

第3回 タウ・レプトン物理研究センター 研究成果報告会

Belle 実験における $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程の精密測定



2009.1.15

N研 修士2年 臼杵 容子

1. introduction

2. Belle実験 (KEKB加速器、Belle測定器)

3. $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程の精密測定

1. introduction

2. Belle実験 (KEKB加速器、Belle測定器)

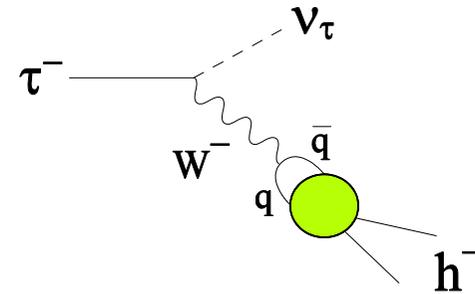
3. $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程の精密測定

introduction

低エネルギー領域でのハドロン現象を見るために、タウレプトンのハドロン崩壊に着目

タウレプトン

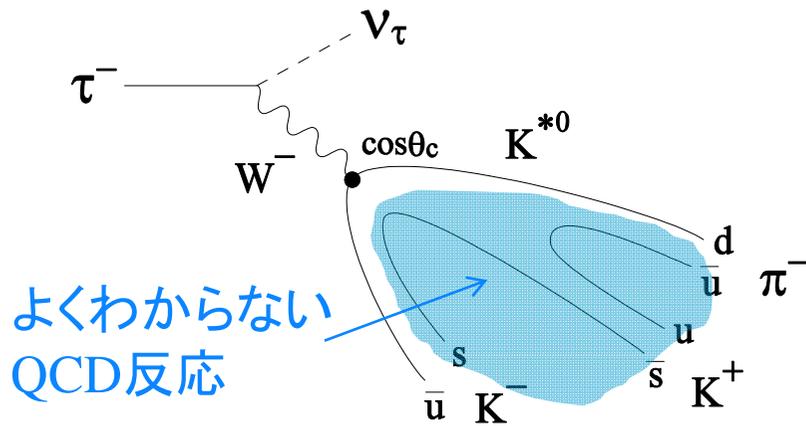
- レプトンで唯一ハドロンに崩壊可能
- 弱い相互作用のみを介して崩壊する
 - 中間子のハドロン崩壊と比べ、きれいな環境でハドロン現象を測定可能



Belle実験で収集された世界最高統計量 5×10^8 対のタウレプトン実験データを利用し、 $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程の精密測定を行った。

$\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊分岐比と、 $K^*(892)^0$ 中間子の質量と崩壊幅の測定について報告

$\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊の物理

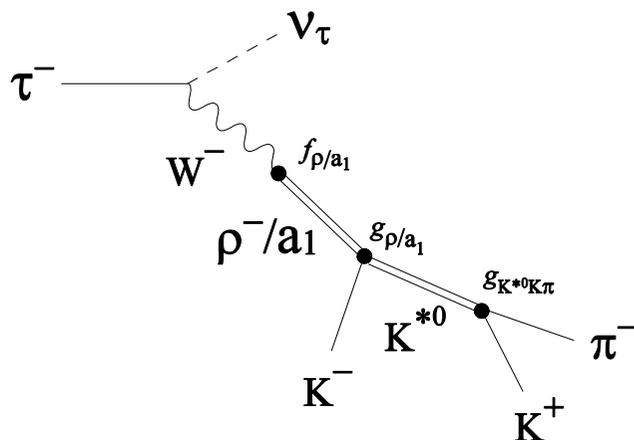


本研究で測定する崩壊分岐比

$$B = \frac{N_{data}}{2 \times N_{\tau\tau} \times \epsilon_{sig}}$$

N_{data} : 実験データから得られる信号数
 $N_{\tau\tau}$: 解析に用いた τ 対の数
 ϵ_{sig} : 信号検出効率

$\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程のQCD反応を、ベクトルカレントと軸ベクトルカレント、バーテックスを用いて書きなおす。これらは中間子の実効的カイラル理論によって決まる。 Phys. Rev. D 55,3 B.A.Li



比較

理論から予想される崩壊分岐比

$$B(\tau \rightarrow K^{*0} K \nu) = 0.392\%$$

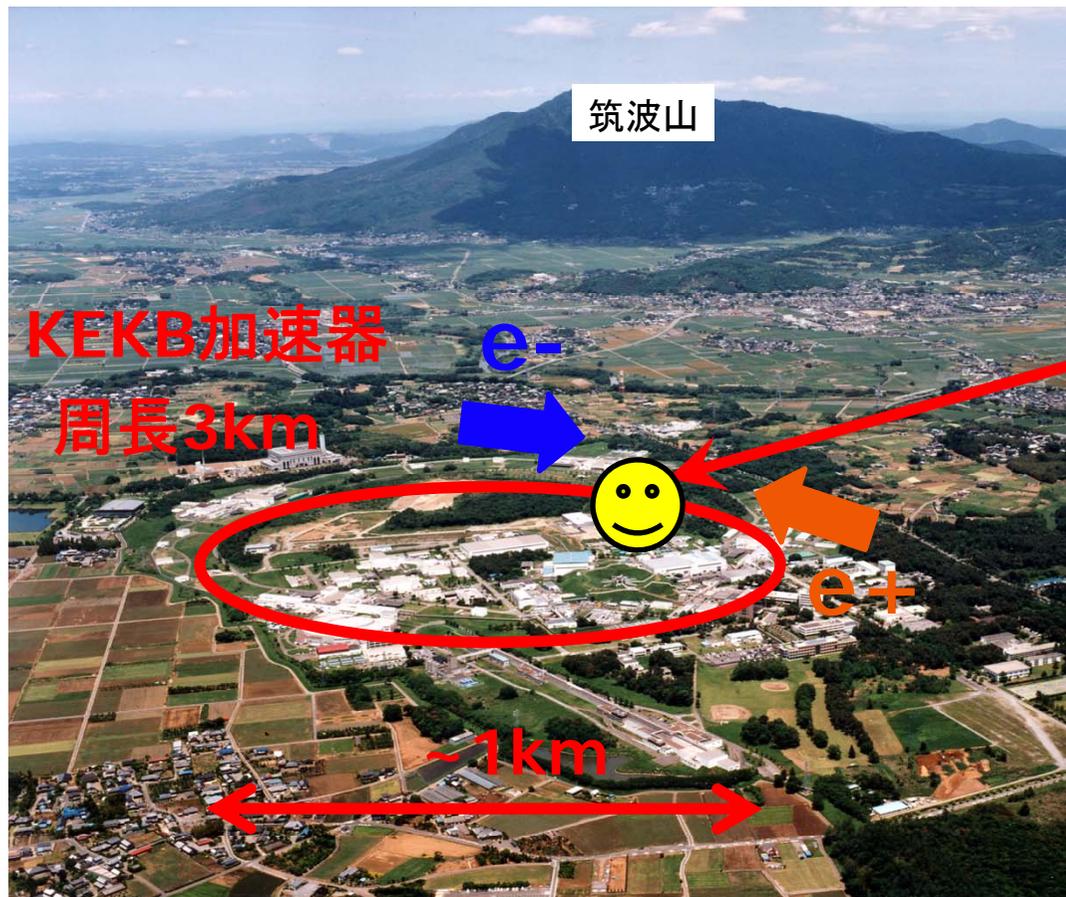
1. introduction

2. Belle実験 (KEKB加速器、Belle測定器)

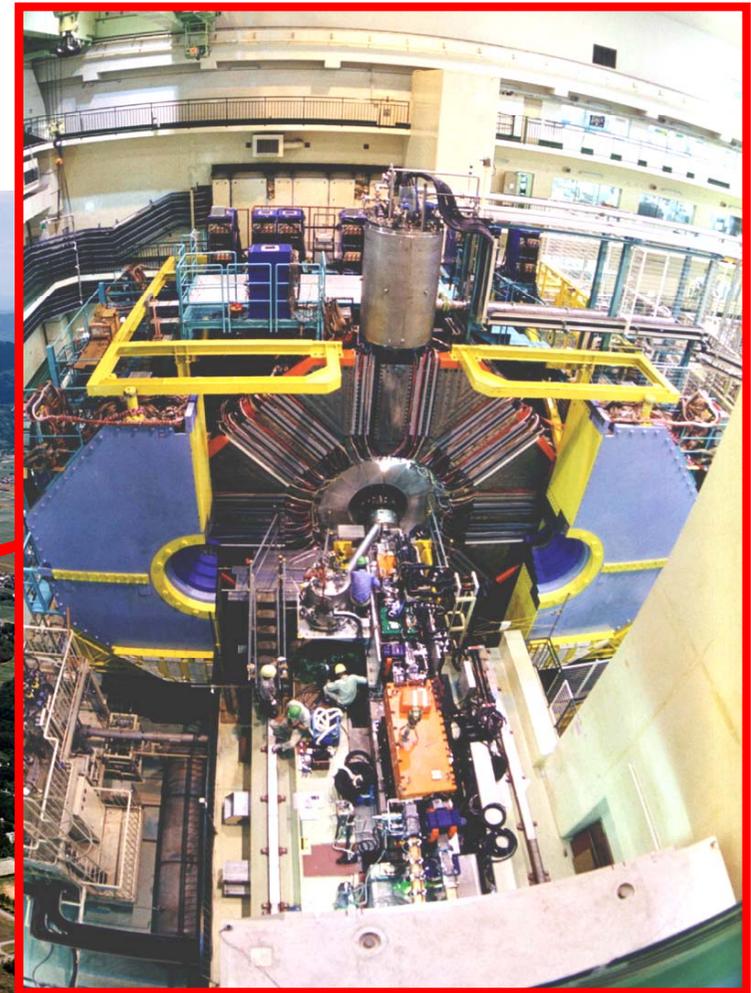
3. $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程の精密測定

Belle実験 (e^+e^- collider)

