$\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$崩壊における CP対称性の破れの探索

奈良女子大学大学院　人間文化研究科
物理科学専攻　高エネルギー物理学研究室
近藤　麻由

目次

- はじめに
  - τ粒子の概要
  - $\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$崩壊におけるCP対称性の破れ
- 実験装置
- 事象選別
- $\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$崩壊の不変質量分布
- CP非対称度の解析
  - モンテカルロシミュレーションによるテスト
  - データを用いた測定結果
- まとめ

τの概要

- 電子の約3500倍の質量を持つ
  最も重いレプトン（Mτ=1.77GeV）
- tクォークやbクォークと共に
  第3世代に属する
- 質量が重いので、レプトンの中で
  唯一ハドロン崩壊が可能

クォーク

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

レプトン

標準理論を越える物理を探る上で、
高い感度を持つプローブとして機能する。

今回、τレプトンの崩壊におけるCP対称性の破れの探索について報告する

CP変換

- C: 荷電共役変換(Charge Conjugation:荷電などの内部量子数を反転)

- P: パリティ変換 (Parity: 空間反転)

位置ベクトル:（x,y,z）→（-x,-y,-z）

運動量ベクトル:（Px,Py,Pz）→（-Px,-Py,-Pz）

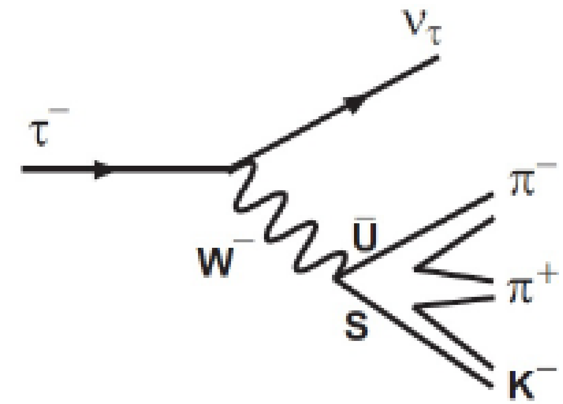
⇒　CP変換: 演算子CとPの積

レプトン系におけるCP対称性の破れ

- 標準理論では、レプトン系におけるCP対称性の破れ(CPV)は存在しない。

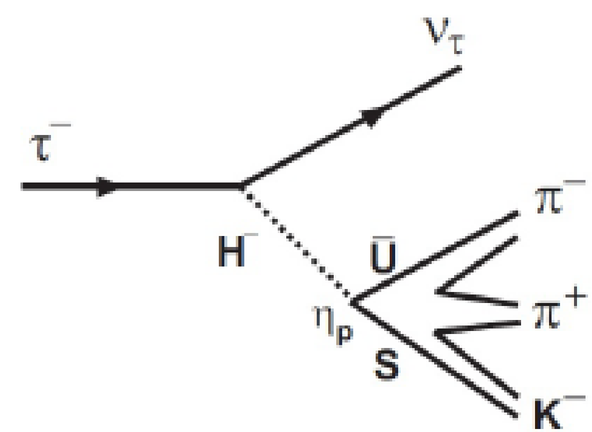
もしレプトン系のCPVを観測したら、新しい物理（NP）の効果である。

w⁻ボソンを媒介するハドロン崩壊(SM)



- レプトン系のCPVを起こすモデルの例として、非標準的な荷電ヒッグスボソンH^-の寄与が考えられる。

ヒッグスボソンを媒介するハドロン崩壊(NP)



- 終状態にK中間子を含むモードに注目するのは、sクォークの方がu、dクォークよりも重く、ヒッグスとの結合力が強いので、探索感度が高いためである。

$\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$崩壊でのCP対称性の破れ

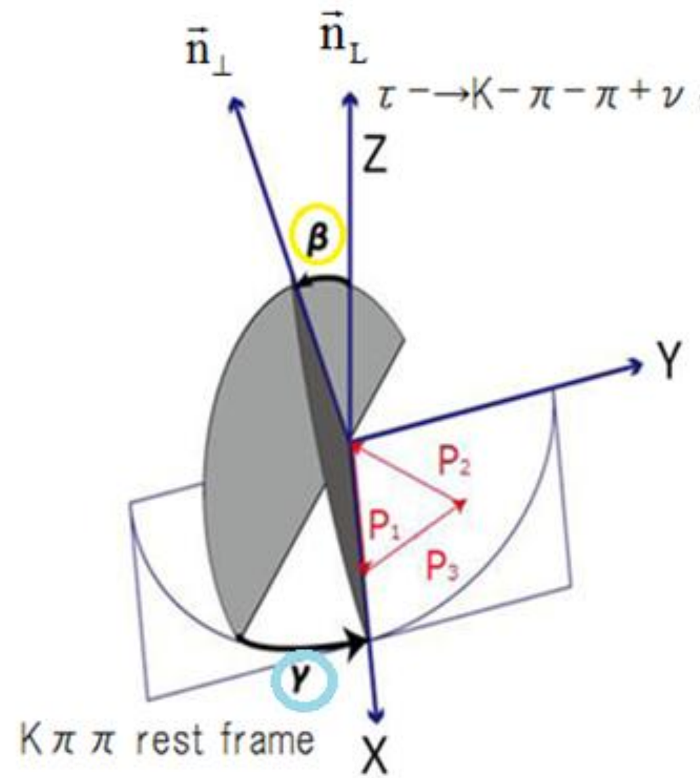
- $\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$と$\tau^+ \to K^+ \pi^+ \pi^- \nu_\tau$で崩壊の様子が異なること。
- CPVはτ^-とτ^+の間での角分布の違いとして現れることが期待される。

崩壊角度の定義

- $\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$崩壊の$K^- \pi^- \pi^+$静止系において、それぞれの運動量を次のように定義する。

$$\tau^-(\vec{p}_{123}) \to \mathrm{K}^-(\vec{p}_1)\pi^-(\vec{p}_2)\pi^+(\vec{p}_3)\nu_\tau$$

$K^- \pi^- \pi^+$の重心系



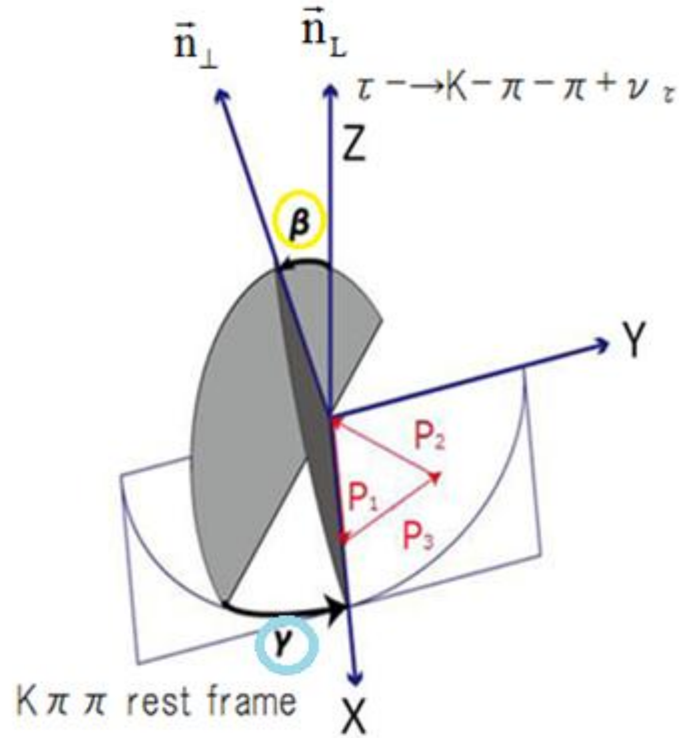
CP変換と角度変数

$$\tau^-(\vec{p}_{123}) \rightarrow K^-(\vec{p}_1)\pi^-(\vec{p}_2)\pi^+(\vec{p}_3)\nu_\tau$$

CP変換

$$\tau^+(-\vec{p}_{123}) \rightarrow K^+(-\vec{p}_1)\pi^+(-\vec{p}_2)\pi^-(-\vec{p}_3)\bar{\nu}_\tau$$

τ−	τ+
cosβ	−cosβ
sinβsinγ	sinβsinγ
sinβcosγ	sinβcosγ



- **cosβのみが、τ⁺の場合に符号が反転する**

$$\cos\beta = \overrightarrow{n_L}\cdot\overrightarrow{n_\perp} = \boxed{\overrightarrow{n_L}}\cdot\left(\boxed{\overrightarrow{p_1}}\times\boxed{\overrightarrow{p_2}}\right)$$

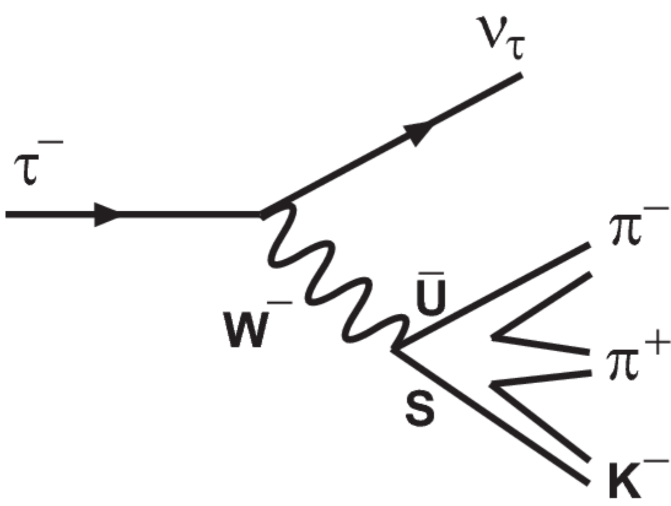
τ^+の場合、符号が反転

ハドロン構造因子

- 一般にτ粒子の三体へのハドロン崩壊は、4つのハドロン構造因子B_1、B_2、B_3、B_4を用いて表現できる。

B1、B2	ベクター
B3	軸ベクター
B4	スカラー

$\tau^- \rightarrow K^-(p_1)\ \pi^-(p_2)\ \pi^+(p_3)\ \nu_\tau$



・4つのハドロン構造因子B_1、B_2、B_3、B_4は次のような3つの質量に依存している。

$$Q^2 = M^2(K^-\pi^-\pi^+)$$
$$s_1 = M^2(\pi^-\pi^+)$$
$$s_2 = M^2(K^-\pi^+)$$

$\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$の微分崩壊幅

$$\frac{d\Gamma\ (\tau^-)}{dQ^2 ds_1 ds_2 d\gamma d\cos\beta d\cos\theta} = \frac{G_F^2 \sin^2\theta_c}{512(2\pi)^6} \frac{(m_\tau^2 - Q^2)^2}{m_\tau^3 Q^2}$$
$$\times \left\{ \left[\frac{2}{3} K_1 + K_2 + \frac{1}{3} \overline{K}_1 (3\cos^2\beta - 1)/2 \right] (|B_1|^2 + |B_2|^2) \right.$$
$$+ \left[\frac{2}{3} K_1 + K_2 - \frac{2}{3} \overline{K}_1 (3\cos^2\beta - 1)/2 \right] |B_3|^2 + K_2 |B_4|^2$$
$$- \frac{1}{2} \overline{K}_1 \sin^2\beta \cos 2\gamma (|B_1|^2 - |B_2|^2) + \overline{K}_1 \sin^2\beta \sin 2\gamma \mathrm{Re}(B_1 B_2^*)$$
$$+ 2\overline{K}_3 \sin\beta \sin\gamma \mathrm{Re}(B_1 B_3^*) + \boxed{2\overline{K}_2 \sin\beta \cos\gamma \mathrm{Re}(B_1 B_4^*)}$$
$$+ 2\overline{K}_3 \sin\beta \cos\gamma \mathrm{Re}(B_2 B_3^*) - \boxed{2\overline{K}_2 \sin\beta \sin\gamma \mathrm{Re}(B_2 B_4^*)}$$
$$+ 2\overline{K}_3 \cos\beta \mathrm{Im}(B_1 B_2^*) + \overline{K}_1 \sin 2\beta \cos\gamma \mathrm{Im}(B_1 B_3^*)$$
$$\left. - \overline{K}_1 \sin 2\beta \sin\gamma \mathrm{Im}(B_2 B_3^*) + \boxed{2\overline{K}_2 \cos\beta \mathrm{Im}(B_3 B_4^*)} \right\}$$

CP-evenな項

CP-oddな項

τ^+の場合、
符号が反転する。

- 微分崩壊幅は6つの変数からなる関数

（3つの質量M(Kππ)、M(Kπ)、M(ππ)と3つの角度β、γ、θ）

- 微分崩壊幅はCP-evenな項とCP-oddな項を持つ。
- CPの効果はB4に含まれる。

⇨ B4を含む3つのCP-oddな項（sinβsinγ、sinβcosγ、cosβに依存する項）に注目する。

	CP -even な項	CP-odd な項
cosβ	$\mathrm{Im}(B_1B_2^*)$: ベクター + ベクター	$\mathrm{Im}(B_3B_4^*)$: 軸ベクター+ スカラー
sinβsinγ	$\mathrm{Re}(B_1B_3^*)$: ベクター + 軸ベクター	$\mathrm{Re}(B_2B_4^*)$: ベクター + スカラー
sinβcosγ	$\mathrm{Re}(B_2B_3^*)$: ベクター+ 軸ベクター	$\mathrm{Re}(B_1B_4^*)$: ベクター + スカラー

- cosβに関する前方後方非対称度$A_{FB}^{(3)}$

$$\boxed{A_{FB,i}^{(3)} = \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)} \right)_{\tau^\pm}}$$

- cosβに関するCP非対称度$A_{CP}^{(3)}$

$$\boxed{A_{CP,i}^{(3)} \equiv A_{FB,i}^{(3)}(\tau^-) - A_{FB,i}^{(3)}(\tau^+)}$$

