$ と比べ少ないが、しかし無視できない頻度をもつ二番目の BG は、これも initial state radiation photon を伴う $\mu\mu$ 反応である。ここでは、片方の μ が muon 検出器の不効率 (inefficiency) の分だけ not-muon ($\bar{\mu}$) として判別される。この不効率値はほぼ 12% であり、後述する $\tau \rightarrow e\gamma$ 反応探索において electron を not-electron として認識する 2% と比較すると、随分大きい。

$\gamma\tau\tau$ ならびに $\gamma\mu\mu$ 以外の BG の寄与の程度は、MC で評価した。その結果、 $q\bar{q}$ ($q = u, d, s$) continuum のみからわずかの寄与の可能性が判明した。

これらの分析から BG の寄与は、

$$\begin{aligned} N^{\text{BG}}(M_{\mu\gamma}, \Delta E) &= (1 + \Lambda) N_{\gamma\tau\tau}(M_{\mu\gamma}, \Delta E) \\ &\quad + \kappa N_{\gamma\mu\mu}(M_{\mu\gamma}, \Delta E) \end{aligned} \quad (4)$$

と展開できる。右辺の第一項、第二項はそれぞれ $\gamma\tau\tau$ と $\gamma\mu\mu$ からの寄与である。 Λ は uds continuum の寄与の割合を、 κ は muon 識別の不効率 η から与えられる値であって $\kappa = \eta/(1 - \eta)$ と書ける。以降に述べる BG 分析から、 $\Lambda = 0.22$, $\kappa = 0.11$ である。

Event selection

表 2 に 4 種類の選別レベルをもつ信号事象選別基準を示す。さらに、レベル 1 では、Bhabha ならびに $\mu\mu$ 反応を除去するため、両荷電粒子には $p^{\text{CM}} < 4.5 \text{ GeV}/c$ の要請、と $\gamma\mu\mu$ 検出エネルギー総和には $E_{\text{SUM}}^{\text{CM}} < 9.0 \text{ GeV}$ の要請を加えた。

レベル 2 の muon 判別は主に KLM counter (電磁石リターンヨークを構成する convertor と resistive plate chamber の組合せ) の情報にもとづく。

また、レベル 2, 3 では記載していないが、欠損 (missing) 粒子も含めた各々の粒子の polar-angle に対して検出器に合わせた角度領域を設けている。tag-side の track と欠損粒子の opening 角度 ($\cos \theta_{\text{tag-miss}}^{\text{CM}}$) は $\gamma\tau\tau$ BG の除去に有効である。

表 2: $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 選別基準

Level	基準
1	< 事象パターンへの識別 > <ul style="list-style-type: none"> • two opposite-charged tracks ($p_t > 0.1 \text{ GeV}/c$) • $\leq 1 \gamma$ ($E_\gamma > 0.1 \text{ GeV}$)
2	< 運動学的要請と粒子識別 > (signal side) <ul style="list-style-type: none"> • $p_\mu > 1.0 \text{ GeV}/c$; • $P_\mu > 0.95$; • $E_\gamma > 0.5 \text{ GeV}$ (tag side): <ul style="list-style-type: none"> • $P_{\bar{\mu}} < 0.80$
3	< 粒子間の相関制限 > <ul style="list-style-type: none"> • $0.4 < \cos \theta_{\mu\gamma}^{\text{CM}} < 0.8$; • $\cos \theta_{2\text{-trks}} < 0$; • $p_{\text{miss}} > 0.4 \text{ GeV}/c$; • $\cos \theta_{\text{tag-miss}}^{\text{CM}} > 0.4$
4	< BG 除去 (Nagoya Cut) > <ul style="list-style-type: none"> • $p_{\text{miss}} > -5m_{\text{miss}}^2 - 1$; • $p_{\text{miss}} > 1.5 m_{\text{miss}}^2 - 1$