- 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)@茨城県つくば市



Belle 検出器



$8 \times 8 \times 8\text{m}$

KEKB加速器

■ 非対称エネルギー e^+e^- コライダー

- e^+ :3.5GeV, e^- :8GeV
- CM系energy:10.58GeV
(Upsilon(4S)の質量=10.58GeV)
- Upsilon(4S) resonance
(Upsilon(4S) \rightarrow B \bar{B} \sim 100%)

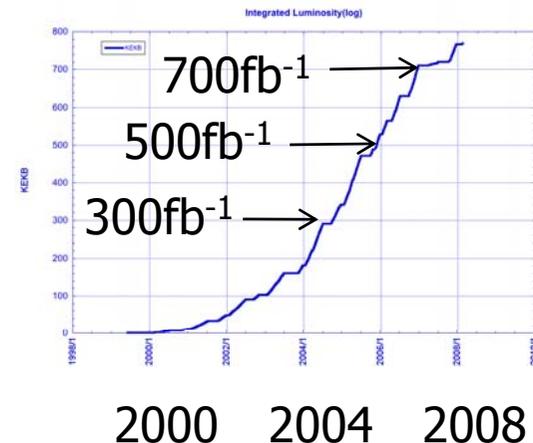
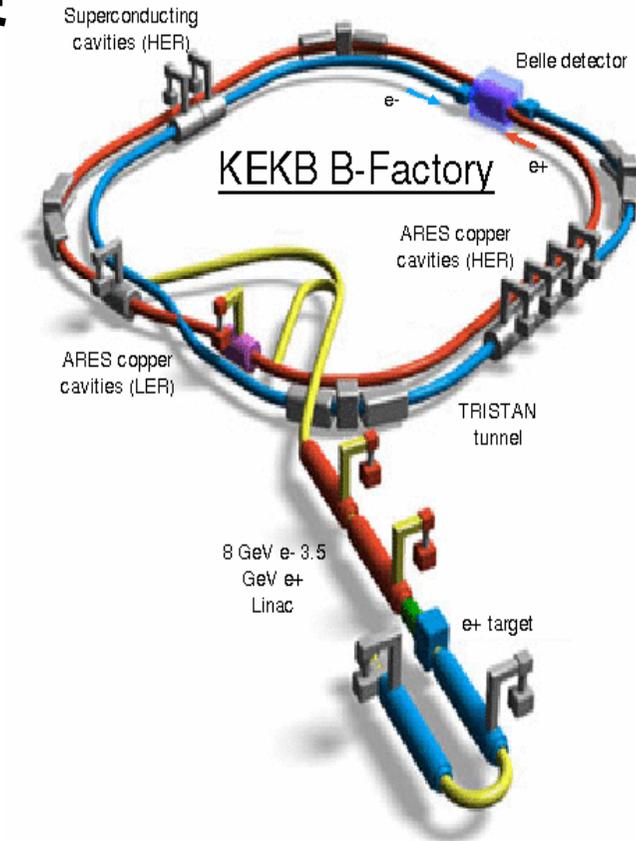
■ Bファクトリー ($\sigma_{B\bar{B}}\sim 1.1\text{nb}$)

- 現在までに $\sim 10^9$ 個のB対事象を生成

■ τ ファクトリー ($\sigma_{\tau\tau}\sim 0.9\text{nb}$)

- 現在までに $\sim 10^9$ 個の τ 対事象を生成

世界最高統計量の
タウレプトン対実験データ



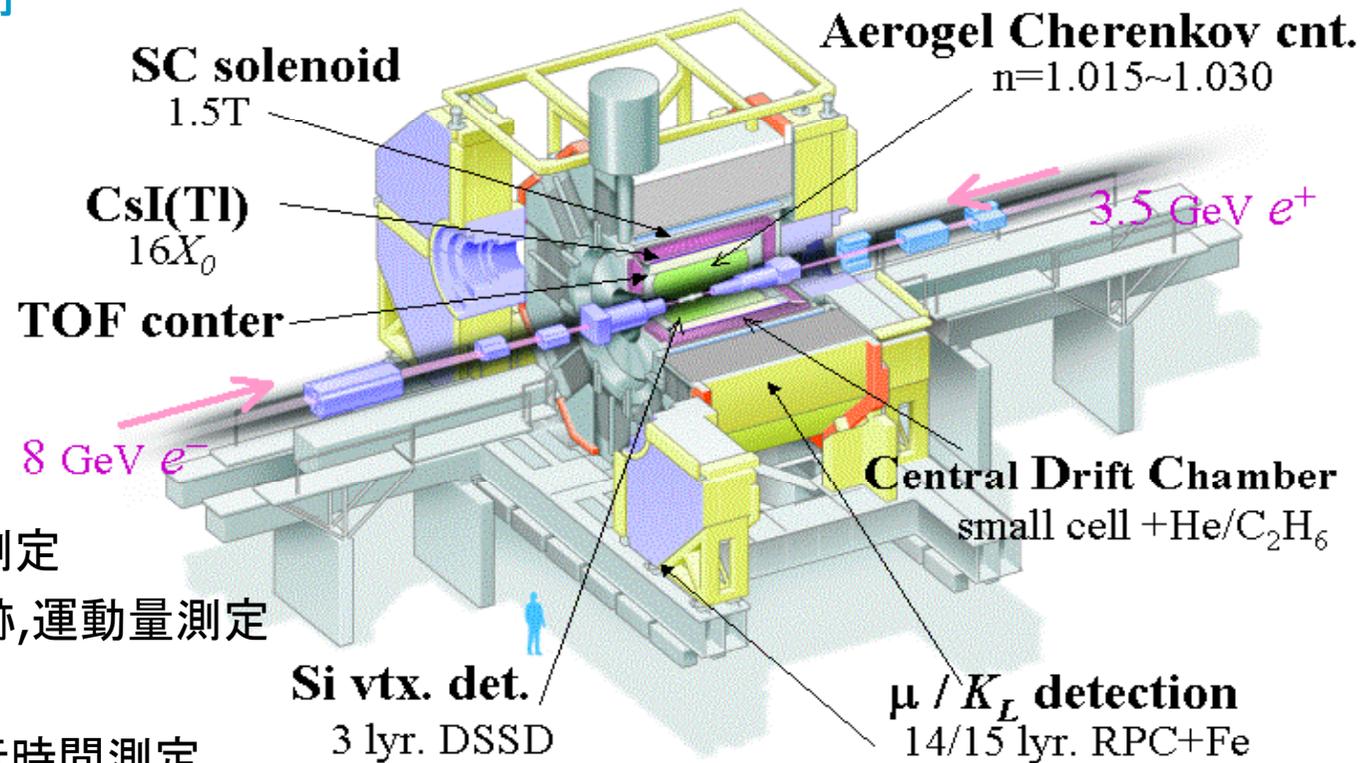
Belle検出器

生成された粒子の崩壊点や種類を区別する能力をもつ大型汎用検出器

Belle検出器で検出可能な粒子

γ , e , μ , π , K , K_L , 陽子

Belle Detector



SVD : 粒子崩壊点の測定

CDC : 荷電粒子の飛跡, 運動量測定

ACC : K/π 識別

TOF : 荷電粒子の飛行時間測定

ECL : 電子や光子のエネルギー測定

KLM : K_L, μ 粒子検出

ハドロン(K, π)識別を行う検出器

Belle検出器

Kaon ID eff. : ~90%
Pion fake rate : ~6%
 Lepton ID eff. : ~90%
 μ fake rate : ~2%
 e fake rate : ~0.3%

① π で光ってKで光らない

Aerogel Cherenkov cnt.

$n=1.015\sim 1.030$

3.5 GeV e^+

$16X_0$

TOF conter

到達時間と到達距離

⇒ 速度

8 GeV e^-

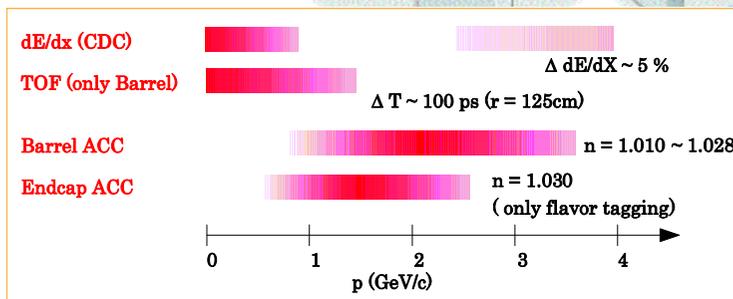
Central Drift Chamber

small cell + He/ C_2H_6

運動量と③ エネルギー損失量(dE/dx)

② 質量

μ / K_L detection
14/15 lyr. RPC+Fe



1. introduction

2. Belle実験 (KEKB加速器、Belle測定器)

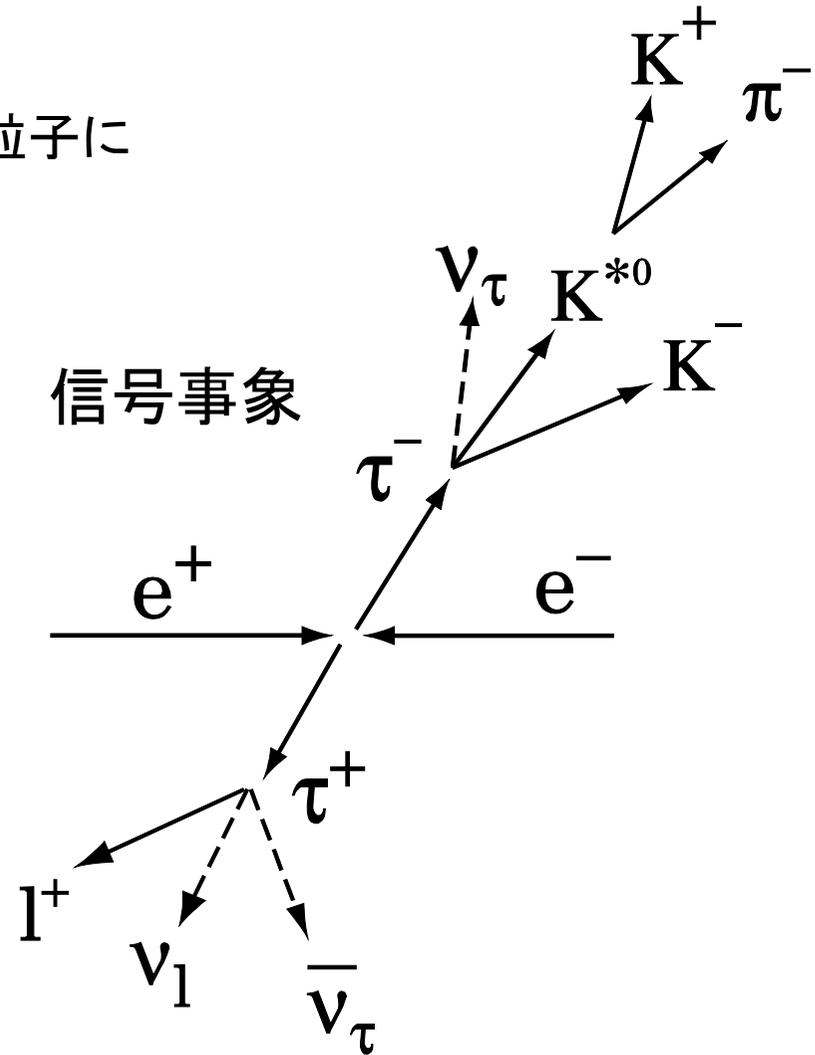
3. $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊過程の精密測定