ここで、iは質量ビンを表す。

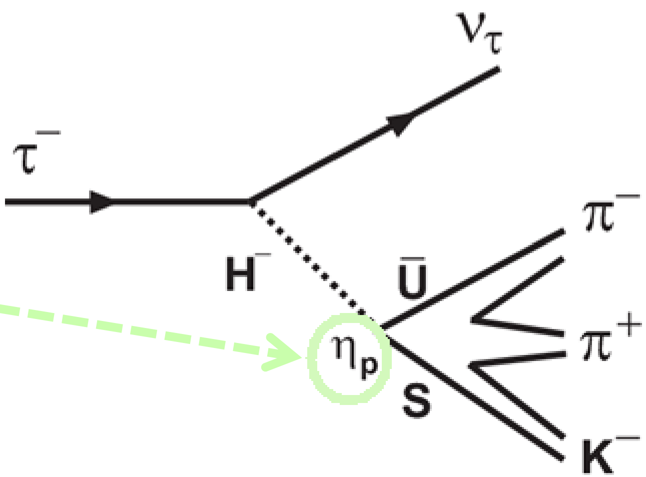
$N_i(\cos\beta>0)$: i番目のビンにあり、cosβ>0の領域に存在する事象数

$N_i(\cos\beta<0)$: i番目のビンにあり、cosβ<0の領域に存在する事象数

新しい物理(NP)の効果

- NPの効果は、ハドロン構造因子B_4の項を以下のように置き換えることで一般的に取り入れられる。

$$B_4 \to \tilde{B}_4 = B_4 + \frac{f_H}{m_\tau}\eta_P$$



- η_Pは複素数の結合定数で、τ^-とτ^+で$\eta_P \to \eta_P{}^*$に変換される。

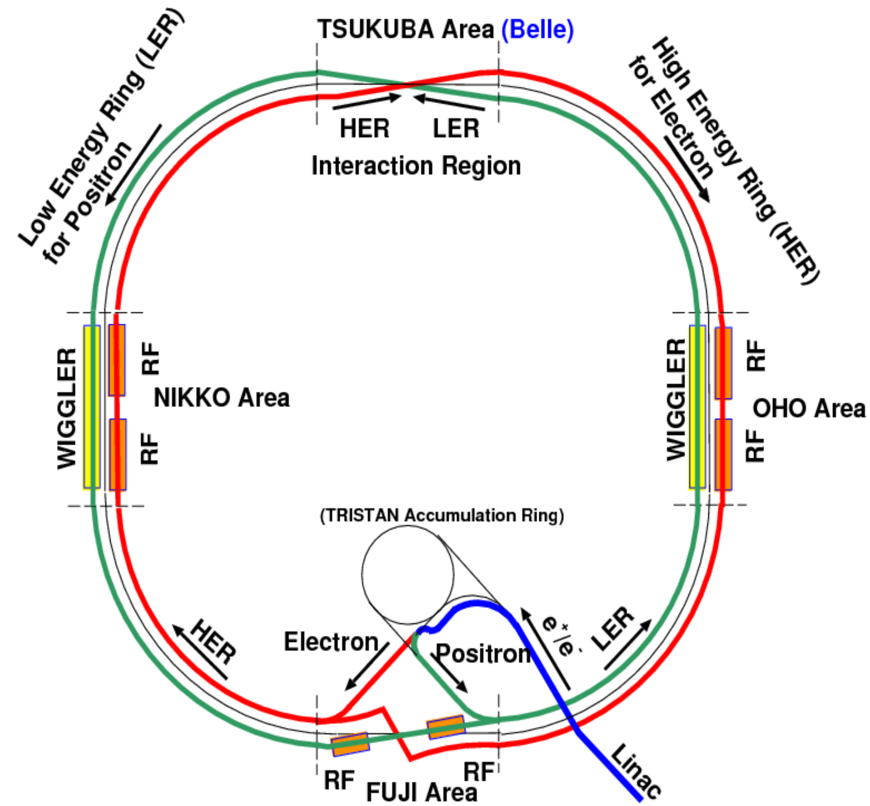
⇒ NPにおけるCP対称性の破れの原因となる

実験装置

KEKB加速器

非対称エネルギー
電子・陽電子衝突型加速器

電子：8.0GeV
陽電子：3.5GeV
重心系のエネルギー：10.58GeV



・B中間子を大量に生成し、研究するのに理想的な設計
・B中間子とほぼ同数のτ粒子も生成できる

⇒ τファクトリーとしても重要！

実験装置

Belle検出器

・生成された粒子を検出するために複数の装置で構成されている

SVD : Silicon Vertex Detector

・粒子崩壊点の測定

CDC : Central Drift Chamber

・荷電粒子の飛跡や 運動量の測定

ACC : Aerogel Cerenkov Counter

・K±とπ±の識別

TOF : Time of Flight

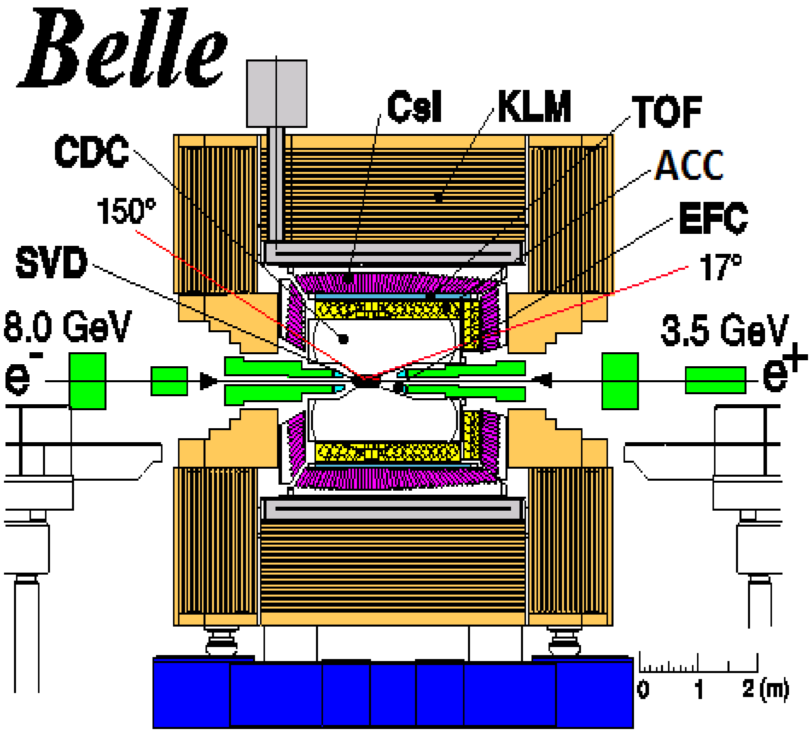
・荷電粒子の飛行時間 を測定

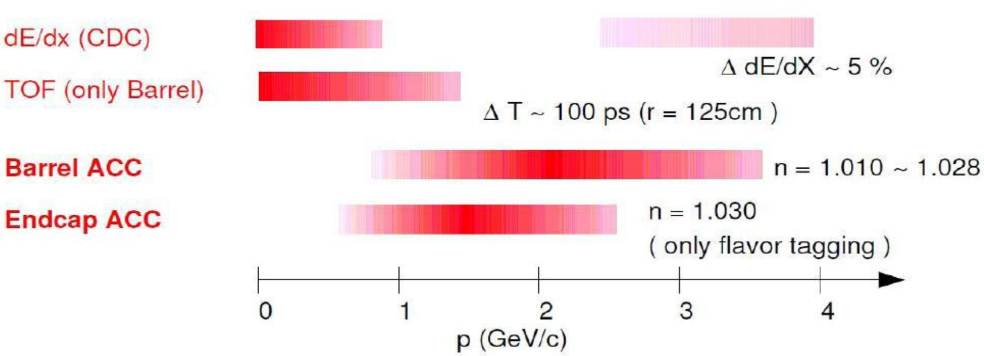
ECL : Electromagnetic Calorimeter

・電子や光子のエネルギー測定

KLM : KL、μ Detector

・KL、μ粒子の検出





各検出器の粒子識別の可能な運動量領域。それぞれ粒子識別に適した運動量領域があり、各検出器はその他を補うことで広範囲の運動量領域のK/π識別が可能となる。

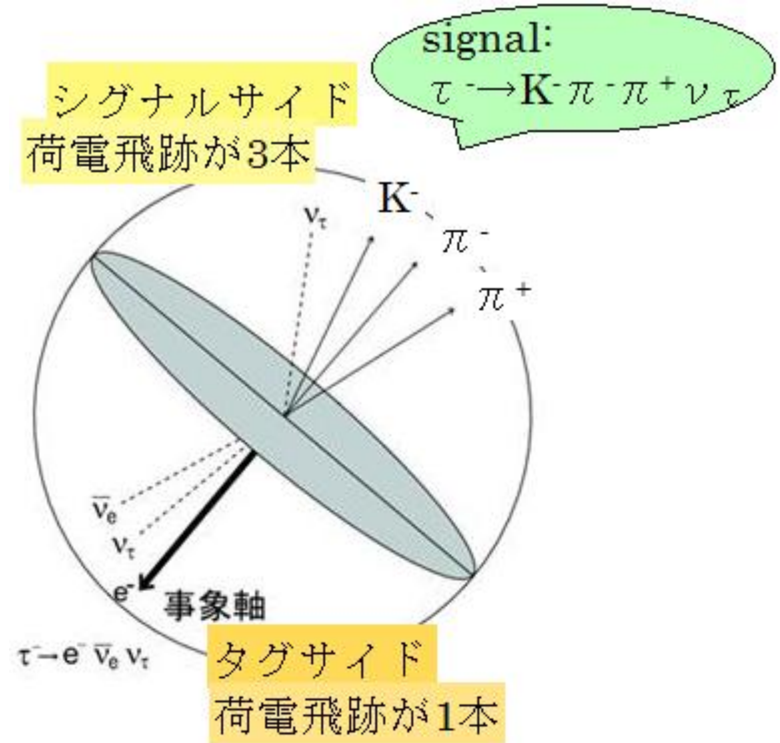
事象選別

- 今回使ったデータ量665/fb
- $e^+e^- \to \tau^+\tau^-$事象選別：

バックグラウンド⇒$e^+e^- \to q\bar{q}$ 生成、μ対生成、バーバー散乱、二光子過程など

τの崩壊の特徴として終状態の荷電粒子の数が少ないことが挙げられる。
荷電飛跡が4本であること、かつ電荷の合計がゼロであることを要求

- 運動量が最も高い荷電飛跡を事象軸とし、e^+e^-の重心系で2つの半球に分ける



τ崩壊からくる主なバックグラウンド

$\tau^- \to \pi^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$
$\tau^- \to K^-\pi^-\pi^+\pi^0\nu_\tau$
$\tau^- \to K^-K_S\nu_\tau$

K、π荷電粒子
γ、π^0のveto
K_Sのveto

荷電粒子の識別

- π/Kの識別にはCDCから得られるエネルギー損失(dE/dx)、TOFおよびACCの情報を用いる。
- これらの情報からπらしさを表す関数$P(\pi/K)$を準備

$$\boxed{\begin{array}{l} \pi : P(\pi/K) \geqq 0.6 \\ K : P(\pi/K) < 0.1 \end{array}}$$

この条件でπとKを識別する。

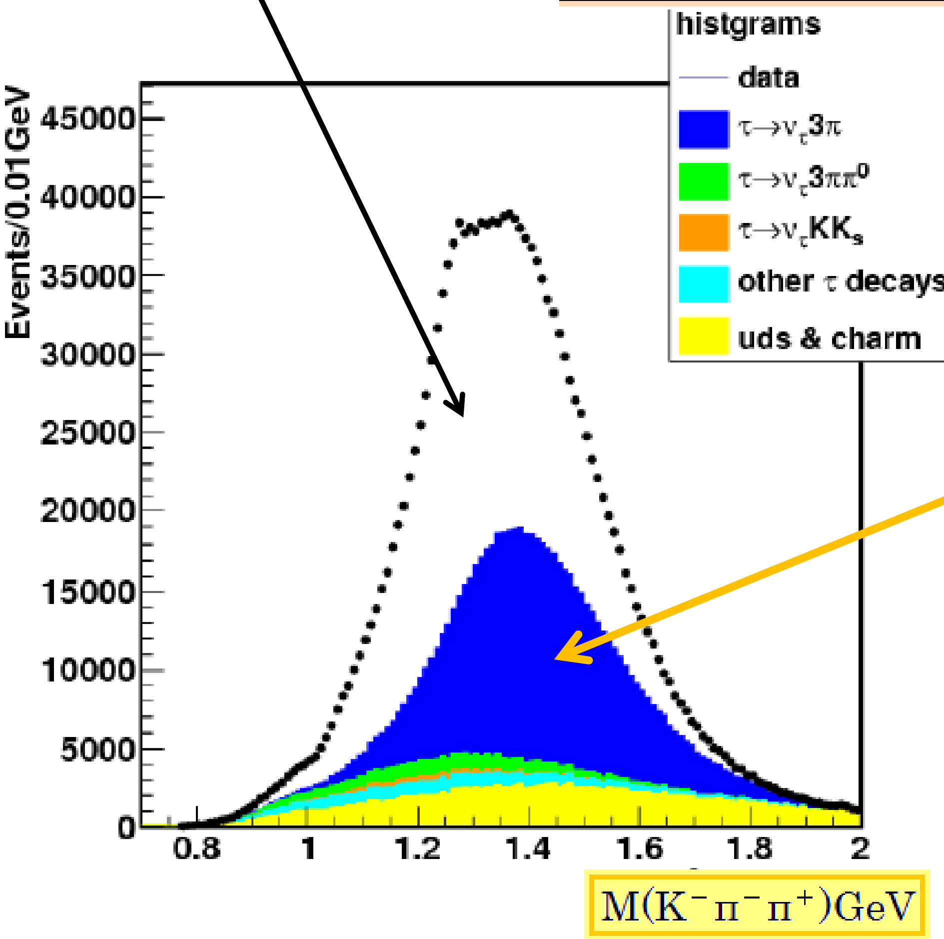
- 終状態の3本の荷電粒子それぞれがπ/Kに識別されていることを要求

$$\begin{array}{cccccc} \tau^- \rightarrow & X_1^- & X_2^- & X_3^+ & \nu_\tau \\ & \parallel & \parallel & \parallel & \\ & K^- & \pi^- & \pi^+ & \end{array}$$

$\tau^- \to K^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$崩壊候補事象の $K^-\pi^-\pi^+$不変質量分布 670/fb