レベル 4 では $\gamma\tau\tau$ ならびに $\gamma\mu\mu$ の BG を排除するため、欠損運動量と欠損質量の相関に関する (“Nagoya Cut” と呼ばれる) 新たに開発した選別基準を導入した (図 7)。これは信号事象の欠損量は tag-side のニュートリノによるものであるが、BG 事象では両サイドのニュートリノや検出から逃れた粒子の運動量、エネルギーにもとづくものであって M_{miss}^2 は大きな値をもつ、ことを利用したものである。この結果、信号事象の 76% を保持しながら、 $\gamma\tau\tau$ は 98%、 $\gamma\mu\mu$ は 80% を排除することに成功した。

信号の評価

Blind 領域を開ける前に BG の評価を行う。 $\gamma\tau\tau$ 頻度は MC (図 8 左) で評価し ($N_{\gamma\tau\tau}^{\text{MC}}$ と表記する)、 $\gamma\mu\mu$ は測定データ (図 8 右) から $\gamma\mu\mu$ 事象 ($N_{\gamma\mu\mu}^{\text{data}}$ と表記する) を選び出し muon 識別の不効率を考慮して求めた。前者は $\Delta E < 0$ の領域のみに分布し、後者は $\Delta E > 0$ にも分布する。これは initial radiation の後の $\mu\mu$ 反応であることを考えれば理解できる。

表 2 の選別後、 $1.5 \text{ GeV}/c^2 < M_{\mu\gamma} < 2.0 \text{ GeV}/c^2$; $-0.5 \text{ GeV} < \Delta E < 0.5 \text{ GeV}$ の広い領域を対象とし、データ残留事象数と予想 BG 事象数を比較する。BG 事象数は、 $N_{\gamma\tau\tau} \simeq 90.6$, $N_{\gamma\mu\mu} \simeq 40.4$, uds continuum ~ 12.7 であり、総計 143.7 ± 15.5 事象である。一方、データ残留事象数は 160 ± 12.6 であった。

Blind した信号領域での BG 頻度を正確に求めるため、式 (4) に従って $M_{\mu\gamma}$ - ΔE 空間での BG 分布を関数化する。

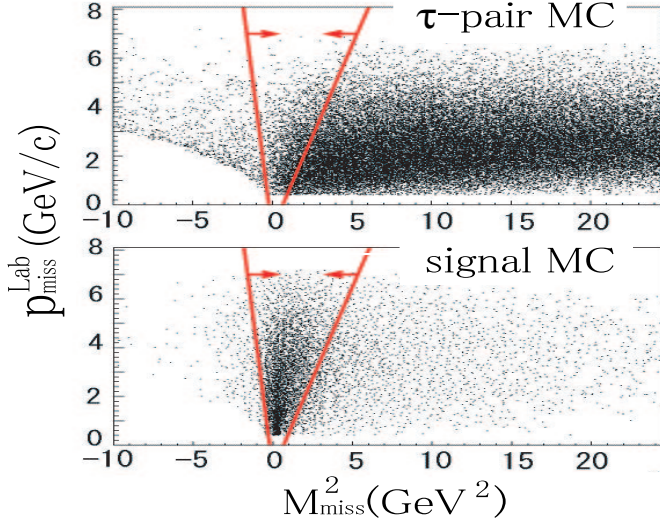


図 7: Nagoya Cut の効果。上図は $\gamma\tau\tau$ 事象の M_{miss} vs $p_{\text{miss}}^{\text{lab}}$ 分布を示し、下図は信号事象である。二直線で囲まれた事象のみを選別する Nagoya Cut を施すと、98%の $\gamma\tau\tau$ 事象が排除でき、一方、76%の信号を残すことができる。