$\tau^- \rightarrow K^{*0} K^- \nu$ 信号事象

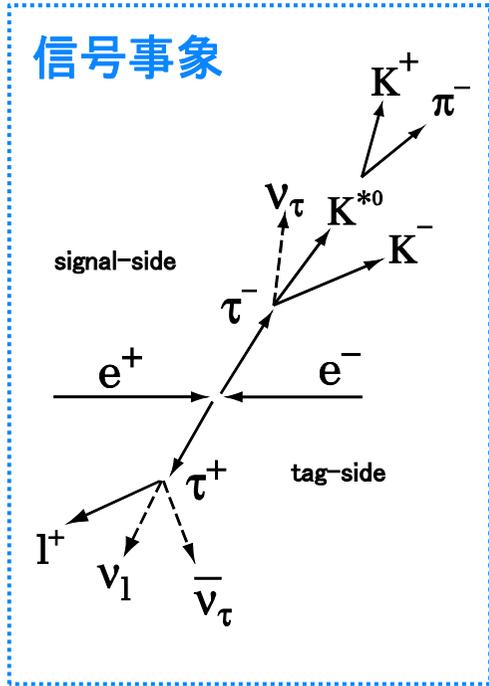
- $\tau^+ \rightarrow \overline{K}^{*0} K^+ \bar{\nu}_\tau$ も信号事象として扱う
- 信号事象として τ 崩壊の終状態の荷電粒子に $KK\pi\nu$ を要求
- 荷電Kと π 粒子から K^{*0} 粒子を再構成

< K^{*0} の崩壊 >	
$K\pi$	~100%
$K^+\pi^-$	2/3
$K^0\pi^0$	1/3

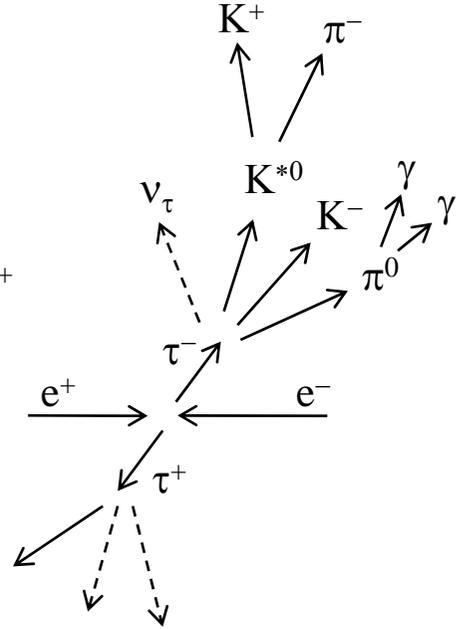
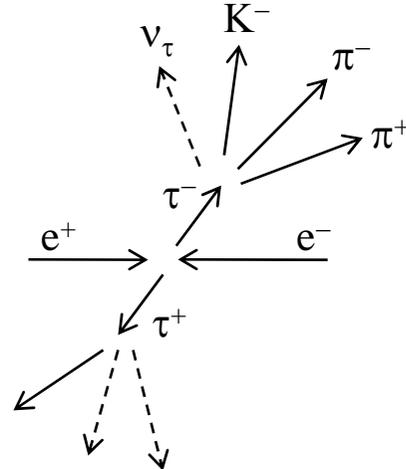
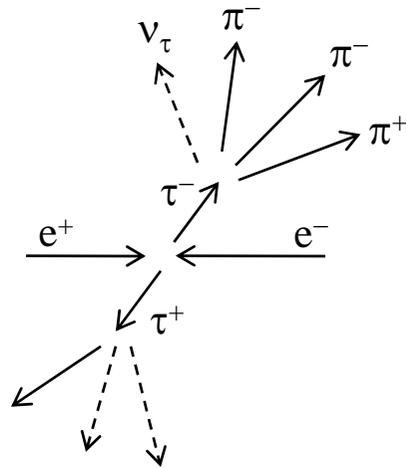
解析に用いた実験データ量
 世界最高統計量
 5×10^8 τ 対事象 (545fb⁻¹)



背景事象の候補

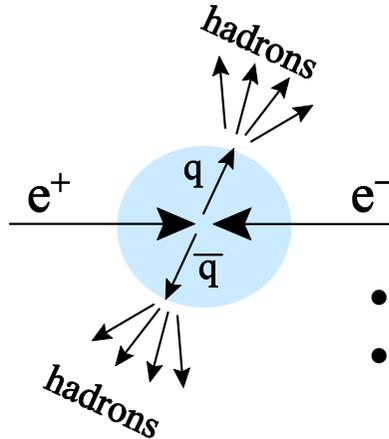


$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$$



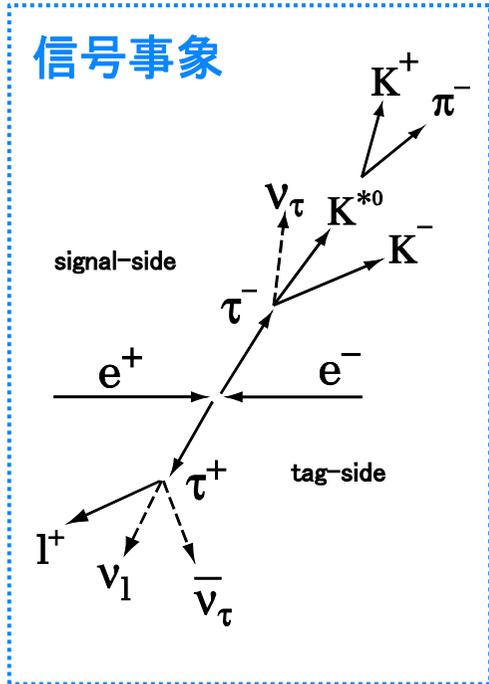
$$e^+e^- \rightarrow qq \quad (q=u,d,s,c)$$

- 粒子識別を間違える($\pi \rightarrow K$)
- 光子を検出できない

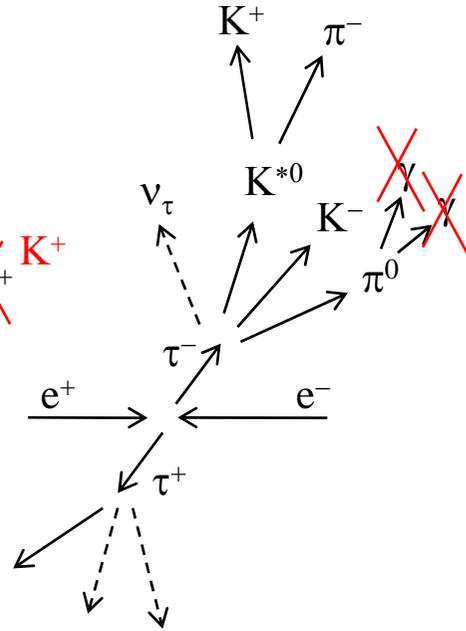
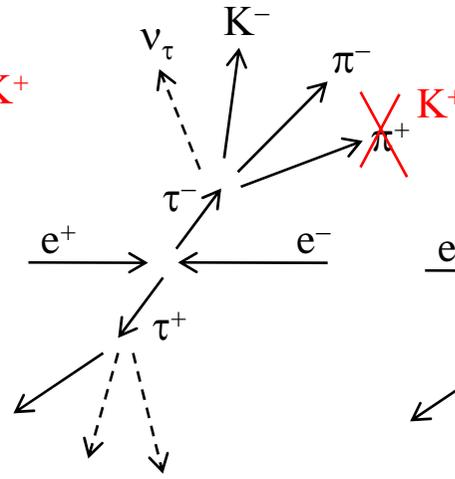
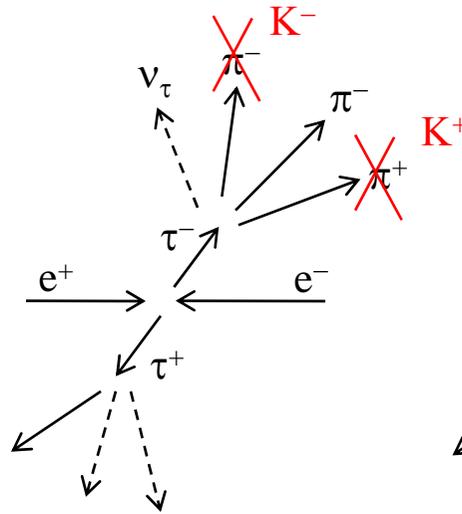