白い部分が
シグナル

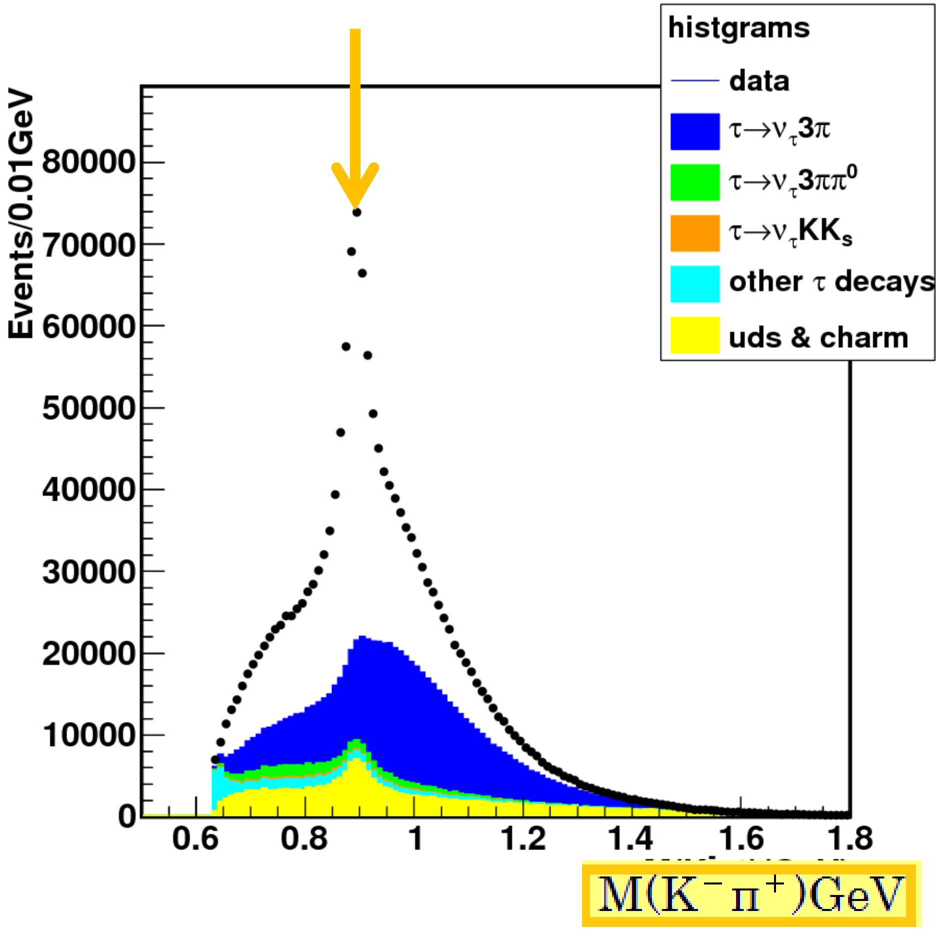
黒丸：データ



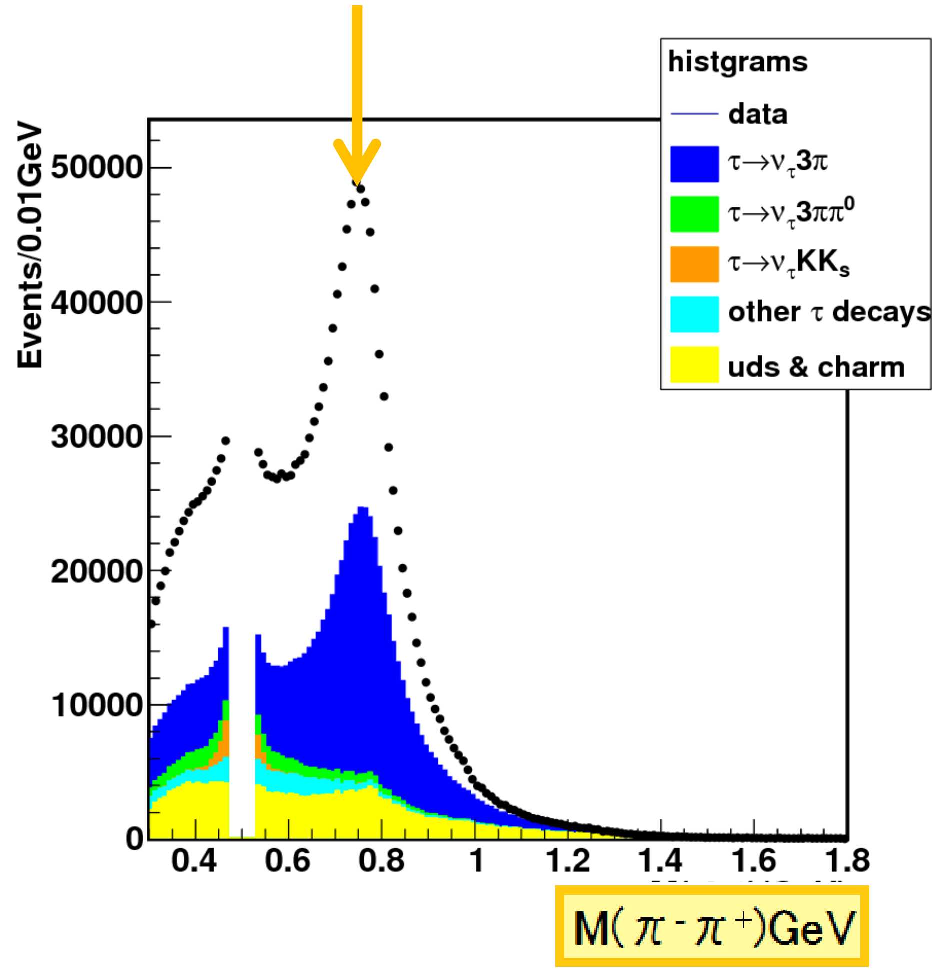
$\tau^- \to K^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$選別
1,711,060イベント $\tau^- \to K^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$: 856,198イベント $\tau^+ \to K^+\pi^-\pi^+\nu_\tau$: 854,862イベント

崩壊モード	割合
$\tau^- \to \pi^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$	31.9%
$\tau^- \to \pi^-\pi^-\pi^+\pi^0\nu_\tau$	2.91%
$\tau^- \to K^-K_S\nu_\tau$	0.60%
$\tau^- \to K^-\pi^-\pi^+\pi^0\nu_\tau$	2.42%
$\tau^- \to K^-K^+\pi^-\nu_\tau$	1.84%
$e^+e^- \to qq\nu_e (q = u,d,s,c)$	13.2%

$\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$崩壊候補事象の$K^- \pi^+$と$\pi^- \pi^+$不変質量分布



890MeV付近にK＊(892)共鳴によるピークが見える



770MeV付近にρ(770)共鳴によるピークが見える

CP非対称度の測定方法

- cosβに関して

前方後方非対称度

$$A_{FB,i}^{(3)} = \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)} \right)_{\tau^\pm}$$

CP非対称度

$$A_{CP,i}^{(3)} \equiv A_{FB,i}^{(3)}(\tau^-) - A_{FB,i}^{(3)}(\tau^+)$$

・sinβsinγ、sinβcosγに関しても同様に測定する

モンテカルロシミュレーションによるテスト

- CPの破れの効果が入っていないモンテカルロ事象を用いた

→τ粒子対のスピン-スピン相関の非対称度や、検出効率のバイアスの影響がないことを調べる

- モンテカルロシミュレーションでは、generatorレベルと観測レベルでテストをした。

  generatorレベル：100%の検出効率を持つ

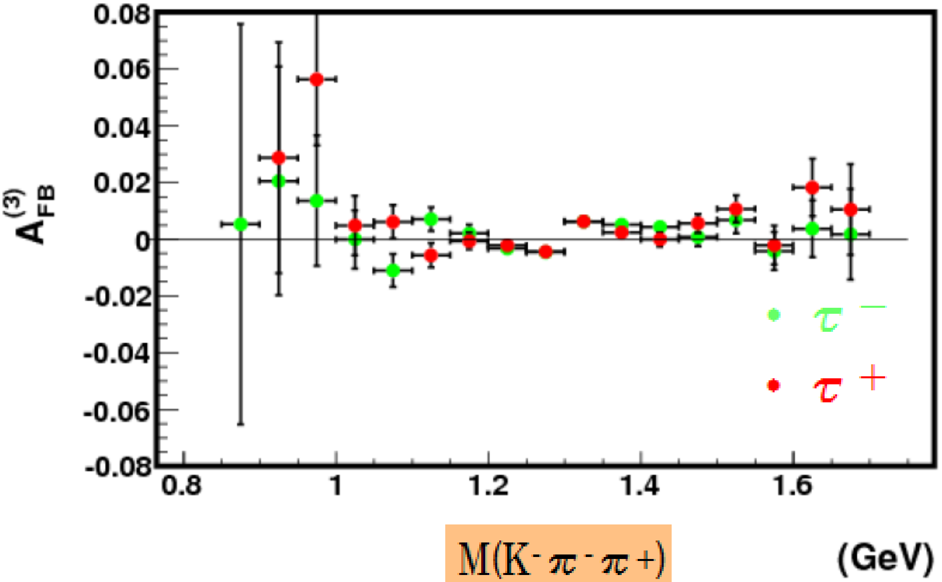
  観測レベル：検出器のシミュレーションを含む

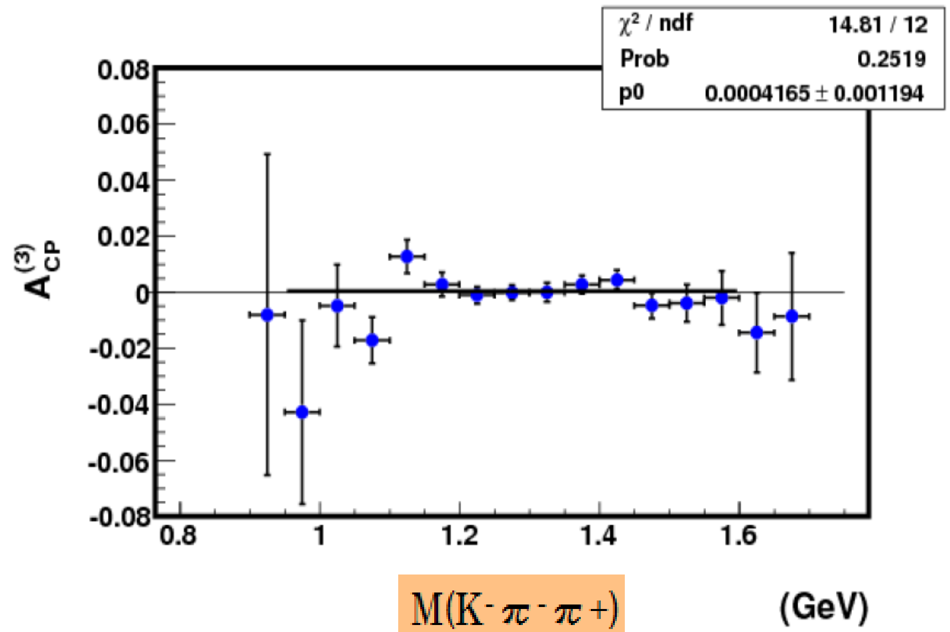
・今回、3つの崩壊角sinβsinγ、sinβcosγ、cosβに関するCP非対称度を、3つの質量M(Kππ)、M(Kπ)、M(ππ)について調べる。

観測レベルでのcosβに関するCP非対称度（質量Kππ）

$$A^{(3)}_{FB,i} = \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)} \right)_{\tau^{\pm}}$$

$$A^{(3)}_{CP,i} = A^{(3)}_{FB,i}(\tau^-) - A^{(3)}_{FB,i}(\tau^+)$$



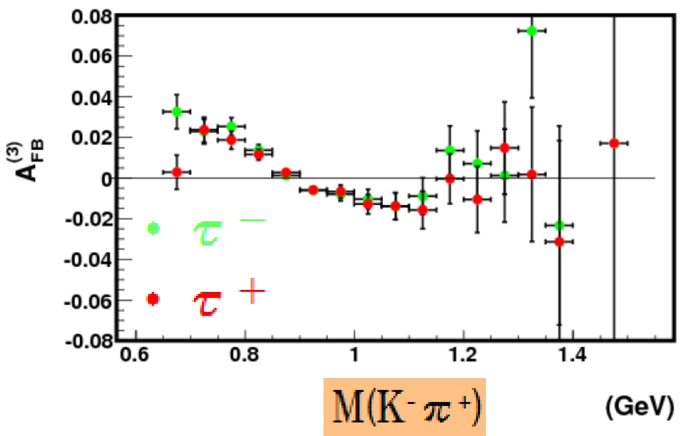


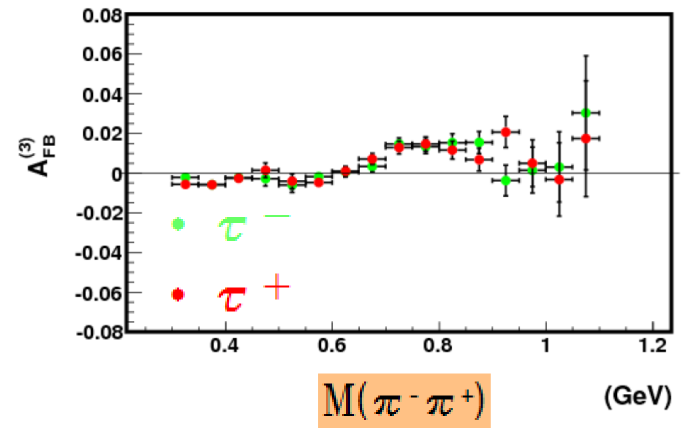
・定量的な評価：CP非対称度がゼロという仮定でχ^2を計算
（probはχ^2/ndfの値を持つ確率、$\bar{A}_{CP}$ (p^0)はCP 非対称度の平均値）