詳細は省く。信号領域で予想される BG 分布を図 9 に実線で示す。 $\gamma\tau\tau$ が主要な寄与であり、右側に小さなピークをつくる分布が $\kappa \times N_{\gamma\mu\mu}$ の寄与である。また、信号領域の両側 (信号の入って来ない side-bands) の実験データ分布を内挿することにより得た予想 BG 分布をヒストグラムで示す。両予想分布はよく一致している。黒丸は blind を開けた時の信号領域 ($\pm 3 \sigma_{M_{\mu\gamma}}$) の事象分布である。3 者が大変よい一致を見せる。予測される信号分布を影付きで示す。

図 10 は blind を開けた $M_{\mu\gamma}$ - ΔE 空間での事象分布である。中央の色付き分布は MC による信号事象分布を示す。 $\pm 3 \sigma_{M_{\mu\gamma}} \times \pm 3 \sigma_{\Delta E}$ の信号領域での事象数は、データは 19、予測値は 20.2 である。また、信号検出効率 (acceptance) は $\varepsilon = 9.4\%$ である。

Branching fraction

上記の最終データから maximum likelihood 法により信号事象数を求め、分岐比を導出する。Likelihood 関数は

$$\mathcal{L} = \frac{e^{-(s+b)}}{N!} \prod_{i=1}^N (sS_i + bB_i) \quad (5)$$

N は検出事象数、 s と b は信号と BG 事象数、 S_i と B_i は信号と BG の分布密度関数である。 S_i は MC により 1×10^6 事象を生成して定めた。 B_i は式 (4) により関数化したものである。 $\pm 5 \sigma_{M_{\mu\gamma}} \times \pm 5 \sigma_{\Delta E}$ 領域を最適化の対象とした。このときのデータ事象数は 54、信号検出効率は $\varepsilon = 11.2\%$ である。最適化の結果は、信号数 = 0 事象、BG 数 = 54 事象である。

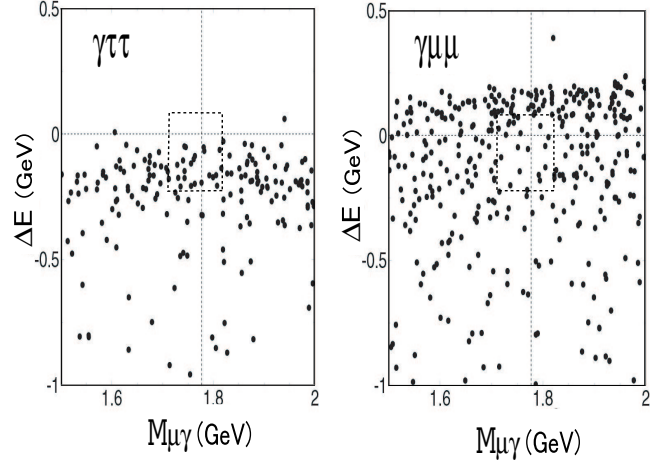


図 8: BG 分布。左図は選別後に残った MC- $\gamma\tau\tau$ 事象分布であり、右図は測定データに同一選別基準 (但し、tag-side の粒子も muon であることを要請した) を施して得た $\gamma\mu\mu$ 事象分布である。後者の中から muon 識別の不効率 ($\kappa = 0.11$) の分だけが BG として寄与することになる。図中の枠は $\pm 3 \sigma_{M_{\mu\gamma}} \times \pm 3 \sigma_{\Delta E}$ 信号領域を示す。

信号事象数の信頼度 90%における上限値 (\tilde{s}_{90}) を S_i, B_i にもとづいて疑似データを生成して求め、

$$\tilde{s}_{90} = 5.1 \text{ 事象} \quad (6)$$

を得た。分岐比 $\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$ の信頼度 90%上限値は

$$\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma) < \frac{\tilde{s}_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}} \quad (7)$$

$N_{\tau\tau}$ (τ 対生成数) = 7.85×10^7 , $\varepsilon = 11.2\%$ から、 $\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma) < 2.9 \times 10^{-7}$ を得た。