- K^{*0} 粒子もできる
- 荷電粒子数や光子数が多いのが特徴

背景事象の候補

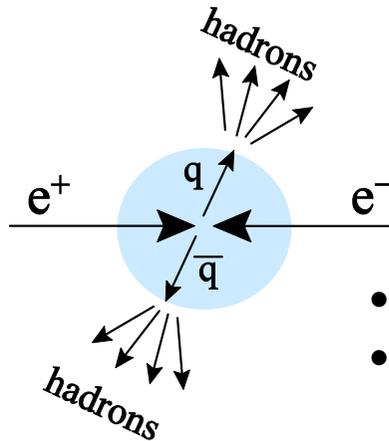


$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$



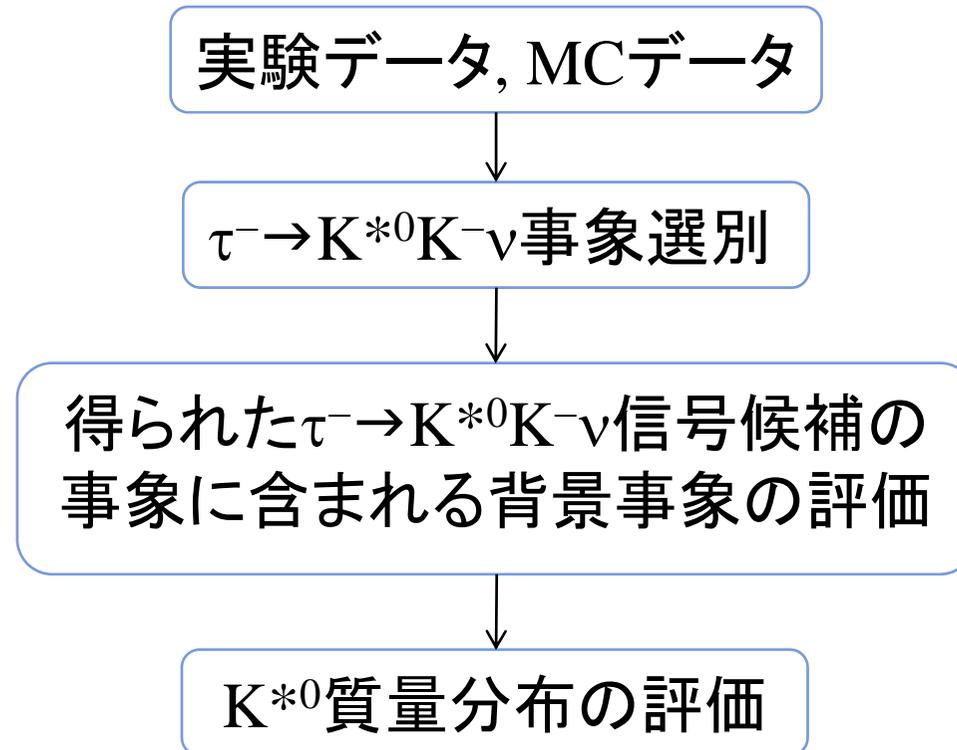
$e^+e^- \rightarrow qq \ (q=u,d,s,c)$

- 粒子識別を間違える($\pi \rightarrow K$)
- 光子を検出できない



- K^{*0} 粒子もできる
- 荷電粒子数や光子数が多いのが特徴

解析の手順



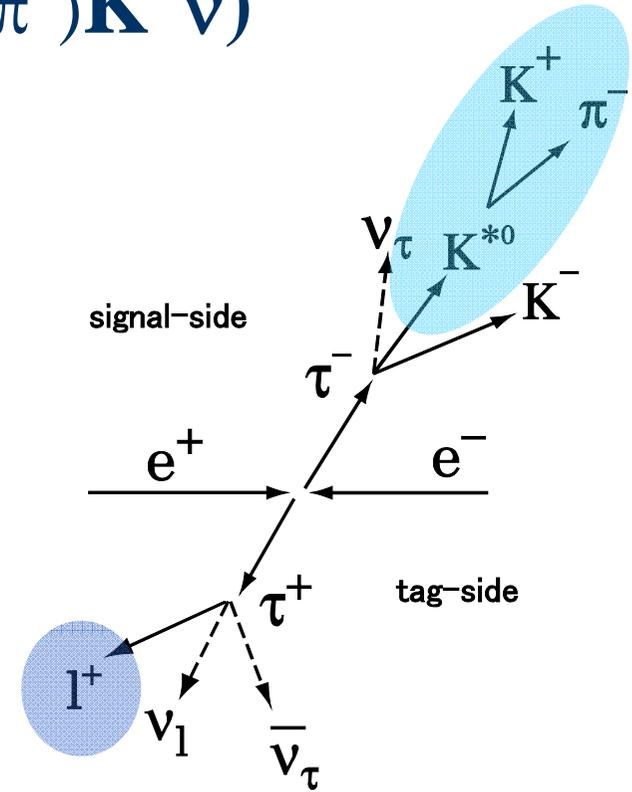
$B(\tau^- \rightarrow K^{*0} K^- \nu)$, K^{*0} の質量・崩壊幅の測定

MCデータ; モンテカルロシミュレーションを用いて生成されたデータで、信号事象や背景事象の振る舞い、検出効率を理解し評価するために用いる。15

事象選別 ($\tau^- \rightarrow K^{*0}(\rightarrow K^+\pi^-)K^-\nu$)

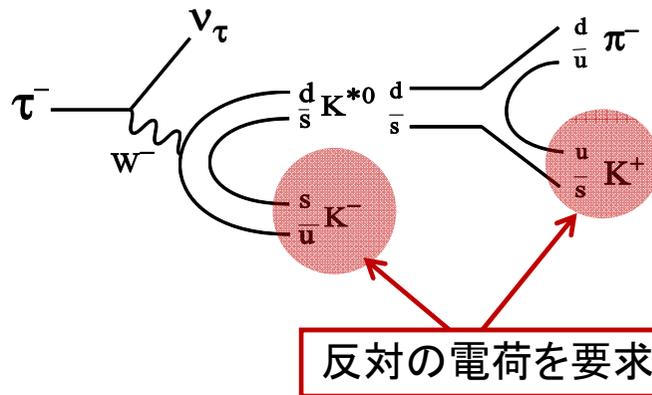
信号事象選別を行い、背景事象候補を抑制する。

- 1本と3本の荷電粒子を含む事象 (スラスト軸で分割)
(荷電粒子3本=信号側、荷電粒子1本=タグ側)
- 信号事象として終状態の荷電粒子に $\tau \rightarrow KK\pi\nu$ を要求
- 荷電Kと π 粒子から K^{*0} 粒子を再構成
- 正しい電荷を要求 (ストレンジネス保存)
- タグ側はレプトン崩壊に限る ($\tau \rightarrow e\nu/\mu\nu$) (35%)
($q\bar{q}$ 事象を抑制: $q\bar{q}$ 事象はたくさんの K^{*0} 粒子を含む)
- タウ対事象
 - 信号側、タグ側の質量がタウ粒子の質量以下
 - 欠損運動量がある