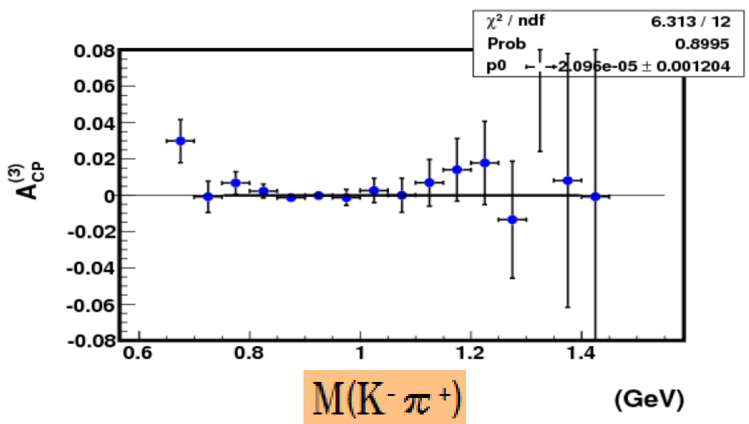
χ^2/ndf：14.81/12
prob：0.25
$\bar{A}_{CP}$：0.0004±0.0012

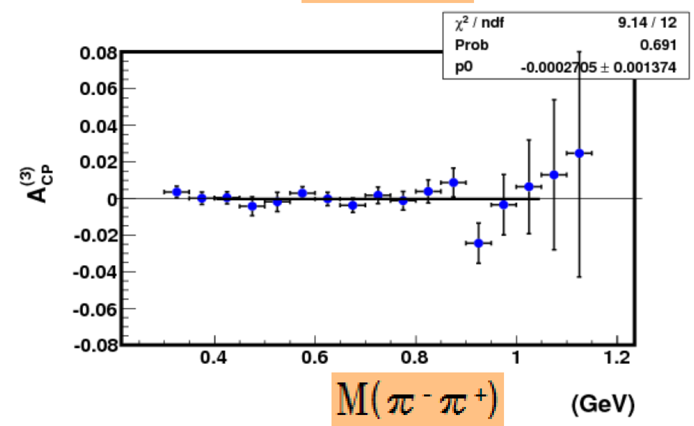
0.12%でAcp=0という仮定に無矛盾

観測レベルでのcosβに関するCP非対称度（質量Kπ、ππ）









Χ²/ndf : 6.313/12
prob : 0.90
$\overline{A}_{CP}$: −0.00002±0.0012

0.12%でAcp=0という仮定に無矛盾

Χ²/ndf : 9.14/12
prob : 0.69
$\overline{A}_{CP}$: −0.0003±0.0014

0.14%でAcp=0という仮定に無矛盾

モンテカルロシミュレーションのテストにおける CP非対称度の平均値 $\bar{A}_{CP}$

崩壊角	質量	$\bar{A}_{CP}$（generatorレベル）	$\bar{A}_{CP}$（観測レベル）
cosβ	M(Kππ)	**−0.0009±0.0005**	**0.0004±0.0012**
	M(Kπ)	**−0.0009±0.0005**	**−0.00002±0.0012**
	M(ππ)	**−0.0010±0.0005**	**−0.0003±0.0014**
sinβsinγ	M(Kππ)	-0.0002±0.0005	-0.0040±0.0012
	M(Kπ)	-0.0004±0.0005	-0.0041±0.0012
	M(ππ)	-0.0004±0.0005	-0.0042±0.0014
sinβcosγ	M(Kππ)	0.0002±0.0005	-0.0023±0.0012
	M(Kπ)	0.0001±0.0005	-0.0026±0.0012
	M(ππ)	0.00002±0.0005	-0.0015±0.0014

CP非対称度がゼロという仮定に無矛盾。

データを用いたCP非対称度の測定

- 今回用いたデータの$\tau^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{-}\pi^{+}\nu_{\tau}$事象数:1,711,060

$\tau^{-} \to K^{-}\pi^{-}\pi^{+}\nu_{\tau}$事象数　$N(\tau^{-})$:854,862±925

$\tau^{+} \to K^{+}\pi^{+}\pi^{-}\nu_{\tau}$事象数　$N(\tau^{+})$:856,198±925

- $\tau^{-} \to K^{-}\pi^{-}\pi^{+}\nu_{\tau}$事象と$\tau^{-} \to \pi^{-}\pi^{-}\pi^{+}\nu_{\tau}$事象についてのCP非対称度を、3つのCP-oddな項(崩壊角$\sin\beta\sin\gamma$、$\sin\beta\cos\gamma$、$\cos\beta$に比例する項)に関して、質量ごとに調べた。

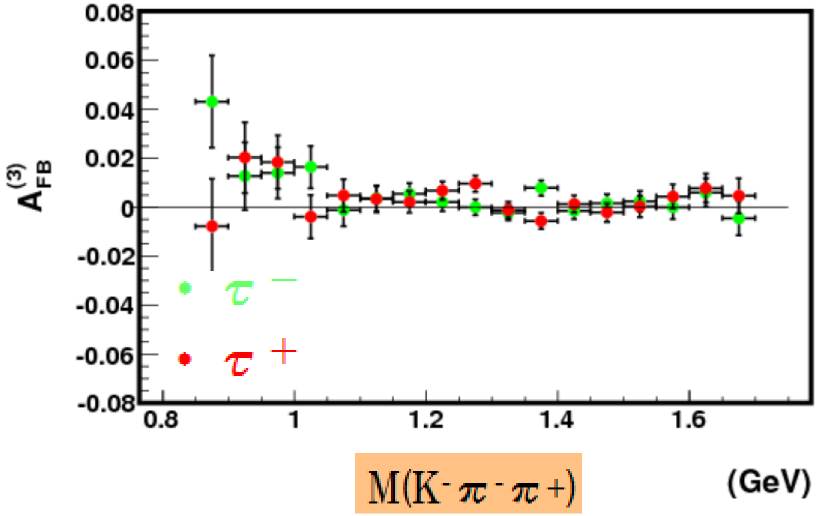
- $\tau^{-} \to K^{-}\pi^{-}\pi^{+}\nu_{\tau}$事象の主なバックグラウンド:$\tau^{-} \to \pi^{-}\pi^{-}\pi^{+}\nu_{\tau}$事象

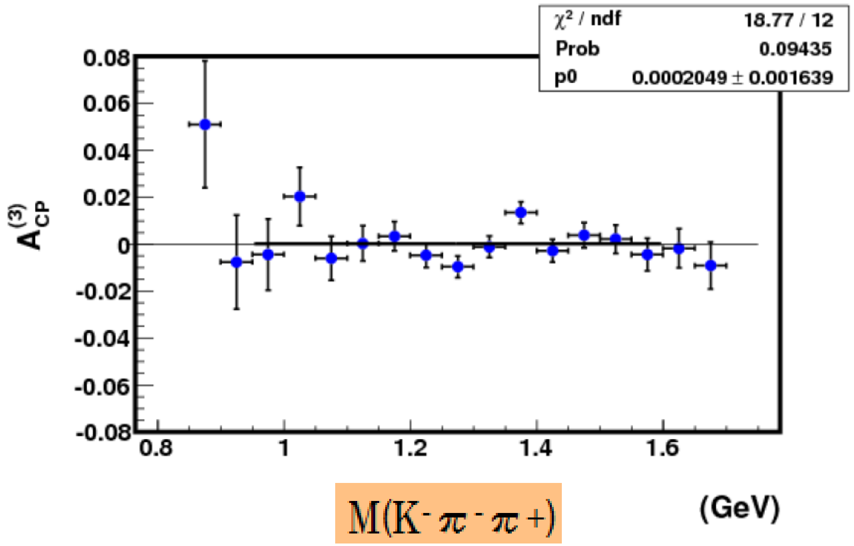
⇒バックグラウンドからの影響を調べることができる。

データでのcosβに関するCP非対称度（質量Kππ）

$$A_{FB,i}^{(3)} = \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)} \right)_{\tau^\pm}$$

$$A_{CP,i}^{(3)} = A_{FB,i}^{(3)}(\tau^-) - A_{FB,i}^{(3)}(\tau^+)$$

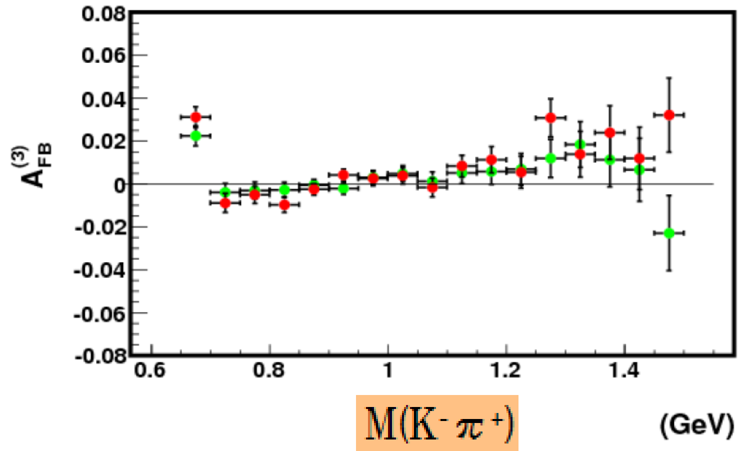


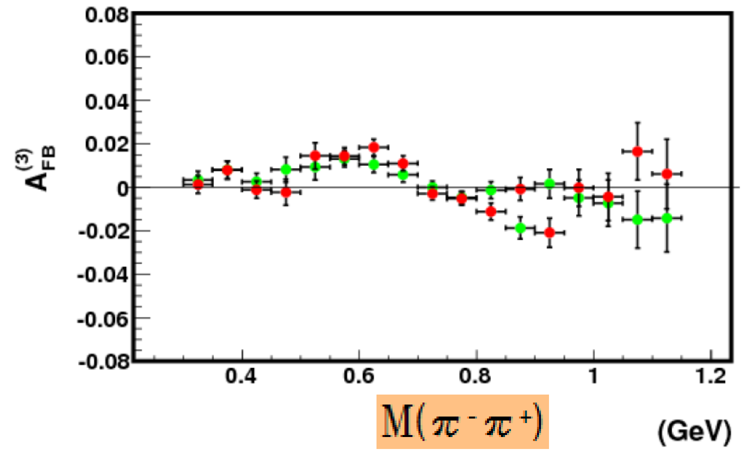


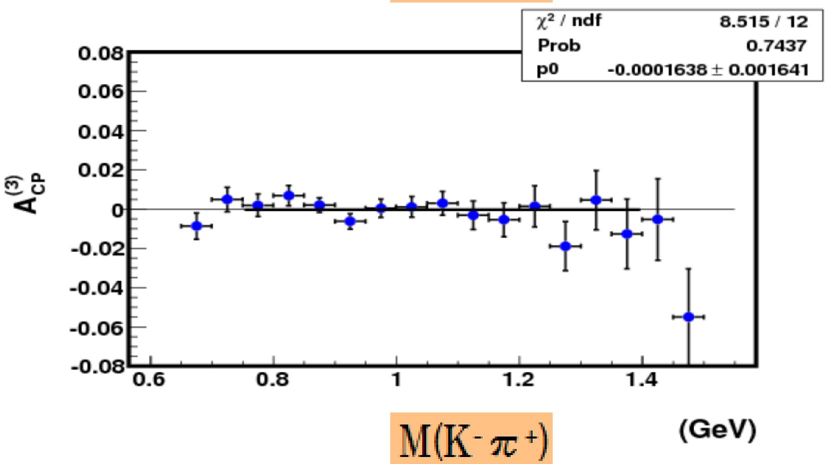
0.16%でAcp＝0という仮定に無矛盾

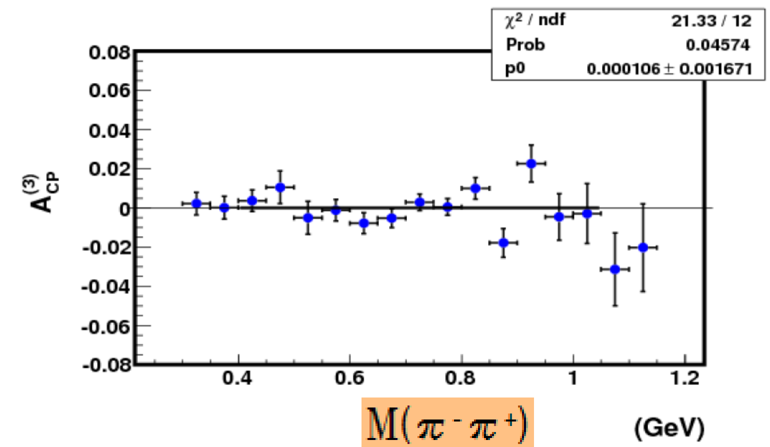
χ^2/ndf : 18.77/12
prob : 0.09
$\overline{A}_{CP}$: 0.0002±0.0016

データでのcosβに関するCP非対称度（質量Kπ、ππ）









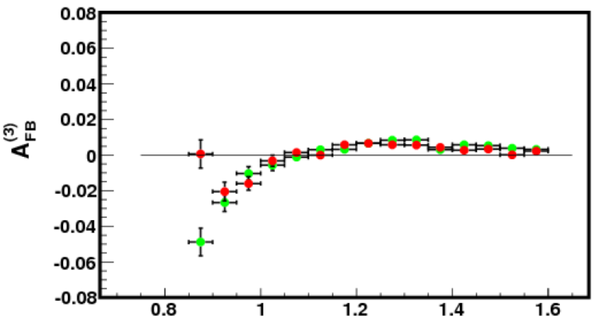
Χ²/ndf : 8.515/12
prob : 0.74
$\bar{A}_{CP}$: −0.0002±0.0016

0.16%でAcp＝0という仮定に無矛盾

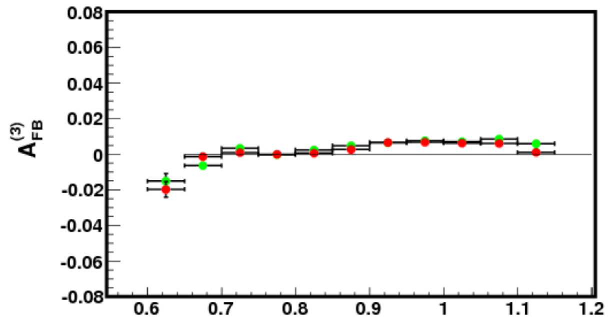
Χ²/ndf : 21.33/12
prob : 0.05
$\bar{A}_{CP}$: 0.0001±0.0017