系統誤差を考慮する。式 (7) の分母に対しては、track ならびに光子再構成効率 (2.0%, 2.8%)、事象選別基準 (2.2%)、ルミノシティ (1.4%)、トリガー効率 (1.6%)、MC の統計量誤差 (0.8%) を考慮すると、総計 4.7% である。一方、分子であるが、BG 関数の不定性が $\sim \pm 0.3$ 事象の誤差を生む。また、likelihood 最適化領域を $\pm 8 \sigma$ に拡大することにより、解析領域サイズへの \tilde{s}_{90} の依存性を 0.07 事象と判断した。これらの不定性は分岐比上限値に 6.3% の不定性を生む。

その結果、 86.3 fb^{-1} のルミノシティのデータを解析することにより

$$\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma) < 3.1 \times 10^{-7} \quad \text{at } 90\% \text{ C.L.} \quad (8)$$

を得た。この実験の詳細は Phys. Rev. Lett. などにすでに発表したの、それらを参照願いたい [6]。

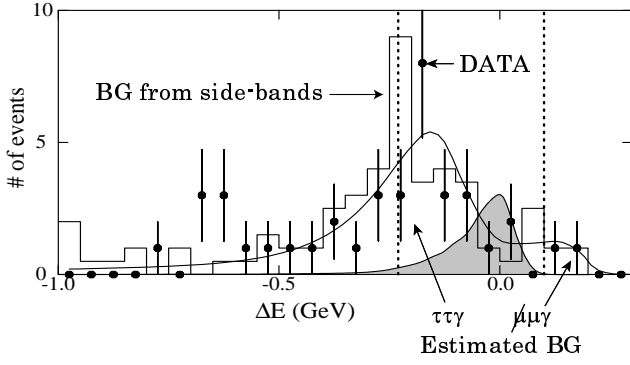


図9: 信号領域 ($1.71\text{GeV}/c^2 < M_{\mu\gamma} < 1.82\text{GeV}/c^2$) のBG ならびにデータの ΔE 分布。式 (4) にもとづく予測 BG 分布を実線で示す。 $N_{\gamma\tau\tau}$ が主要な寄与であり、 $\kappa \times N_{\gamma\mu\mu}$ は $\Delta E > 0$ に小さなピークをつくり、 $\Delta E < 0$ 領域に長く尾を引く。ヒストグラムはサイドバンド領域のデータから内挿した予測 BG 分布である。丸印はデータの分布であり、影付きは予想信号分布である。縦の点線は $\pm 3\sigma_{\Delta E}$ 領域を示す。

3.2 $\tau \rightarrow e\gamma$

これまででは、CLEO [7] が最も感度良いデータを報告している：収集データ量は 4.68fb^{-1} であり、分岐比は 90% 信頼度で $\text{Br}(\tau \rightarrow e\gamma) < 2.7 \times 10^{-6}$ である。この崩壊事象は $\tau \rightarrow \mu\gamma$ の μ を e に置き換えたものである。したがって、以下に $\tau \rightarrow e\gamma$ に関する特殊事項のみを記す。

Background

Bhabha 事象が膨大な BG を構成する。よって、トリガー段階において厳しい要請を課しており、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ と比較して信号検出効率がこの段階で 15% 程度大きく低下する。

主要 BG は、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 同様、 $\gamma\tau\tau$ と γee である。しかし、electron の検出効率ならびに識別能力は、muon のそれらよりも遥かに高く、electron を not-electron (\not{e}) として判別する確率は低い。よって、ハドロニックな BG や Bhabha の寄与はずいぶん除外できる。Electron の識別は、CsI calorimeter による測定エネルギー量 (E_e) と tracking chamber による測定運動量 (p_e) の比、CsI でのエネルギー分布の広がり、tracking chamber による dE/dX 値、TOF counter による飛行時間、および Aerogel Cherenkov counter からのパルス高にもとづく。表 2 の事象選別レベル 2 では

$$P_e > 0.9; \quad P_{\not{e}} < 0.1 \quad (9)$$

と設定した。検出効率は $p_e > 0.1\text{GeV}/c$ でほぼ 95%、 γee を間違えて $\gamma e\not{e}$ と検出する確率は $\kappa = 5\%$ である。また、uds continuum の寄与は無視できる ($\Lambda = 0$)