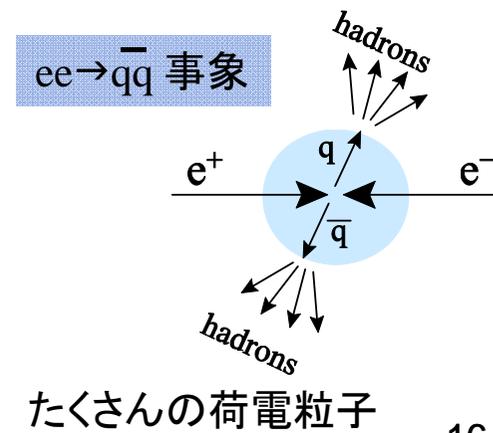


信号事象は $K\pi$ 不変質量分布から評価する

$\langle K^{*0}$ の崩壊	
$K\pi$	$\sim 100\%$
$K^+\pi^-$	2/3
$K^0\pi^0$	1/3



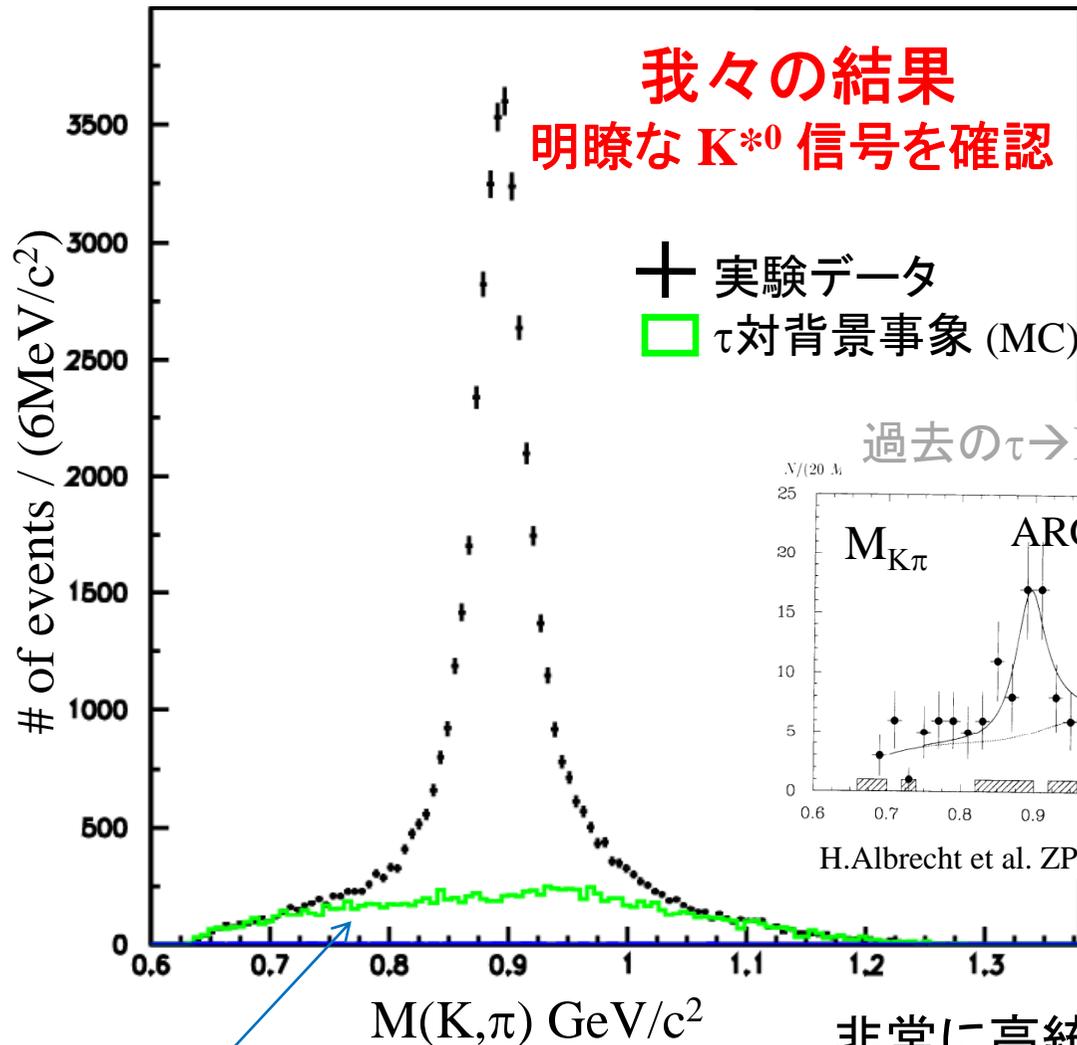
反対の電荷を要求



たくさんの荷電粒子

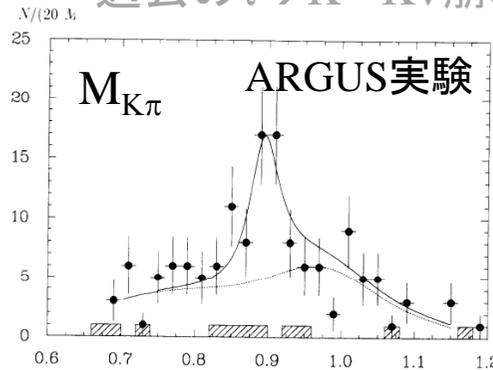
$$V_{thrust} = \sum_{n=1}^{n_{trk}} \frac{|\mathbf{v}_{thr} \cdot \mathbf{p}_{trk}^{CM}|}{|\mathbf{p}_{trk}^{CM}|} + \sum_{n=1}^{n_{\gamma}} \frac{|\mathbf{v}_{thr} \cdot \mathbf{p}_{\gamma}^{CM}|}{|\mathbf{p}_{\gamma}^{CM}|}$$

全事象選別後の $M_{K\pi}$ 分布

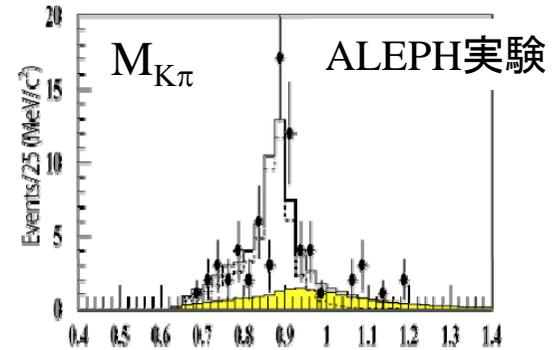


- 残った実験データ数
 $N_{\text{data}} = 5.10 \times 10^4$
- 信号検出効率
 $\text{eff}_{\text{sig}} = (2.15 \pm 0.01)\%$

過去の $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊研究結果



H. Albrecht et al. ZP C68 215



R. Barate et al. EPJ C1 65

$ee \rightarrow qq$ (無視できるほど小さい)

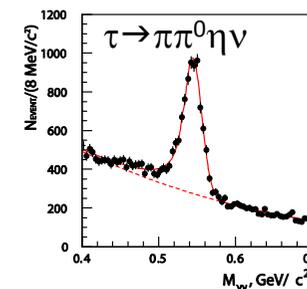
非常に高統計であるため、系統誤差が最終結果に影響を及ぼす

➡ 背景事象の評価が重要

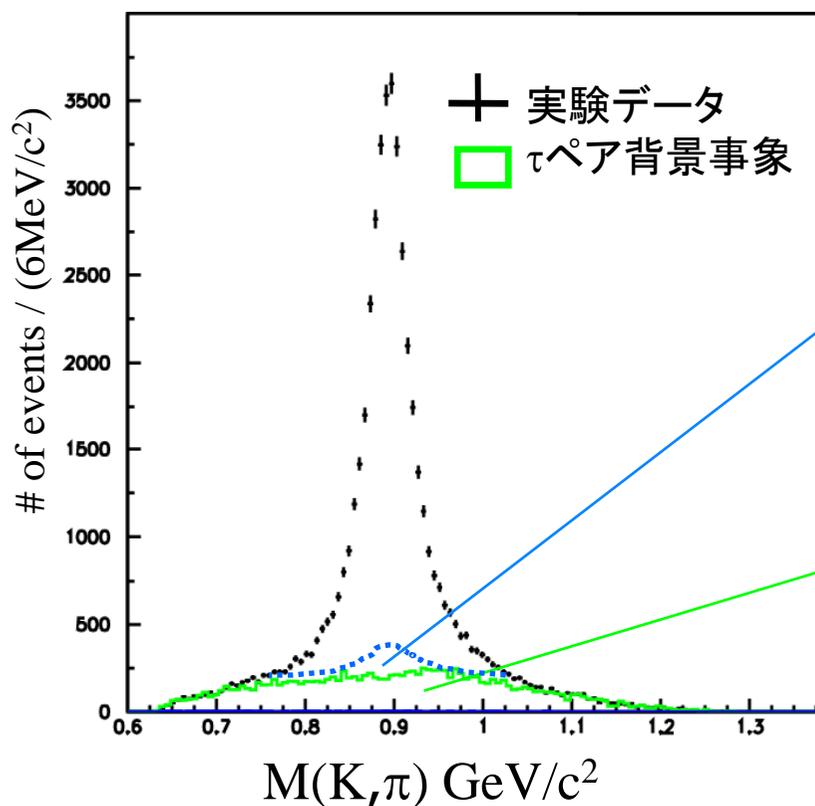
背景事象の評価

背景事象の評価方針

K^{*0} 事象は広がって分布しているため、サイドバンドから背景事象の形を決めるのは困難。そこで背景事象の成分ごとに、その寄与と形を評価する。その際、実験データを用いて評価し、系統誤差を抑える。



サイドバンドから背景事象の形を決めている例



K^{*0} 共鳴を形成する背景事象

① $\tau \rightarrow K^{*0} K \pi^0 \nu$

K^{*0} 共鳴を形成しない事象

② π を K と誤識別 (80%)

- $\tau \rightarrow \pi \pi \pi n \pi^0 \nu$ ($n = 0, 1, \dots$)

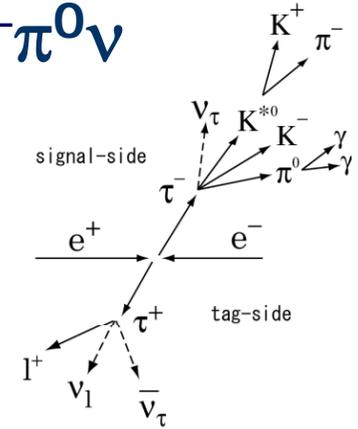
- $\tau \rightarrow K \pi \pi n \pi^0 \nu$

③ non-resonant (NR) $\tau \rightarrow K K \pi \nu$

non-resonant $\tau \rightarrow K K \pi \nu$; K^{*0} 共鳴を経ずに直接 $K K \pi$ に崩壊するもの

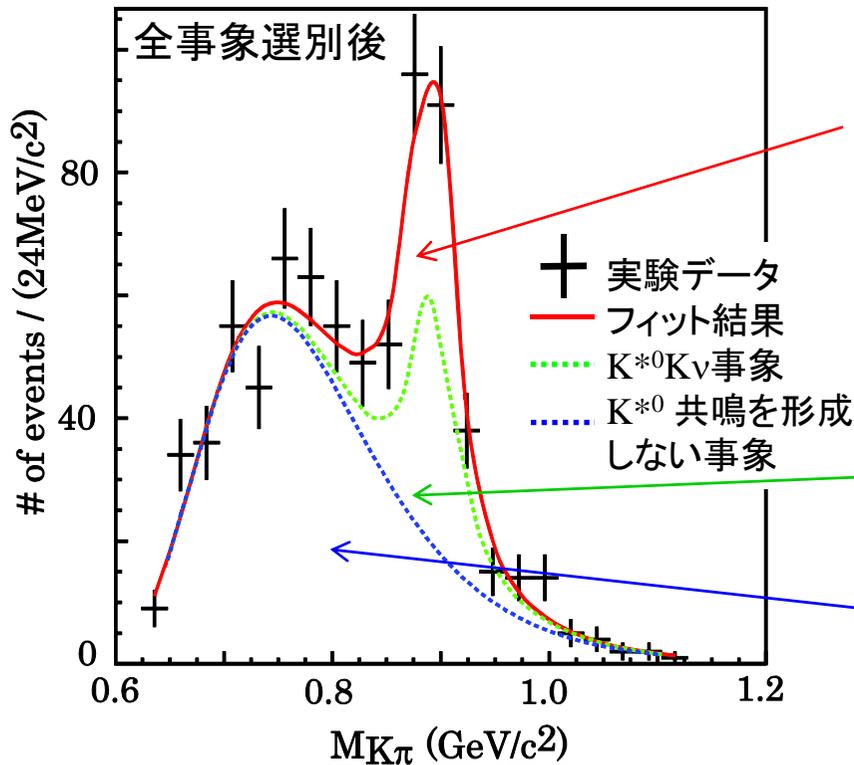
① K^{*0} 共鳴を形成する背景事象： $\tau^- \rightarrow K^{*0}(\rightarrow K^+\pi^-)K^-\pi^0\nu$