0.17%でAcp＝0という仮定に無矛盾

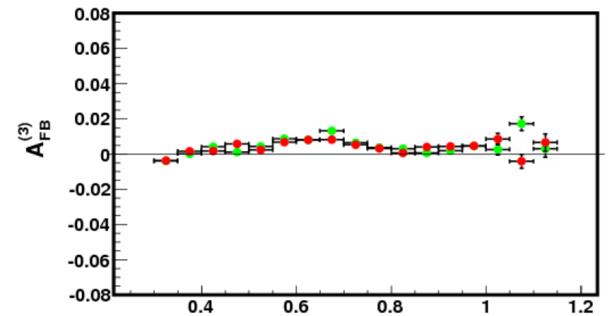
主なバックグラウンドである$\tau^- \to \pi^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$事象の $\cos\beta$に関するCP非対称度$A_{CP}^{(3)}$



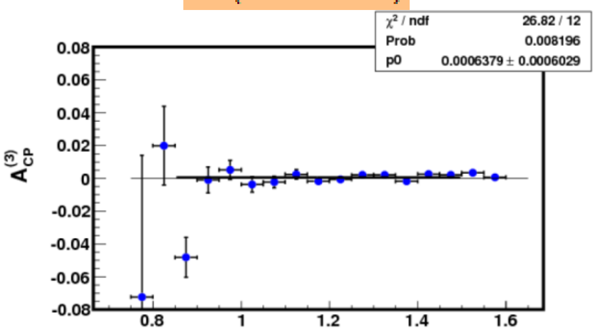
$M(K^-\pi^-\pi^+)$ (GeV)



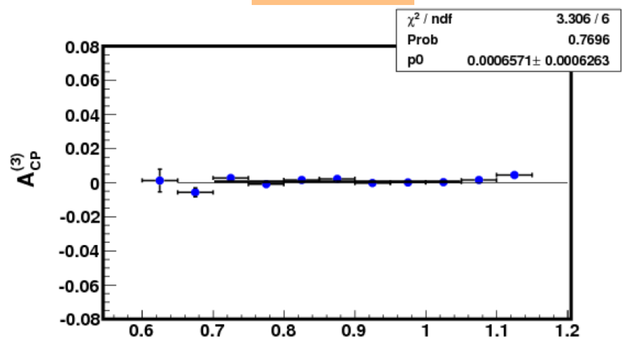
$M(K^-\pi^+)$ (GeV)



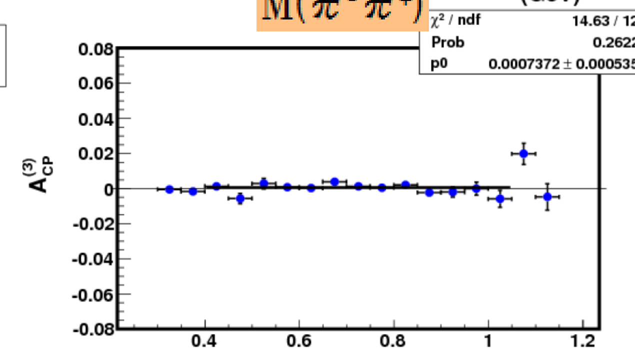
$M(\pi^-\pi^+)$ (GeV)



$M(K^-\pi^-\pi^+)$ (GeV)



$M(K^-\pi^+)$ (GeV)



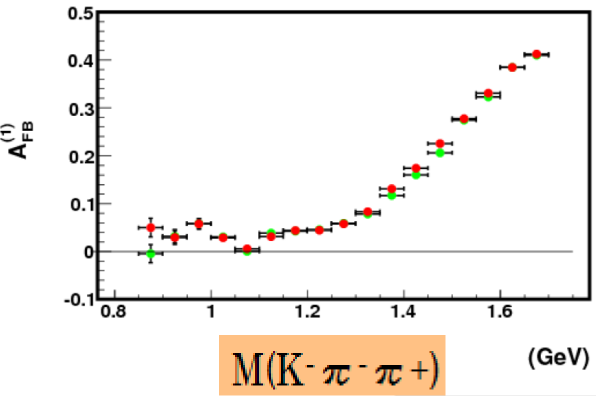
$M(\pi^-\pi^+)$ (GeV)

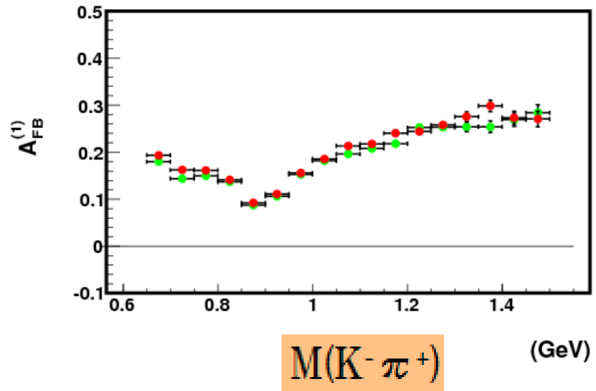
χ^2/ndf: 26.82/12
prob: 0.01
$\bar{A}_{CP}$: 0.0006±0.0006

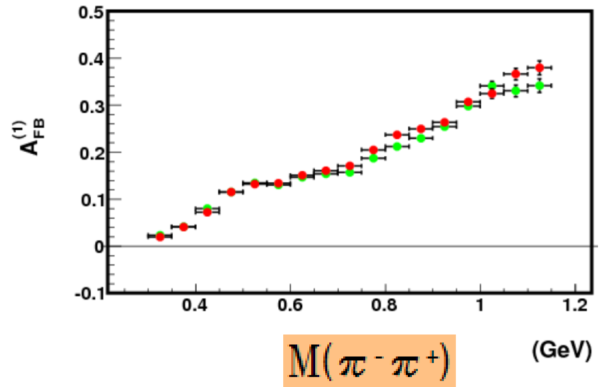
χ^2/ndf: 3.306/6
prob: 0.77
$\bar{A}_{CP}$: 0.0007±0.0006

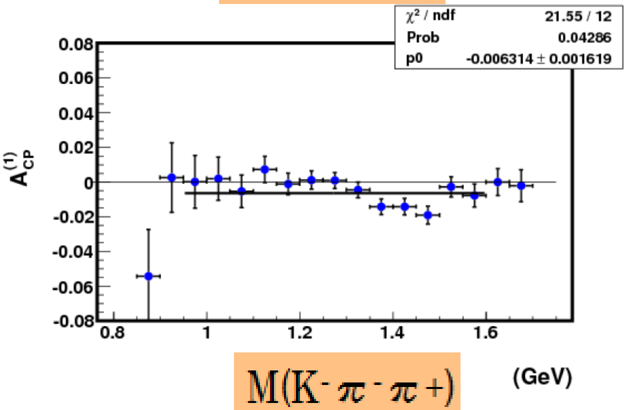
χ^2/ndf: 14.63/12
prob: 0.26
$\bar{A}_{CP}$: 0.0007±0.0005

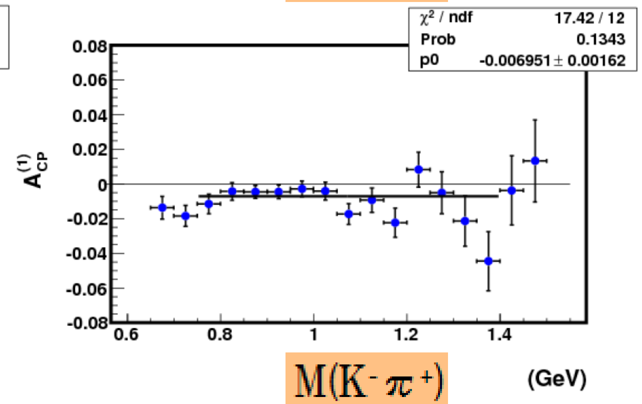
データでのsinβsinγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(1)}$

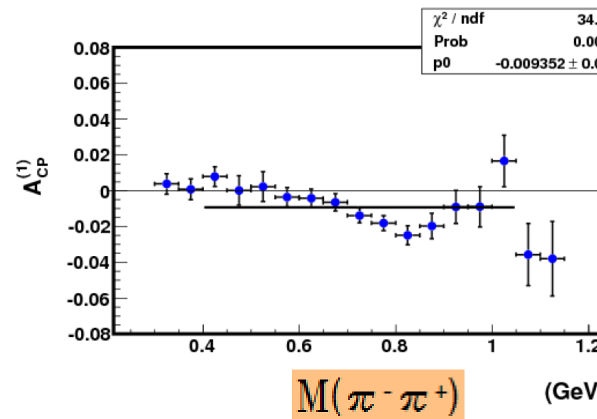












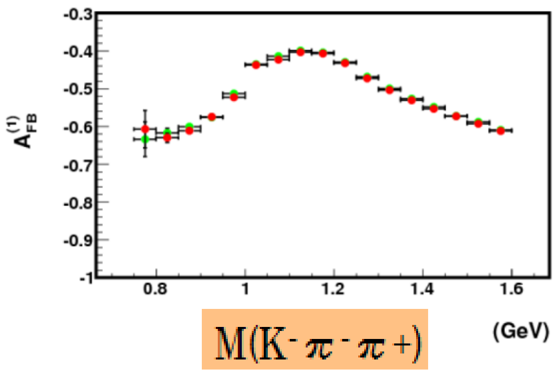
χ^2/ndf:21.55/12
prob:0.04
$\bar{A}_{CP}$:−0.0063±0.0016

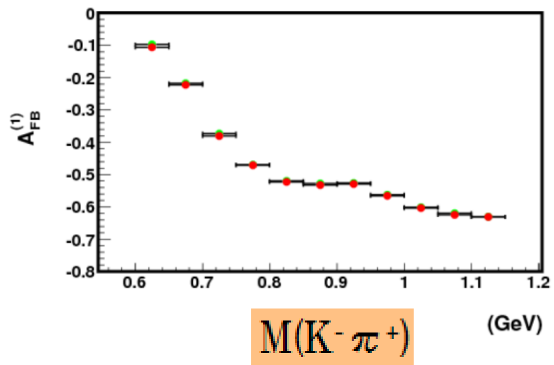
χ^2/ndf:17.42/12
prob:0.13
$\bar{A}_{CP}$:−0.0070±0.0016

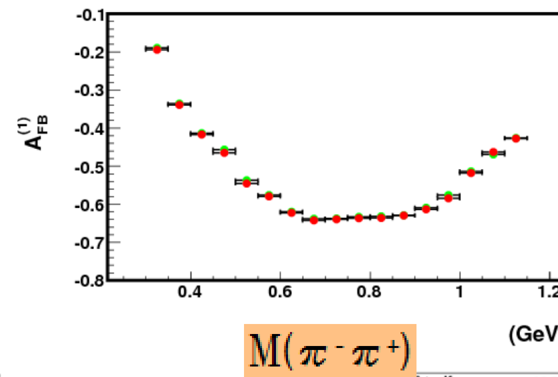
χ^2/ndf:34.78/12
prob:0.0005
$\bar{A}_{CP}$:−0.0094±0.0016

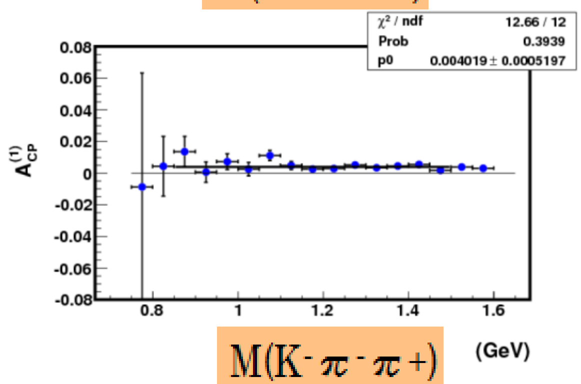
$\pi^-\pi^+$の分布で、約−1%の構造がみられる。

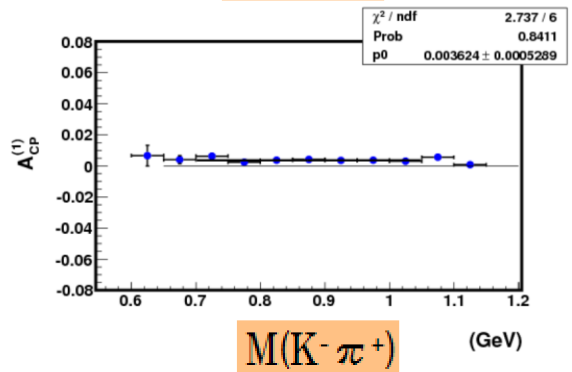
主なバックグラウンドである$\tau^- \to \pi^-\pi^-\pi^+\nu_\tau$事象の$\sin\beta\sin\gamma$に関するCP非対称度$A_{CP}^{(1)}$

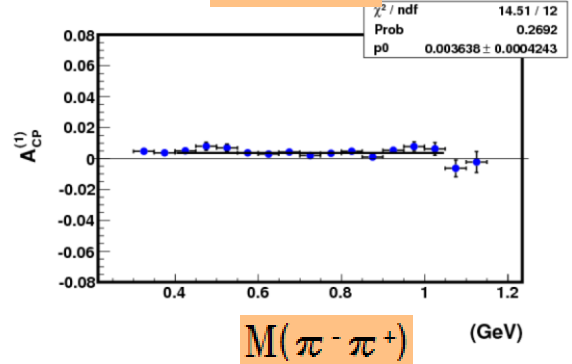










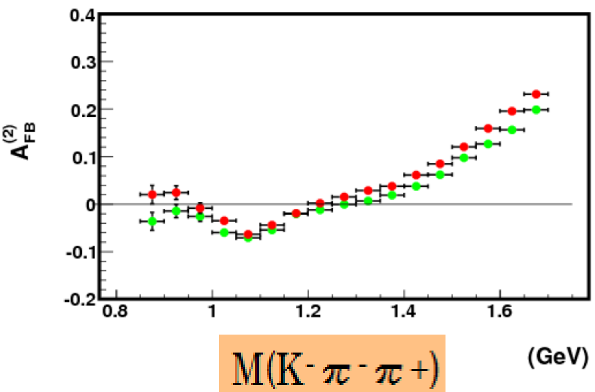


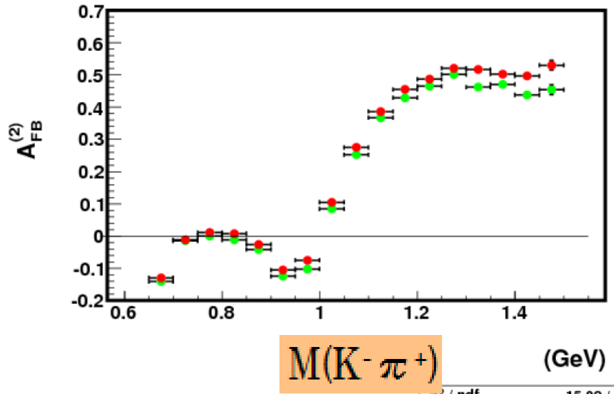
χ^2/ndf: 12.66/12
prob: 0.39
$\bar{A}_{CP}$: 0.0040±0.0005