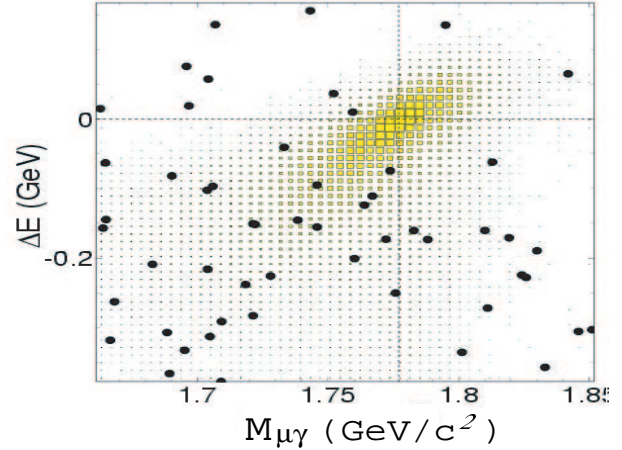


図10: データならびに信号 MC の $M_{\mu\gamma}$ vs ΔE 分布。丸印がデータ、四角が信号 MC である。

しかし、electron の識別不効率が低くとも、Bhabha 生成率は muon-pair と比べて著しく高いため、さらに特別な工夫が必要である。そこで、レベル 3 の粒子相関 (\not{e} 粒子と欠損粒子の角度) に上限値を新たに導入し、

$$0.4 < \cos \theta_{\text{tag-miss}}^{\text{CM}} < 0.99 \quad (10)$$

とした。これは multiple radiation Bhabha の $\gamma e\not{e}$ の \not{e} 粒

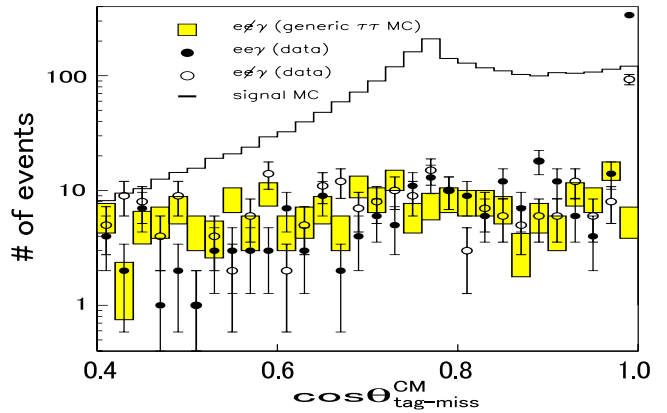


図 11: $\cos \theta_{\text{tag-miss}}^{\text{CM}}$ 分布。信号ならびに $\gamma\tau\tau$ 事象は $\cos \theta_{\text{tag-miss}}^{\text{CM}} \simeq 1$ に集中しないが、Bhabha 事象は集中する。

子 (実際は e である) は前方 ($\cos \theta_{\text{tag}} \simeq 1$) に放出され、それは図 11 に見えるようにビームパイプへの欠損粒子と小さな角度 ($\cos \theta_{\text{tag-miss}}^{\text{CM}} \simeq 1$) しか構成しない特性を利用したものである。

ここでも “Nagoya Cut” が有効性を発揮し、信号事象の 69% を保持しながら、 $\gamma\tau\tau$ は 98%、 γee は 97% を排除した。