$\tau \rightarrow K^{*0}K\pi^0\nu$ 崩壊分岐比は現在まで測定されていない
 \Rightarrow 崩壊分岐比を測定し、 $\tau \rightarrow K^{*0}K\nu$ 信号事象への寄与を評価



事象選別条件は $\tau \rightarrow K^{*0}K\nu$ 事象のものと同様

- さらに加えた条件: 信号側の光子数 $N_\gamma=2$, $0.1178 < M_{\gamma\gamma} < 0.1502 \text{ GeV}/c^2$



フィット関数: $\text{BW}(K^{*0}K\pi^0\nu + K^{*0}K\nu) + \text{Landau}$

- $K^{*0}K\pi^0\nu$ 事象数 Belle preliminary

$$N_{K^{*0}K\pi^0\nu} = 129 \pm 25, \text{ eff}_{\text{sig}} = 0.54\%$$

$$\text{BR}(\tau \rightarrow K^{*0}K\pi^0\nu) = (2.39 \pm 0.46) \times 10^{-5} \text{ (stat.)}$$

➤ 世界で初めて測定

- $K^{*0}K\nu$ 事象の寄与: $K^{*0}K\nu + 2\gamma$

$$N_{K^{*0}K\nu} = 114 \pm 7$$

- K^{*0} 共鳴を形成しない事象: 主に τ 対生成事象

$$N_{\text{non-}K^{*0}} = 483 \pm 31$$

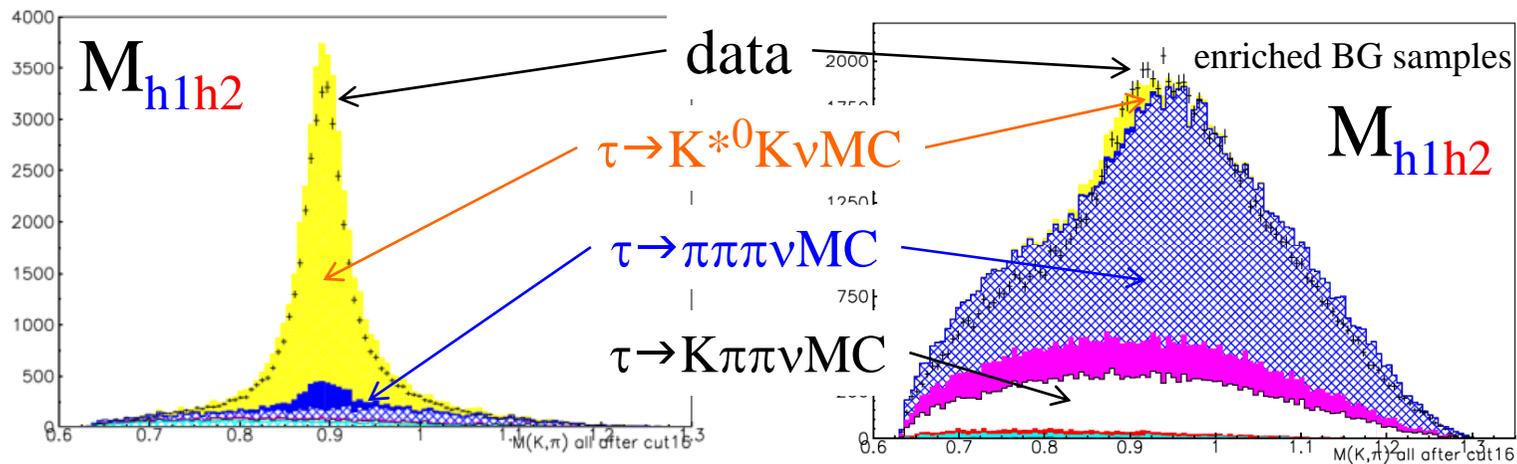
自ら測定した $\text{BR}(\tau \rightarrow K^{*0}K\pi^0\nu)$ を用いることで、
 $K^{*0}K\nu$ 信号事象への $K^{*0}K\pi^0\nu$ 事象の寄与を**0.4%**と評価できた。

② K^{*0} 共鳴を形成しない背景事象： π を K と誤識別

π を K と誤識別した事象 ($\tau \rightarrow K\pi\pi n\pi^0\nu, \pi\pi\pi n\pi^0\nu$) を実験データから評価する。

信号事象選別
K K π 選別

背景事象選別
K π π 選別

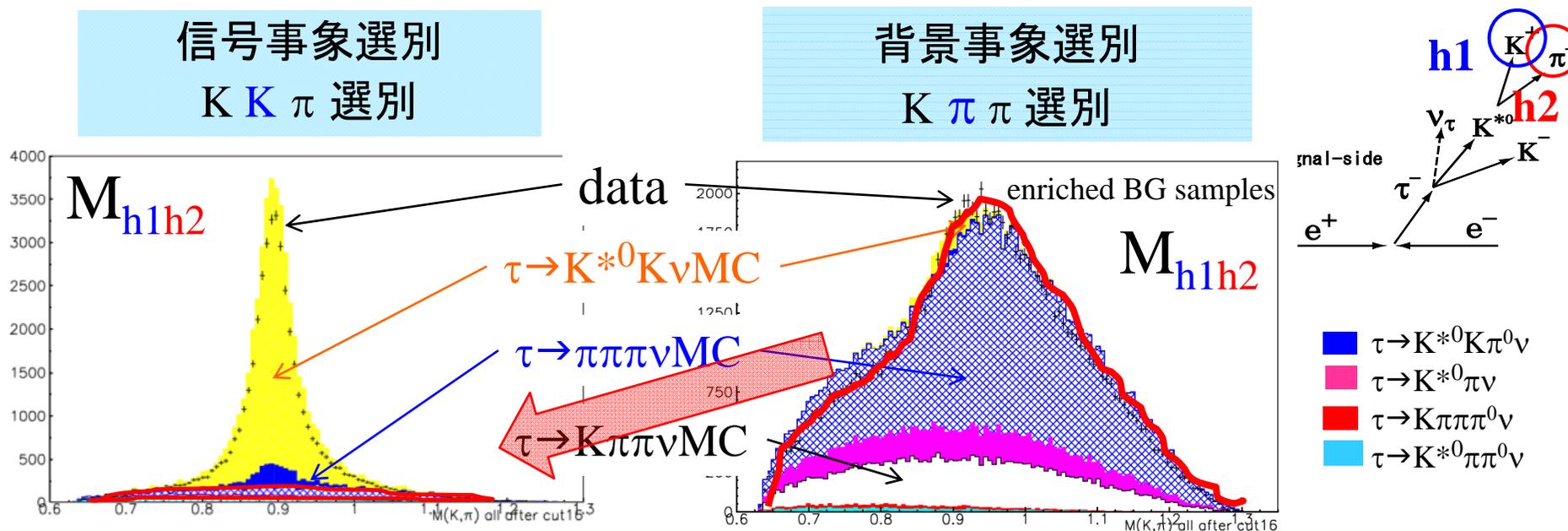


$K\pi\pi$ 事象を選別すると、背景事象リッチな分布が得られる(右)。

π を K と誤識別して残る事象の $K^{*0}K\nu$ 信号事象への寄与を**実験データから評価**したことで、この評価が信号に与える不定性を**1.1%**に抑えることができた。

② K^{*0} 共鳴を形成しない背景事象： π を K と誤識別

π を K と誤識別した事象 ($\tau \rightarrow K\pi\pi n\pi^0\nu, \pi\pi\pi n\pi^0\nu$) を実験データから評価する。



$K\pi\pi$ 事象を選別すると、背景事象リッチな分布が得られる(右)。

1事象ごとに、 π を K と誤識別する確率をかけると、これら $\tau \rightarrow K\pi\pi n\pi^0\nu, \pi\pi\pi n\pi^0\nu$ 背景事象の $\tau \rightarrow K^{*0}K\nu$ 信号事象への寄与が評価できる。

π を K と誤識別して残る事象の $K^{*0}K\nu$ 信号事象への寄与を**実験データから評価**したことで、この評価が信号に与える不定性を**1.1%**に抑えることができた。

③ K^{*0} 共鳴を形成しない背景事象 : $NR \rightarrow KK\pi\nu$

- $\tau \rightarrow KK\pi\nu$ は $\tau \rightarrow K^{*0}K\nu$ と同じ終状態をもつ
- $\tau \rightarrow KK\pi\nu$ は信号と干渉する
- 信号とNRの振幅をそれぞれ A_{BW} , A_{NR} , 2つの位相差を ϕ で表すと、干渉後の振幅は

$$|\alpha A_{BW} + \beta A_{NR} e^{i\phi}|^2$$
 と書け、BR(K^*K), BR(NR)と干渉項を正しく評価できる。

$$A_{BW}(m) = \frac{m_0 \Gamma(m)}{(m_0^2 - m^2) - im_0 \Gamma(m)}$$

\swarrow K^{*0} の崩壊幅
 \nwarrow K^{*0} の質量

$$\Gamma(m) = \Gamma_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^3 \frac{m_0}{m} \frac{B(p)^2}{B(p_0)^2}$$

$$B(p) = \frac{1}{\sqrt{1+r^2 p^2}}$$

r: BWの裾部分への補正項

$$A_{NR}(m) = \frac{m}{p} \sin(\delta_{LASS}) \exp(i\delta_{LASS})$$

$$\cot(\delta_{LASS}) = \frac{1}{ap} + \frac{bp}{2}$$

a, b : 定数

$K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ 崩壊のダンピングファクター-rはLASS実験で $K^-p \rightarrow K^-\pi^+\nu$ 反応から $r=3.4 \pm 0.6 \pm 0.3$ 、FOCUS実験で $D^* \rightarrow K^+\pi^-\mu\nu$ 崩壊から $r=3.95^{+1.31}_{-0.90}$ と測定されており、本解析ではその平均値 $r=3.53 \pm 0.59$ (GeV^{-1})を用いる。

結果

K*⁰K_v フィット結果 (1)