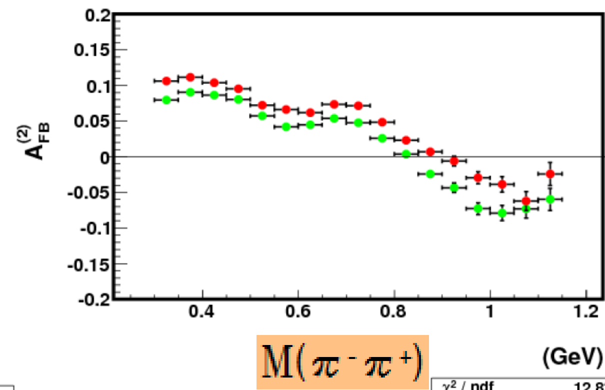
χ^2/ndf: 2.737/6
prob: 0.84
$\bar{A}_{CP}$: 0.0036±0.0005

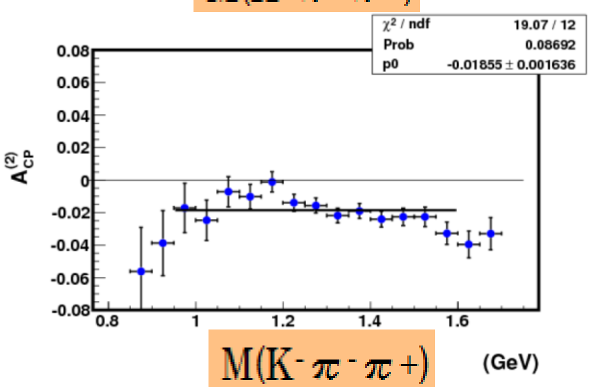
χ^2/ndf: 14.51/12
prob: 0.27
$\bar{A}_{CP}$: 0.0036±0.0004

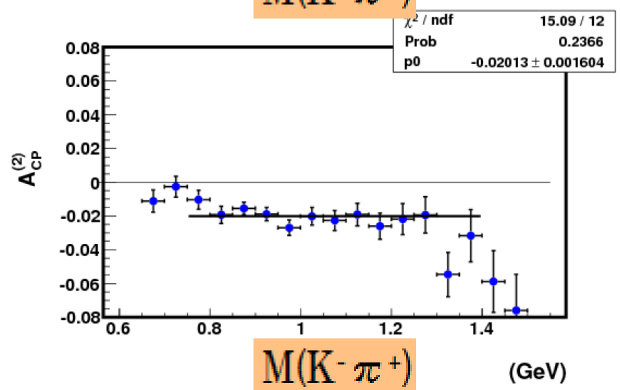
データでのsinβcosγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(2)}$

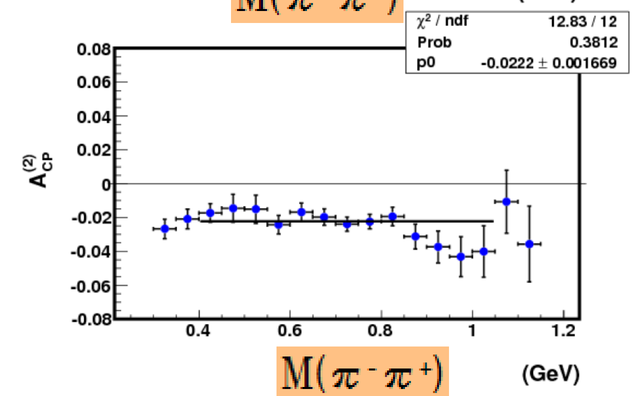












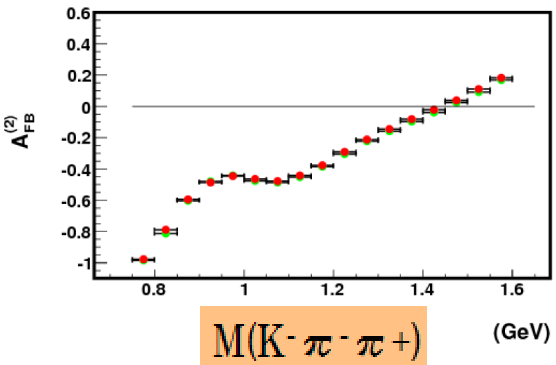
χ^2/ndf : 19.07/12
prob : 0.09
$\bar{A}_{CP}$: −0.0186±0.0016

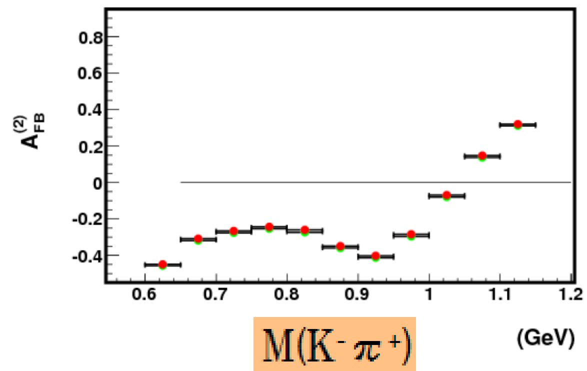
χ^2/ndf : 15.09/12
prob : 0.24
$\bar{A}_{CP}$: −0.0201±0.0016

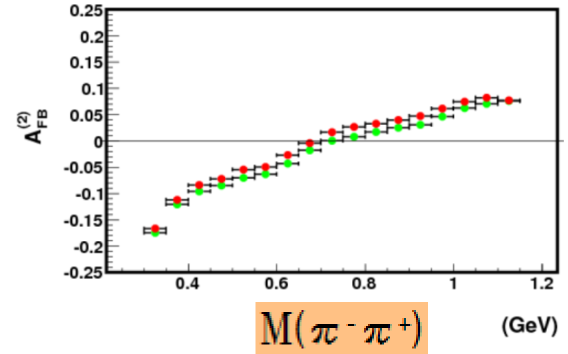
χ^2/ndf : 12.83/12
prob : 0.038
$\bar{A}_{CP}$: −0.0222±0.0017

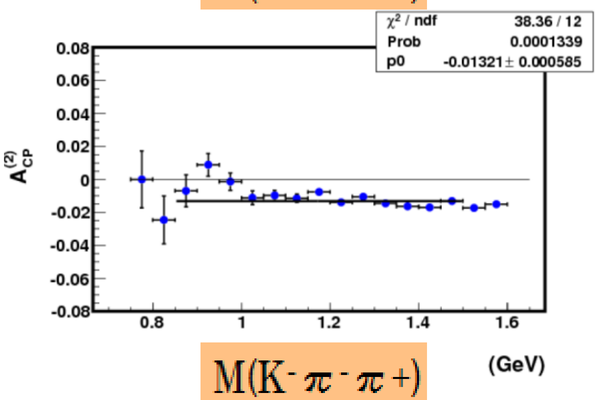
分布より、質量に依存しない約−2%のシフトがみられる。

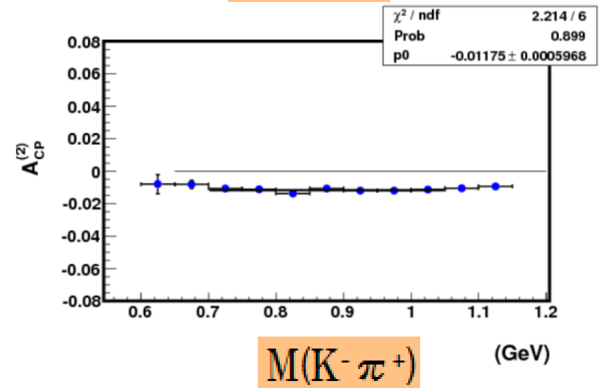
主なバックグラウンドであるτ⁻→π⁻π⁻π⁺ν τ事象のsinβcosγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(2)}$

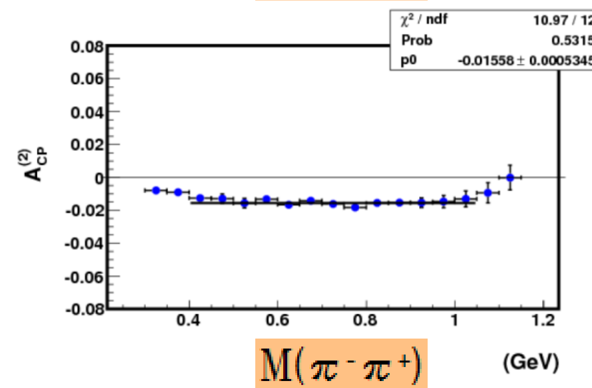












χ^2/ndf: 38.36/12
prob: 0.0001
$\bar{A}_{CP}$: −0.0132±0.0006

χ^2/ndf: 2.214/6
prob: 0.90
$\bar{A}_{CP}$: −0.0118±0.0006

χ^2/ndf: 10.97/12
prob: 0.53
$\bar{A}_{CP}$: −0.0156±0.0005

分布より、質量に依存しない約−1%のシフトがみられる。
これは、シグナルであるτ⁻→K⁻π⁻π⁺ν τ事象の場合とほぼ同じ結果。

データを用いた測定の結果

崩壊角	質量	$\bar{A}_{CP}$ $\tau^- \to K^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$	$\bar{A}_{CP}$ $\tau^- \to \pi^- \pi^- \pi^+ \nu_\tau$
cosβ	M(Kππ)	0.0002±0.0016	0.0006±0.0006
	M(Kπ)	−0.0002±0.0016	0.0007±0.0006
	M(ππ)	0.0001±0.0017	0.0007±0.0005
sinβsinγ	M(Kππ)	**−0.0063±0.0016**	0.004±0.0005
	M(Kπ)	**−0.0070±0.0016**	0.0036±0.0005
	M(ππ)	**−0.0094±0.0016**	0.0036±0.0004
sinβcosγ	M(Kππ)	−0.0186±0.0016	-0.0132±0.0006
	M(Kπ)	−0.0201±0.0016	-0.0118±0.0006
	M(ππ)	−0.0222±0.0017	-0.0156±0.0005
		シグナル	**バックグラウンド**

まとめ

- Belle実験で収集した665/fbのデータ（2000年～2006年）を用いた。

- **モンテカルロシミュレーションによるテスト**

generatorレベルと観測レベルの両方で、Acp＝0という仮定に無矛盾であることを確認した。

⇒τ粒子対のスピン-スピン相関の非対称度による影響や、検出器のバイアスの影響を無視することができる。

- **データを用いた測定**

cosβ ⇒ 3つの質量M(Kππ)、M(Kπ)、M(ππ)に関してAcp＝0という仮定に無矛盾

sinβsinγ ⇒ 質量M(Kππ)、M(Kπ)に関してAcp＝0という仮定に無矛盾
質量M(ππ)に関して約－1%の構造

sinβcosγ ⇒ 質量に依存しない約－2%のシフト

- 今後、これらの構造が何による影響かを考えることや、CPを破るモデルによる研究が必要である。

おわり

Back Up

ハドロン構造因子

$$B_1 = \tilde{J}^1 = [F_1(p_1 - p_3)^x + F_2(p_2 - p_3)^x]$$

$$B_2 = \tilde{J}^2 = (F_1 - F_2)p_1^y$$

$$B_3 = -i\tilde{J}^3 = F_3\sqrt{Q^2}p_1^x p_3^x$$

$$B_4 = \tilde{J}^0 = \sqrt{Q^2}\left[F_4 + \frac{f_H}{m_\tau}\eta_p\right]$$

NPにおけるCP対称性の破れの原因

cosβの定義

- **τ⁻の場合**

$$\cos\beta = \overrightarrow{n_L}\cdot\overrightarrow{n_\perp} = \overrightarrow{n_L}\cdot\left(\overrightarrow{p_1}\times\overrightarrow{p_2}\right)$$

$$\tau^-(\vec{p}_{123}) \to K^-(\vec{p}_1)\pi^-(\vec{p}_2)\pi^+(\vec{p}_3)\nu_\tau$$

CP変換

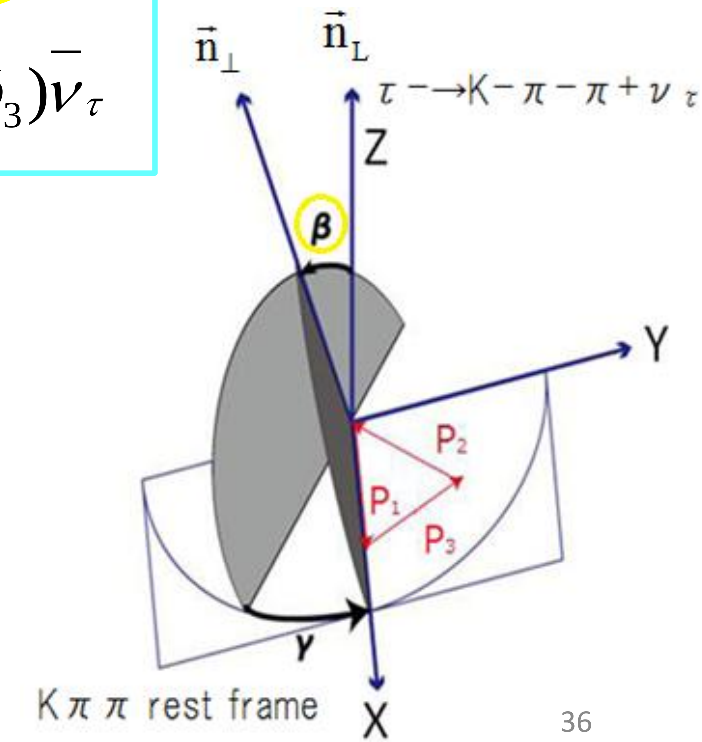
$$\tau^+(-\vec{p}_{123}) \to K^+(-\vec{p}_1)\pi^+(-\vec{p}_2)\pi^-(-\vec{p}_3)\bar{\nu}_\tau$$