Branching fraction

この結果、 $1.5\text{GeV}/c^2 < M_{e\gamma} < 2.0\text{GeV}/c^2$; -0.5GeV

$< \Delta E < 0.5$ GeV の広い領域に最終的に残った事象数は、データが 60 事象、一方、 $N_{\gamma\tau\tau} = 61.1$, $N_{\gamma\mu e} = 3.0$ であり、総計 64.1 ± 5.5 事象である。これは $\tau \rightarrow \mu\gamma$ のほぼ 40% である。図 12 に blind を開けた最終データ分布を示す。

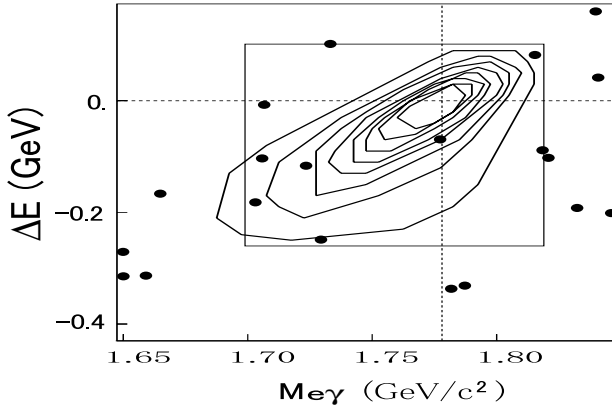


図 12: $\tau \rightarrow e\gamma$ の残留事象分布。領域は $M_{e\gamma}$, ΔE ともに $\pm 5\sigma$ に相当する。また、図中のボックスは $\pm 3\sigma$ に相当する。多重の楕円は信号事象分布の等高線を示し、その信号包括率は内側から 10% ステップに 20%, 30%, ... 80%, 90% である。

Maximum likelihood 法による最適化, ならびに系統誤差の評価は $\tau \rightarrow \mu\gamma$ と同様に行った。最適化領域は $\pm 5\sigma$ に相当する $1.65 \text{ GeV}/c^2 < M_{\gamma e} < 1.86 \text{ GeV}/c^2$, $-0.43 \text{ GeV} < \Delta E < 0.17 \text{ GeV}$ である。90% 信頼度による信号事象数上限値は

$$\hat{s}_{90} = 3.8 \text{ 事象} \quad (11)$$

である。信号検出効率 (acceptance) は $\varepsilon = 6.8\%$, τ 対生成数は $N_{\tau\tau} = 7.9 \times 10^7$ (86.7 fb^{-1}) であり、式 (7) から $\text{Br}(\tau \rightarrow e\gamma) < 3.6 \times 10^{-7}$ を得た。系統的誤差はこの分岐比に 5.5% の不定性を増加する。その結果、最終分岐比は

$$\text{Br}(\tau \rightarrow e\gamma) < 3.8 \times 10^{-7} \quad \text{at } 90\% \text{ C.L.} \quad (12)$$

を得た。上記上限値は preliminary な結果であり、現在投稿論文を作成中である。

3.3 まとめ

New Physics への制限

式 (2) に $\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$ の結果を適用しよう。図 13 に SUSY 質量 (M_{SUSY}) と真空期待値の比 ($\tan\beta$) の相関空間への排除領域を示す。式 (2) は SUSY パラメーターに標準的と考えられる数値を適用したものである。小さい SUSY 質量の小さい $\tan\beta$ の広い領域が排除される。

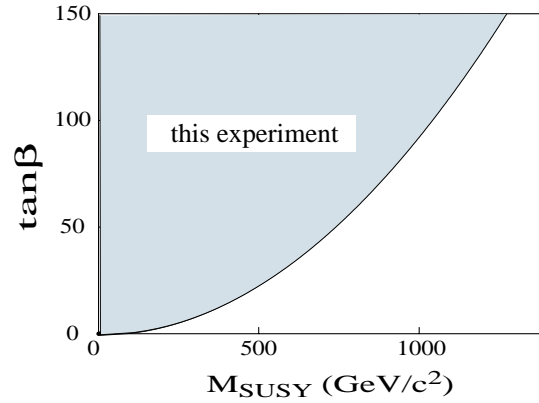


図 13: SUSY への制限。今回の実験結果 $\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma) < 3.1 \times 10^{-7}$ が排除する $M_{\text{SUSY}} - \tan\beta$ 領域 (影部分)。