- M_{Kπ} 分布にフィットした関数

$$|\alpha A_{BW} + \beta A_{NR} e^{i\phi}|^2 + N^{incoh}$$

with LIPS integration

- A_{BW}: Breit-Wigner関数
 - LASS, FOCUS実験で議論されたr値を考慮
- A_{NR}: non-resonant振幅

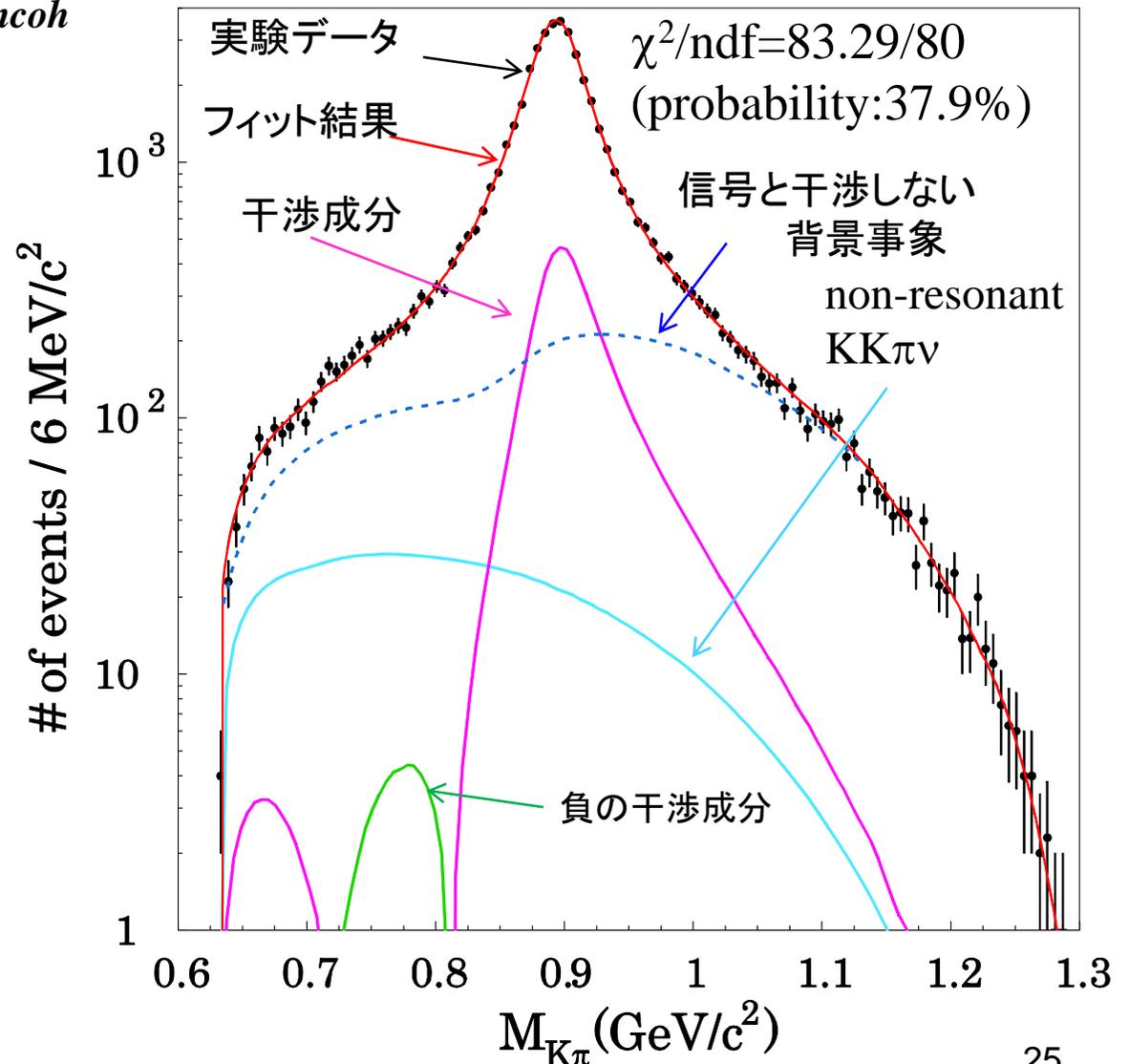
$$A_{NR} = \frac{m}{p} \sin(\delta_{LASS}) \exp(i\delta_{LASS})$$
- N^{incoh}: 信号と干渉しない背景事象成分

τ → πππν, Kππν, K*⁰Kπ⁰ν etc. 本解析で評価したもの

- 自由度

- M_{K*⁰}, Γ_{K*⁰}
- BR(K*⁰K_v)
- BR(KKπν)_{NR}, phase(φ)

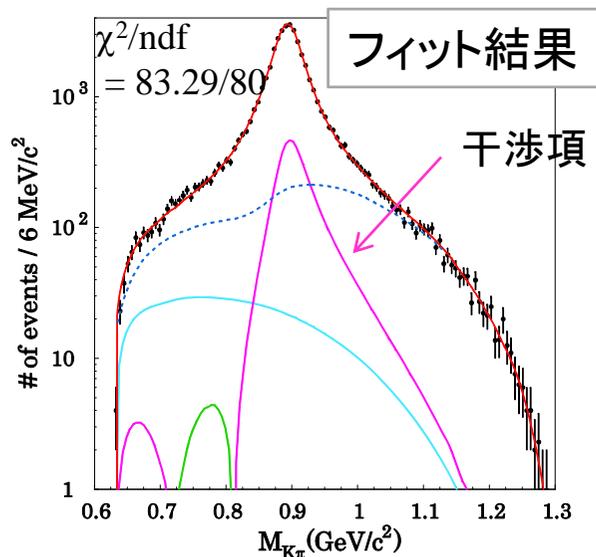
フィット結果はデータを非常によく再現



K*⁰K_vフィット結果 (2)

フィット自由度	フィット結果
BR(K* ⁰ K _v)	(1.56 ± 0.02) × 10 ⁻³
BR(KKπ _v) _{NR}	(5.76 ± 0.59) × 10 ⁻⁵
M _{K*⁰}	(895.25 ± 0.27) MeV/c ²
Γ _{K*⁰}	(47.70 ± 0.49) MeV
φ	(63.46 ± 2.05)°
χ ² /ndf	83.29/80

最終的に、M_{K*⁰} and Γ_{K*⁰} の中心値に対しては検出効率や事象選別の影響を補正している。



- $$\frac{BR(KK\pi\nu)_{NR}}{BR(K^{*0}K\nu) \times 2/3} = (5.58 \pm 0.57)\%$$

FOCUS実験(D*⁺→K⁺π⁻μν)の結果とよく合う

$$\frac{BR(K\pi\mu\nu)_{NR}}{BR(K\pi\mu\nu)} = (5.30 \pm 0.74^{+0.99}_{-0.96})\%$$

- 本解析での運動量領域(~M_{K*⁰})では
 $\delta_{LASS} \cong 45^\circ$ で、

$$\left[\begin{array}{ll} \cot(\delta_{LASS}) = \frac{1}{ap} + \frac{bp}{2} & \begin{array}{l} a = (4.03 \pm 1.72 \pm 0.06)(\text{GeV})^{-1} \\ b = (1.29 \pm 0.63 \pm 0.67)(\text{GeV})^{-1} \end{array} \end{array} \right]$$

φ + δ_{LASS} ≅ 65° + 45° ≅ 110° だから、
 干渉項 2αβRe(A_{BW}A_{NR}^{*}) のM_{Kπ}分布はBW関数の形と似た分布をしている。

- 干渉を考慮しない場合: χ²/ndf = 146.3/81
 →干渉は考えるべき

系統誤差

	$\text{Br}(\tau \rightarrow K^{*0} K \nu)$	$\text{Br}(\tau \rightarrow K^{*0} K \pi^0 \nu)$	$\text{Br}(\tau \rightarrow K K \pi \nu)_{\text{NR}}$
ルミノシティ	1.4	1.4	1.4
$ee \rightarrow \tau\tau$ 生成断面積	0.3	0.3	0.3
飛跡検出効率	3.0+0.3	3.0+0.3	3.0+0.3
トリガー効率	0.7	0.1	0.7
レプトン粒子識別	2.9	2.9	3.0
K/ π 粒子識別	2.6	3.8	2.8
信号MCの統計誤差	0.3	0.5	0.3
π^0 再構成	-----	1.7	-----
背景事象の評価	1.3	9.0	34.9
ダンピングファクター r	0.3	-----	1.6
合計	5.5%	11.0%	35.4%