- **τ⁺の場合**

$$\cos\beta = -\vec{n}_L\cdot\left((-\overrightarrow{p_1})\times(-\overrightarrow{p_2})\right)$$

$$\equiv -\vec{n}_L\cdot\left(\overrightarrow{p_1}\times\overrightarrow{p_2}\right)$$

τ^-とτ^+の場合で符号が反転する。

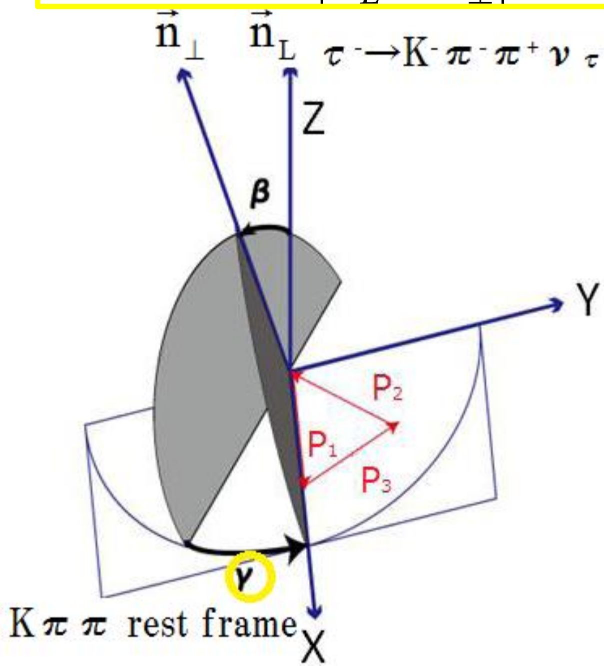


- **τ⁻の場合**

$$\vec{n}_\perp \equiv \frac{\vec{p}_1 \times \vec{p}_2}{|\vec{p}_1 \times \vec{p}_2|}$$

$$\cos\gamma = -\frac{\vec{n}_L \cdot \vec{p}_3}{|\vec{n}_L \times \vec{n}_\perp|}$$

$$\sin\gamma = \frac{(\vec{n}_L \times \vec{n}_\perp)\cdot \vec{p}_3}{|\vec{n}_L \times \vec{n}_\perp|}$$



- **τ⁺の場合**

$$\vec{n}_\perp \equiv \frac{(-\vec{p}_1)\times(-\vec{p}_2)}{|(-\vec{p}_1)\times(-\vec{p}_2)|} = \frac{\vec{p}_1 \times \vec{p}_2}{|\vec{p}_1 \times \vec{p}_2|}$$

$$\cos\gamma = -\frac{(-\vec{n}_L)\cdot(-\vec{p}_3)}{|(-\vec{n}_L)\times\vec{n}_\perp|} = -\frac{\vec{n}_L \cdot \vec{p}_3}{|\vec{n}_L \times \vec{n}_\perp|}$$

$$\sin\gamma = \frac{((-\vec{n}_L)\times\vec{n}_\perp)\cdot(-\vec{p}_3)}{|(-\vec{n}_L)\times\vec{n}_\perp|} = \frac{(\vec{n}_L \times \vec{n}_\perp)\cdot \vec{p}_3}{|\vec{n}_L \times \vec{n}_\perp|}$$

τ^-の場合と符号が同じ

τ^+の場合に$\sin\gamma$と$\cos\gamma$の符号を反転する必要がない。

CP非対称度A_{CP}の定義

・cosβの場合

前方後方非対称度の定義

$$A^{(3)}_{FB,i}(\tau^{\pm}) = \frac{\int_0^1 \frac{d\Gamma(\tau^{\pm})}{d\cos\beta}d\cos\beta - \int_{-1}^0 \frac{d\Gamma(\tau^{\pm})}{d\cos\beta}d\cos\beta}{\int_0^1 \frac{d\Gamma(\tau^{\pm})}{d\cos\beta}d\cos\beta + \int_{-1}^0 \frac{d\Gamma(\tau^{\pm})}{d\cos\beta}d\cos\beta} = \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)}\right)_{\tau^{\pm}}$$

ここで、iは質量ビンを表す。

N_i(cosβ>0) : i番目のビンにあり、cosβ>0の領域に存在する事象数
N_i(cosβ<0) : i番目のビンにあり、cosβ<0の領域に存在する事象数

CP非対称度の定義

$$A^{(3)}_{CP,i} \equiv A^{(3)}_{FB,i}(\tau^{-}) - A^{(3)}_{FB,i}(\tau^{+})$$

$$= \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)}\right)_{\tau^{-}} - \left(\frac{N_i(\cos\beta \geq 0) - N_i(\cos\beta \leq 0)}{N_i(\cos\beta \geq 0) + N_i(\cos\beta \leq 0)}\right)_{\tau^{+}}$$

cos β>0とcos β<0の差　　cos β>0とcos β<0の差

τ^-とτ^+の差

→このA$_{CP}$によりCPを破るcosβに関する項を抜き出すことができる。

・A_{CP}は非対称度の非対称度となっている。

CP非対称度A_{CP}の定義

前方後方非対称度の定義

- sinβsinγの場合

$$A^{(1)}_{FB,i}(\tau^{\pm}) = \left(\frac{N_i(\sin\beta\sin\gamma \geq 0) - N_i(\sin\beta\sin\gamma \leq 0)}{N_i(\sin\beta\sin\gamma \geq 0) + N_i(\sin\beta\sin\gamma \leq 0)}\right)_{\tau^{\pm}}$$

- sinβcosγの場合

$$A^{(2)}_{FB,i}(\tau^{\pm}) = \left(\frac{N_i(\sin\beta\cos\gamma \geq 0) - N_i(\sin\beta\cos\gamma \leq 0)}{N_i(\sin\beta\cos\gamma \geq 0) + N_i(\sin\beta\cos\gamma \leq 0)}\right)_{\tau^{\pm}}$$

CP非対称度の定義

- sinβsinγの場合

$$A^{(1)}_{CP} \equiv A^{(1)}_{FB,i}(\tau^{-}) - A^{(1)}_{FB,i}(\tau^{+})$$

$$= \boxed{\left(\frac{N_i(\sin\beta\sin\gamma \geq 0) - N_i(\sin\beta\sin\gamma \leq 0)}{N_i(\sin\beta\sin\gamma \geq 0) + N_i(\sin\beta\sin\gamma \leq 0)}\right)_{\tau^{-}}} - \boxed{\left(\frac{N_i(\sin\beta\sin\gamma \geq 0) - N_i(\sin\beta\sin\gamma \leq 0)}{N_i(\sin\beta\sin\gamma \geq 0) + N_i(\sin\beta\sin\gamma \leq 0)}\right)_{\tau^{+}}}$$

sin β sin γ >0とsin β sin γ <0の差

sin β sin γ >0とsin β sin γ <0の差

- sinβcosγの場合

$$A^{(2)}_{CP} \equiv A^{(2)}_{FB,i}(\tau^{-}) - A^{(2)}_{FB,i}(\tau^{+})$$

$$= \boxed{\left(\frac{N_i(\sin\beta\cos\gamma \geq 0) - N_i(\sin\beta\cos\gamma \leq 0)}{N_i(\sin\beta\cos\gamma \geq 0) + N_i(\sin\beta\cos\gamma \leq 0)}\right)_{\tau^{-}}} - \boxed{\left(\frac{N_i(\sin\beta\cos\gamma \geq 0) - N_i(\sin\beta\cos\gamma \leq 0)}{N_i(\sin\beta\cos\gamma \geq 0) + N_i(\sin\beta\cos\gamma \leq 0)}\right)_{\tau^{+}}}$$

sin β cos γ >0とsin β cos γ <0の差

sin β cos γ >0とsin β cos γ <0の差

χ2検定

・「結果がCP非対称度ゼロ」という仮定と統計的にどれだけ無矛盾かを評価。

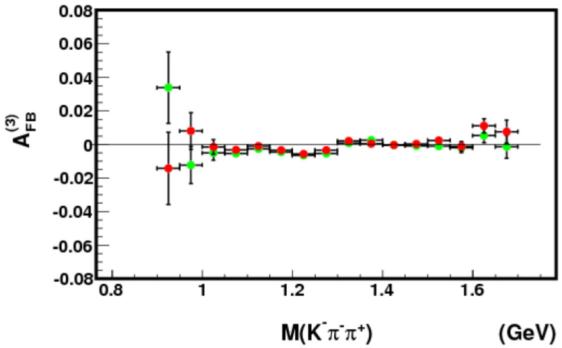
・フィット関数：ACP=0という直線からのずれからχ2を求めた。

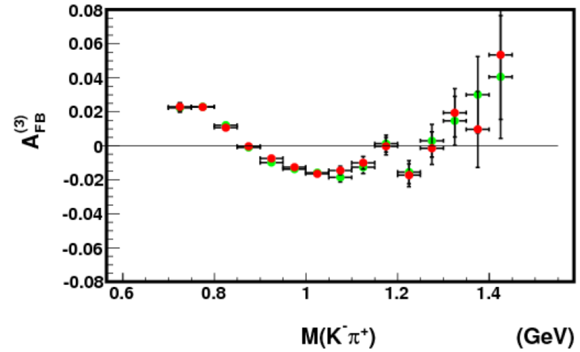
・χ2の値を持つ確率は、probとしている。

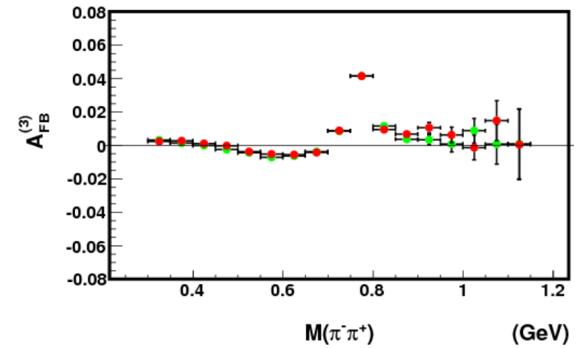
$$prob = \int_{\chi^2}^{\infty} f(z, ndf)dz$$

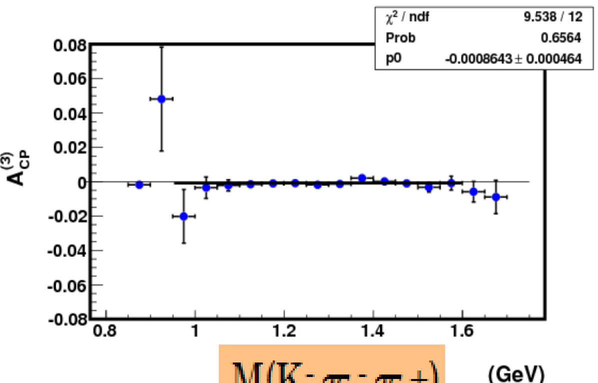
・Fはχ2の確率密度関数

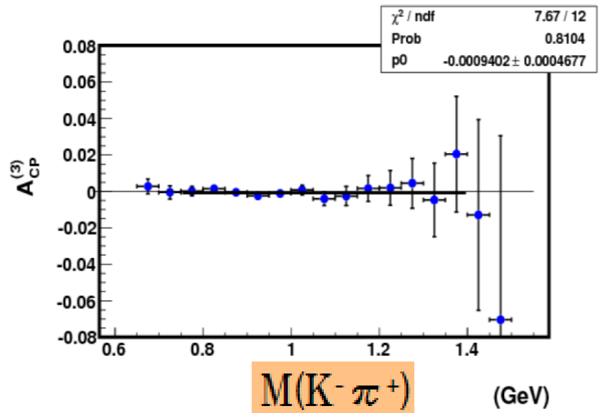
generatorレベルでのcosβに関するCP非対称度$A_{CP}^{(3)}$

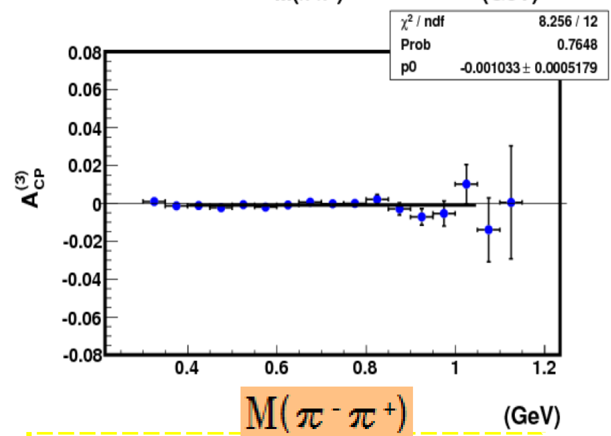












$M(K^- \pi^- \pi^+)$

$M(K^- \pi^+)$

$M(\pi^- \pi^+)$

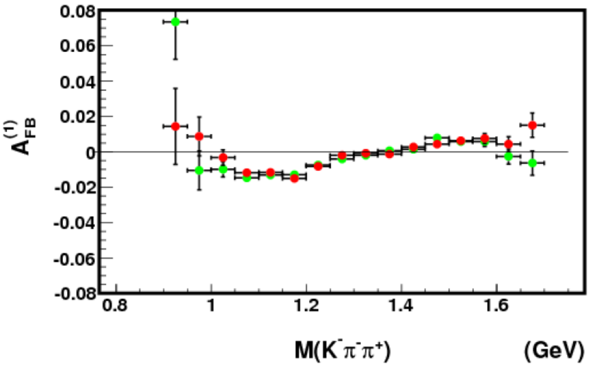
χ^2/ndf : 9.538/12
prob : 0.66
p^0 : −0.0009±0.0005