Nagoya analysis

CLEO 実験と Belle 実験の感度の比較を試みよう (表 3)。Belle は CLEO に比べ 6.3 倍高いデータ統計量を得た。(2004 年夏の現時点では、ほぼ 250 fb^{-1} のデータを保有する)。一方、信号検出率は 1.15 倍低い。つまり、CLEO よりも 5.5 倍統計的に勝っている。しかし、CLEO 値をそのまま 5.5 倍すると 33 事象が最終的に信号領域に残ることになるが、実際は 19 事象数でありルミノシティあたりの BG 事象数は CLEO の半分である。この主要要因は、従来以上の BG の詳細なスタディによるその起源 ($\gamma\tau\tau$ と $\gamma\mu\mu$) の理解と、新たに開発した Nagoya Cut の導入である。この結果、ルミノシティの増加以上の感度達成が実現したわけである。

表 3: Belle と CLEO の $\tau \rightarrow \mu\gamma$ 比較

	Belle	CLEO
Luminosity \mathcal{L}	86.3 fb^{-1}	13.8 fb^{-1}
acceptance	11.0%	12.7 %
BG	19 ev	6 ev
in signal-box		
BG/ \mathcal{L}	0.22 fb	0.43 fb
$\text{Br}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	3.8×10^{-7}	1.1×10^{-6}

これと同じことが $\tau \rightarrow e\gamma$ にもいえる。

Belle ではこれからさらに積分ルミノシティが増える。この増加分だけ New Physics の探索感度を向上させるのではなく、それ以上の感度で探索を可能とするためには、さらに実験工夫が要求されるわけだ。苦しいが、楽しめる作業ではある。いくつかの方策が考えられているが、それら

に付いての議論はまたの機会に譲ろう。

まとめ

Beyond Physics の代表である $\tau \rightarrow \mu\gamma$ ならびに $\tau \rightarrow e\gamma$ の探索感度がはじめて $\mathcal{O}(10^{-7})$ に突入した。これは SUSY などの理論予測を検証し得る感度をもつに至ったことを意味する。New Physics を見つけ得る世界に入りはじめたわけだ。

今回の報告は $\tau \rightarrow \mu\gamma$, $\tau \rightarrow e\gamma$ に的を絞ったが、Belle グループではこの他に多くの Lepton Flavor Violation 反応の探索を同時に展開している。また、レプトンの CP/T violation 反応などの検出を通じて New Physics を追求している。

Belle が有する高質の世界最大のタウ対データ量は、われわれに最高の playground を提供している。これからしばらくは、これを上回るタウ・データは存在しないであろう。よって、世界のタウ研究は Belle が担うこととなるであろう。