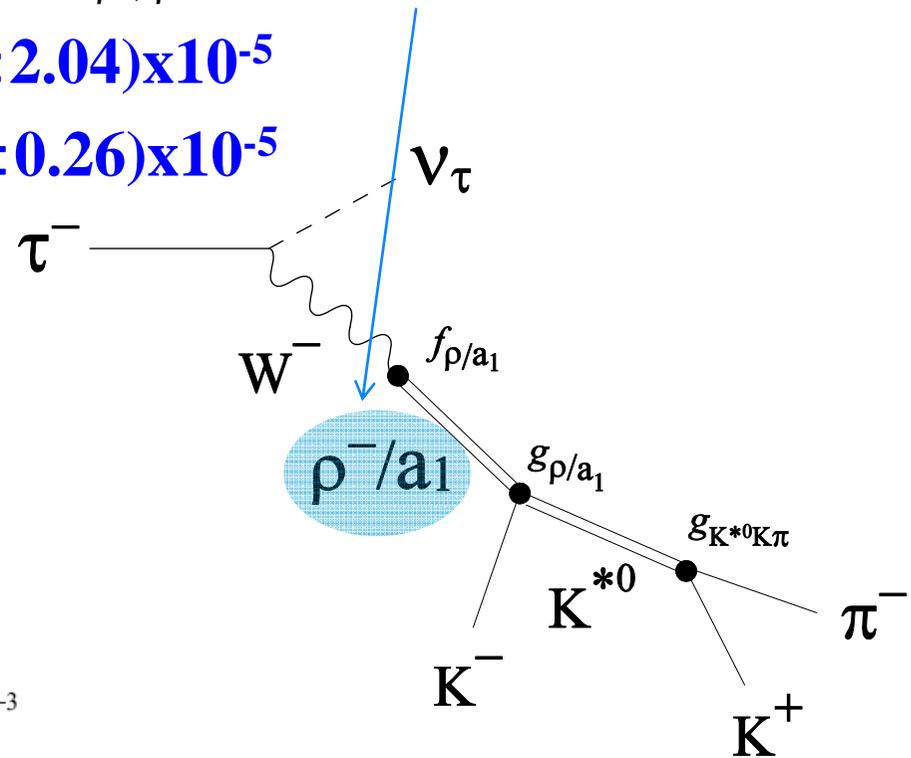
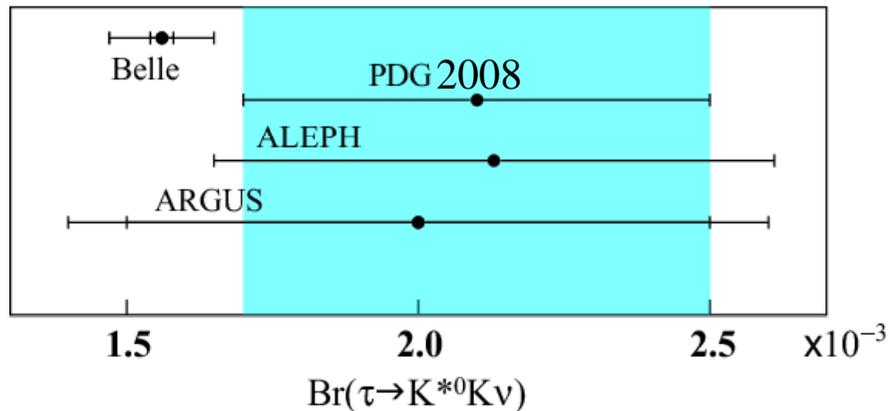
	$M_{K^{*0}}$	$\Gamma_{K^{*0}}$
背景事象の評価	0.23	0.75
ダンピングファクター r	0.22	0.09
中心値補正	0.04	0.22
Total	0.31 MeV/c²	0.79 MeV

結果 (1)

$$B(\tau \rightarrow K^{*0} K \nu) = (1.56 \pm 0.02 \pm 0.09) \times 10^{-3}$$

- 一番精度のよい測定値
- 過去の測定結果はNR $KK\pi\nu$ と信号の間の干渉の効果を考えていない
- 理論予想値 $B(\tau \rightarrow K^{*0} K \nu) = 3.92 \times 10^{-3}$ (Phys. Rev. D 55,3 B.A.Li)
 - 理論計算において、ベクトルカレントの候補に ρ' , ρ'' が含まれていない
- $B(\tau \rightarrow K \pi K \nu)_{NR} = (5.76 \pm 0.59 \pm 2.04) \times 10^{-5}$
- $B(\tau \rightarrow K^{*0} K \pi^0 \nu) = (2.39 \pm 0.46 \pm 0.26) \times 10^{-5}$
- どちらも世界初測定

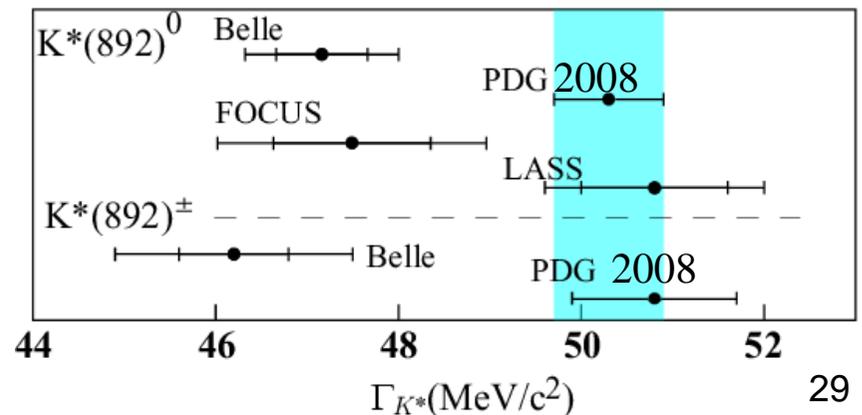
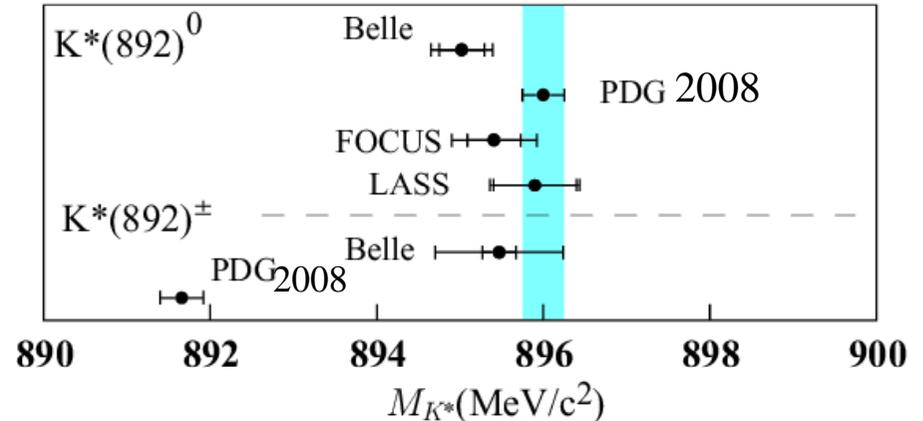
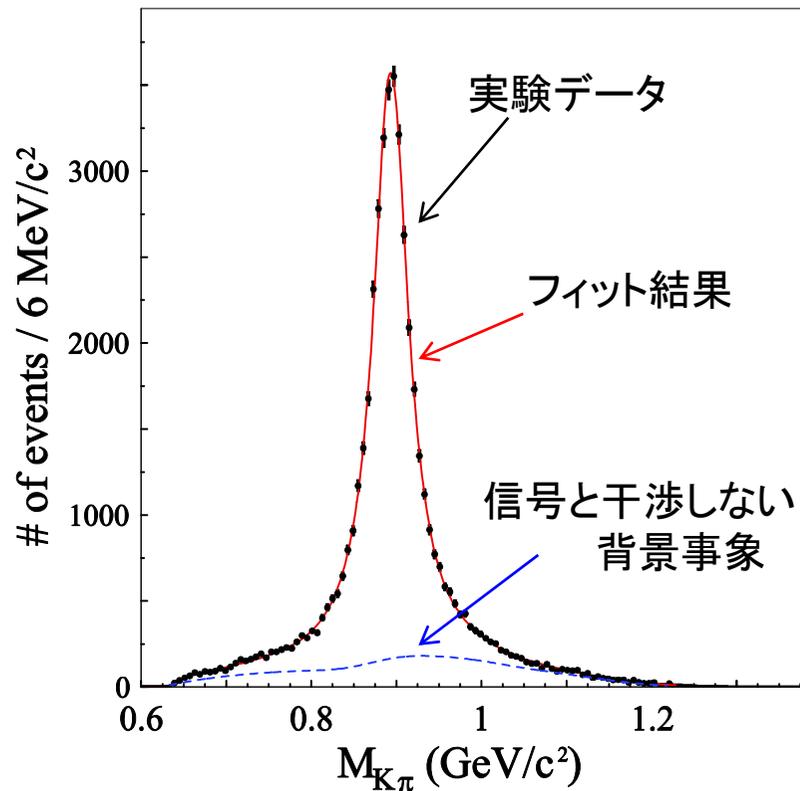
Belle preliminary



結果 (2)

- $M_{K^*0} = (895.10 \pm 0.27 \pm 0.31) \text{ MeV}/c^2$
- $\Gamma_{K^*0} = (47.23 \pm 0.49 \pm 0.79) \text{ MeV}$
 - 一番精度のよい測定値
 - タウの崩壊を用いた K^*0 の質量と崩壊幅の測定は初めて
 - FOCUS 実験の結果と一致

Belle preliminary





まとめ

Belle preliminary

5.0x10⁸ タウ対実験データを用いた $\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$ 崩壊の精密測定を行った。

高統計の実験データを用いた：統計誤差は0.64% (系統誤差より十分小さい)
系統誤差が重要：一番効く背景事象の評価による誤差を抑える必要あり

- 背景事象の精密測定
 - 背景事象の約80% (π を K に誤識別したもの)と、 $K^{*0} K \pi^0 \nu$ 事象を実験データから評価
- 正しい K^{*0} 信号事象の評価
 - 信号とNR $KK \pi \nu$ との干渉を考慮

BR($\tau \rightarrow K^{*0} K \nu$) の精密測定を実現

- $BR(\tau \rightarrow K^{*0} K \nu) = (1.56 \pm 0.02 \pm 0.09) \times 10^{-3}$

- 統計誤差は**20倍**向上、系統誤差は**3.5倍**向上
- 理論予想値 3.92×10^{-3} との比較 (Phys. Rev. D 55,3 B.A.Li) $\rightarrow \rho', \rho''$ の考慮
- $BR(\tau \rightarrow K^{*0} K \pi^0 \nu) = (2.39 \pm 0.46 \pm 0.26) \times 10^{-5}$ **世界初測定！**
- $BR(\tau \rightarrow K \pi K \nu)_{NR} = (5.76 \pm 0.59 \pm 2.04) \times 10^{-5}$ **世界初測定！**

過去の実験 (ARGUS 1995)
 $Br(\tau \rightarrow K^{*0} K \nu) = (2.0 \pm 0.5 \pm 0.4) \times 10^{-3}$
 $N_{sig} = 47.1$

$K^{*}(892)^0$ 中間子の質量と崩壊幅を精密に測定

- $M_{K^{*0}} = (895.10 \pm 0.27 \pm 0.31) \text{ MeV}/c^2$
- $\Gamma_{K^{*0}} = (47.23 \pm 0.49 \pm 0.79) \text{ MeV}$

arXiv:0808.1059

- タウ粒子の崩壊を通して初の測定, 世界最高精度での測定