この原稿を書いている隣では 250 fb^{-1} のデータの解析が進んでいる。早晩、新しいデータが発表されるであろう。お楽しみに。

参考文献

- [1] J. H. Kuhn, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 76: 21-42, 1999.
- [2] 例えば、J. Hisano, T. Moroi, K. Tobe and M. Yamauchi, Phys. Rev. **D 53** (1996) 2442.
- [3] A. Dedes, J. R. Ellis and M. Raidal, Phys. Lett., **B549** (2002) 159.
- [4] J. Ellis, J. Hisano, M. Raidal and Y. Shimizu, Phys. Rev. **D 66** (2002) 115013; J. Hisano, "Lepton-Flavor Violation in Tau Lepton Decay", 3rd Workshop on Higher Luminosity B Factory, 湘南ビレッジ, 5-7 Aug. 2002.
- [5] 高エネルギーニュースの以下を参照のこと。
 - 加速器関係:
 - 「KEKB-IR 超電導マグネットシステム」土屋清澄、大内徳人、荻津透、**17** (1998) 18;
 - 「建設進む KEKB 加速器と AR 放射光運転」吉岡正和、**17** (1998) 23;
 - KEBB 特集 – **17** (1999);
 - 「コミッショニング」小川雄二郎 146;
 - 「KEKB ビームモニタ/ビームフィードバック」平松成範 154;
 - 「主リング電磁石」KEKB 電磁石グループ 163;
 - 「衝突点近傍」金澤健一、菅原龍平、多和田正文、土屋清澄 177;
 - 「KEKB の放射線安全」竹内康紀 185;
 - 「KEKB 施設」吉岡正和 188;
 - 「BELLE 検出器建設・そのトラブルの記録」幅淳二 193;
 - 「The BEAST Background Commissioning Experiment」Tom Browder 196;
 - 「ビーム輸送システム」菊池光男 + KEBB/BT グループ 206;
 - 「KEKB 真空システム」金澤健一、加藤茂樹、末次祐介、

久松広美、嶋本真幸、佐藤政行、白井満 220;

「KEKB の高周波加速システム」赤井和憲、赤坂展昌、諫川秀、絵面栄二、海老原清一、小野正明、影山達也、坂井浩、宍戸寿郎、新竹積、末武聖明、竹内保直、内藤孝、内藤富士雄、中西弘、水野元、山崎良成、吉本伸一 230;

「B ファクトリー用超伝導加速空洞」光延信二、古屋貴章、田島健 251;

「KEKB 超伝導 Crab 空洞の開発」細山謙二 254;

「KEKB 超伝導空洞ヘリウム冷凍装置」細山謙二 257;

「KEKB 加速器制御システム」加藤直彦 259;

「Belle 検出器の宇宙線テスト」伊藤領介 267;

「KEKB 電子・陽電子入射器、陽電子入射時間短縮のための 2 バンチ入射試験の開始」榎本収志 **19** (2001) 176;

「KEKB 用可動マスク」末次祐介、影山達也、竹内保直、金澤健一、佐藤康太郎、佐渡俊哉、平山英夫 **20** (2001) 107;

• 測定器関係:

「BELLE-CDC ワイヤ張り」宇野彰二、**16** (1997) 57;

「Belle TOF カウンター」吉見弘道、**16** (1997) 159;

「Belle シリカエアロゲル・チェレンコフカウンター」住吉孝行、**16** (1998) 201;

「Belle 電磁カロリメータ」玉井邦雄、**16** (1998) 213;

「Belle KLM 検出器」成田晋也、**16** (1998) 232;

「超前方カロリメーター EFC」上野耕資、**17** (1998) 7;

「Belle 検出器用超伝導ソレノイド」榎田康博、堺井義秀、**17** (1998) 64;

「Belle 検出器用ゼロ度ルミノシティモニタ」上原貞治、**17** (1998) 84;

「Belle ロールイン」幅淳二、**18** (1999) 37;

「レジスティブプレートチェンバー (RPC) の原理と現状」寺本吉輝、**22** (2004) 119;

• 物理成果:

「Belle 実験の最初の結果」山内正則 **19** (2000) 103;

「中性 B 中間子崩壊における CP 非保存の観測」野崎忠男 **20** (2001) 62;

「Belle 実験での $b \rightarrow s\bar{q}q$ 崩壊モードの CP 非保存の最近の結果」堺井義秀 **22** (2003) 99.

- [6] K. Abe et. al. (Belle Collaboration), Phys. Rev. Lett. **92** (2004) 171802. ; T. Ohshima (Belle Collaboration) presented at EPS2003, Aachen, 2003. July 17-23. The contribution paper is EPS-ID:558, LP03-ID:272, BELLE-CONF-0329.

- [7] CLEO collaboration, K. W. Edwards et. al., Phys. Rev. **D55** (1997) R3919.