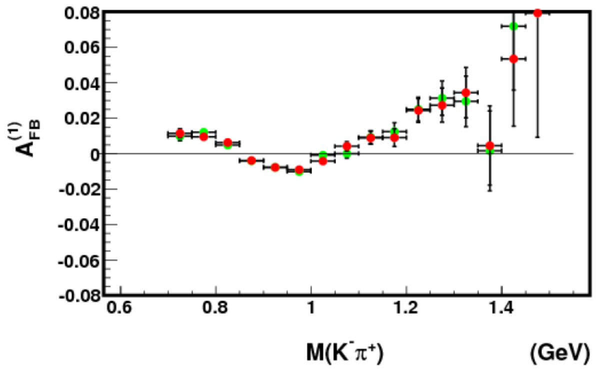
χ^2/ndf : 7.67/12
prob : 0.81
p^0 : −0.0009±0.0005

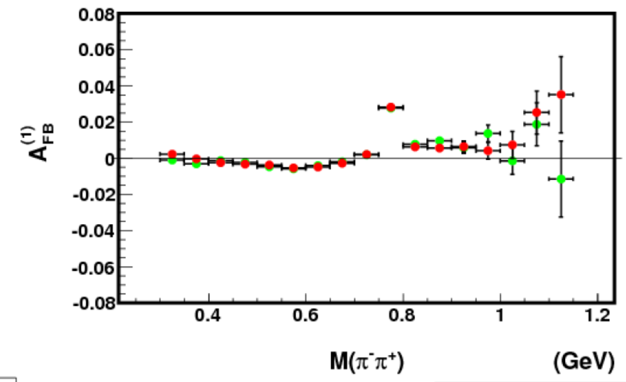
χ^2/ndf : 8.256/12
prob : 0.76
p^0 : −0.0010±0.0005

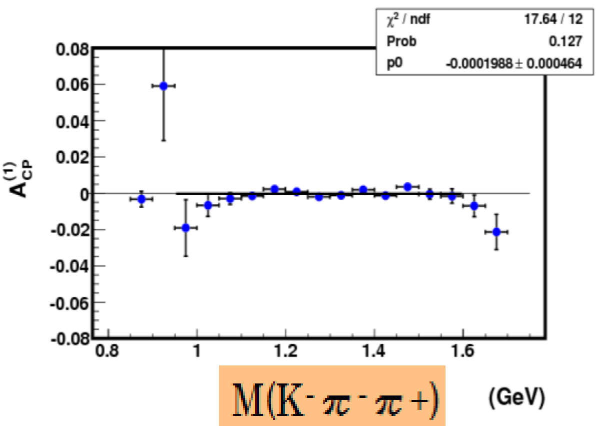
・定量的な評価：CP非対称度ゼロという仮定でχ^2を計算
（probはχ^2/ndfの値を持つ確率、p^0はCP 非対称度の平均値）

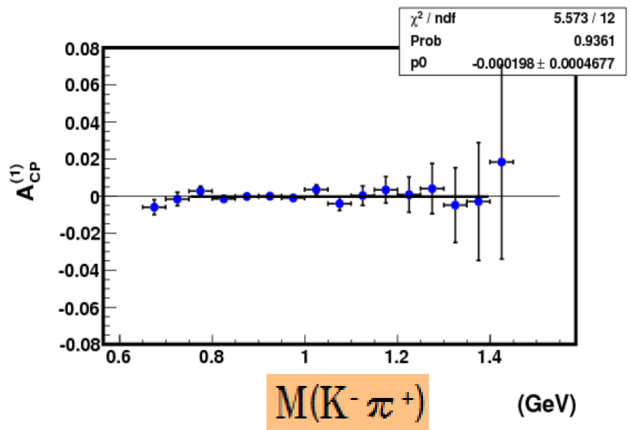
generatorレベルでのsinβsinγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(1)}$

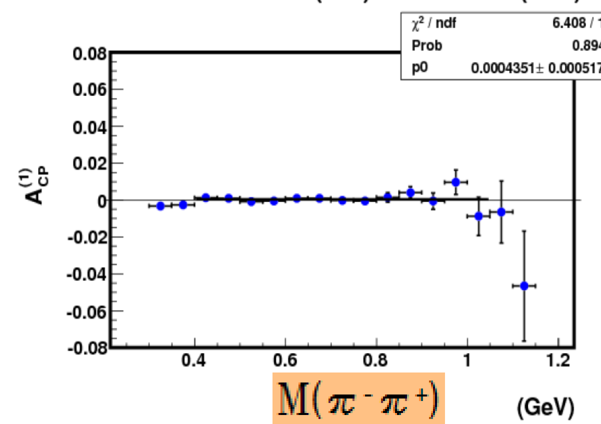










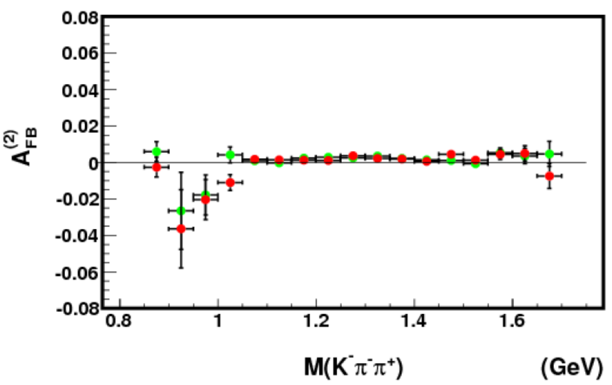


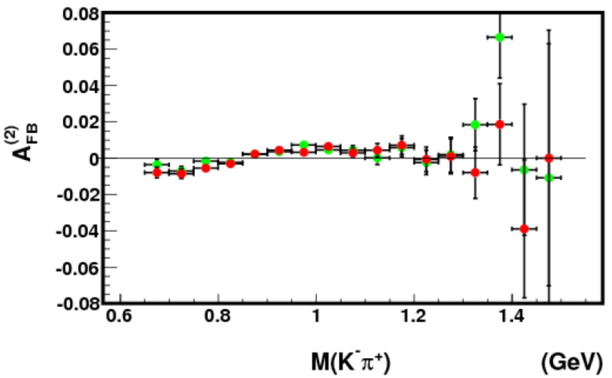
χ^2/ndf : 17.64/12
prob : 0.13
p^0 : −0.0002±0.0005

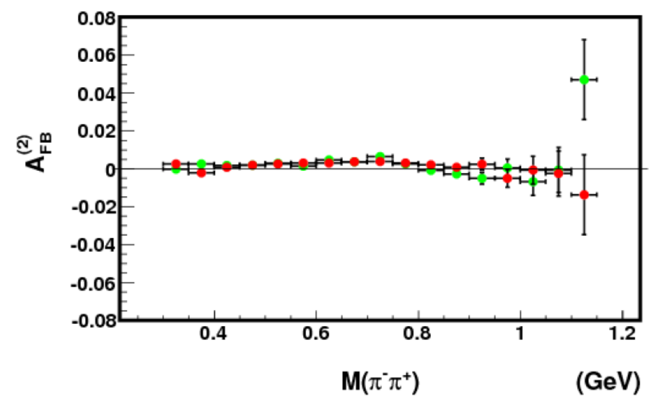
χ^2/ndf : 5.573/12
prob : 0.94
p^0 : −0.0002±0.0005

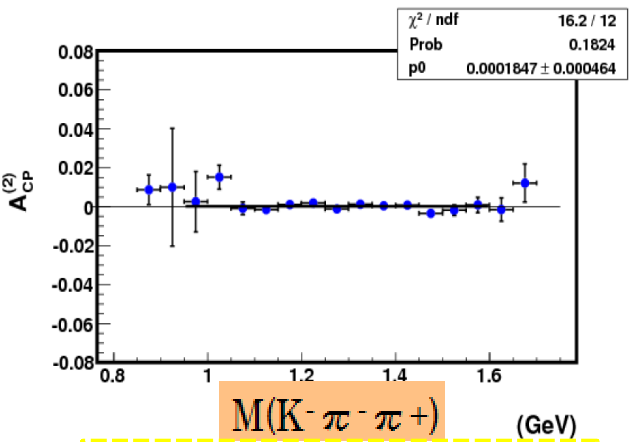
χ^2/ndf : 6.408/12
prob : 0.89
p^0 : −0.0004±0.0005

generatorレベルでのsinβcosγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(2)}$

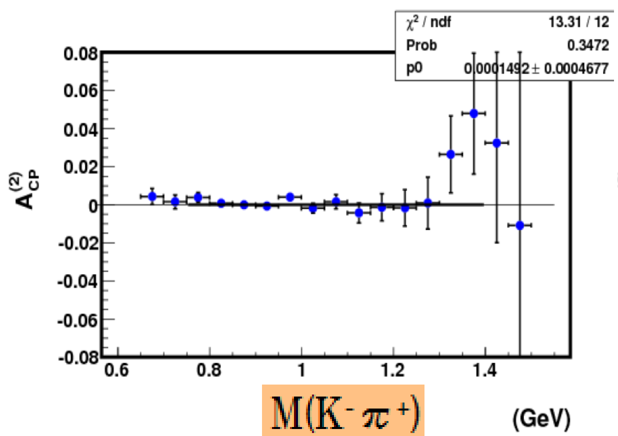




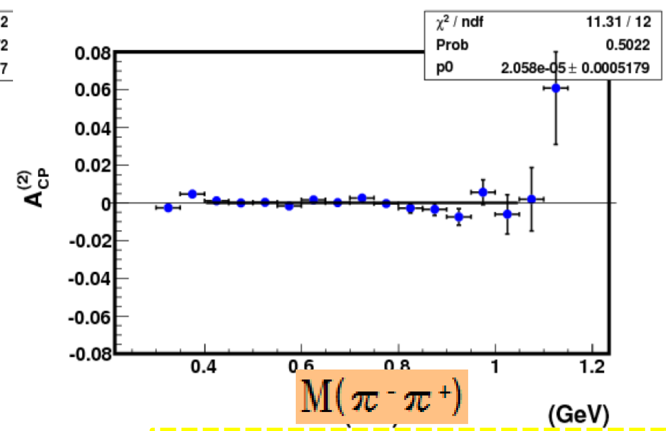




χ^2/ndf : 16.2/12
prob : 0.18
p^0 : 0.0002±0.0005

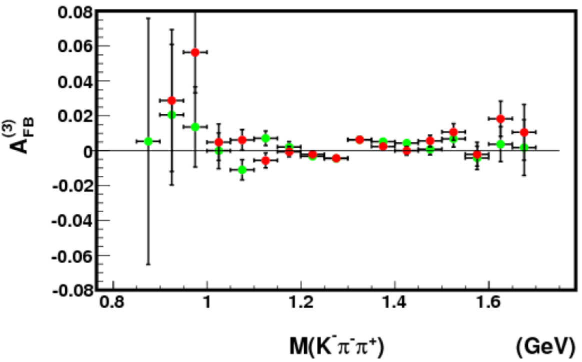


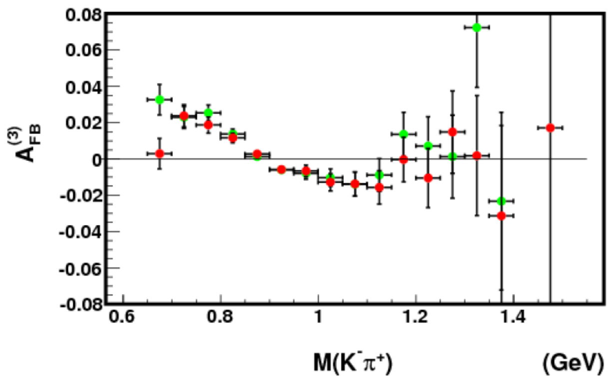
χ^2/ndf : 13.31/12
prob : 0.35
p^0 : 0.0001±0.0005

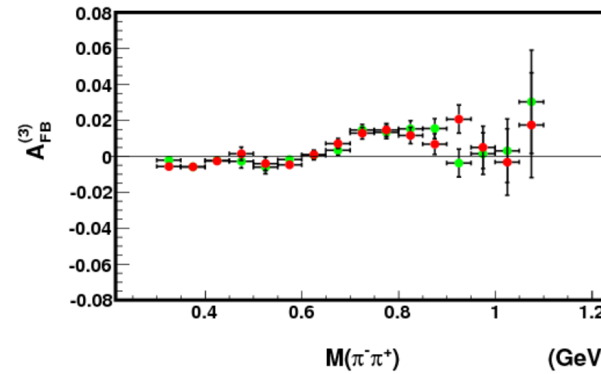


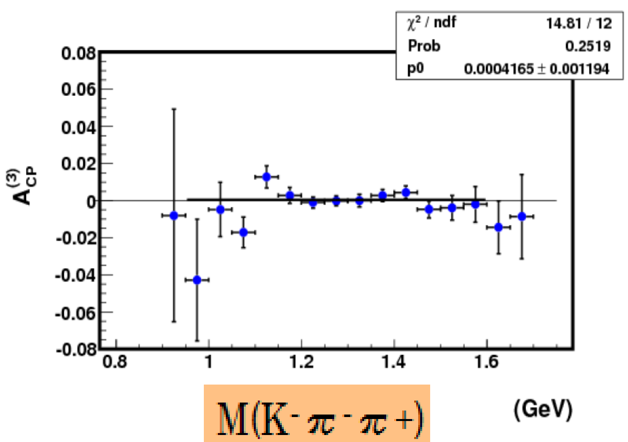
χ^2/ndf : 11.31/12
prob : 0.50
p^0 : 0.00002±0.0005

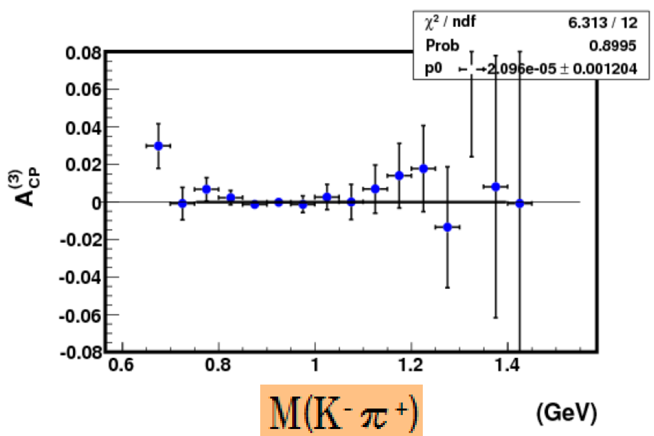
観測レベルでのcosβに関するCP非対称度$A_{CP}^{(3)}$

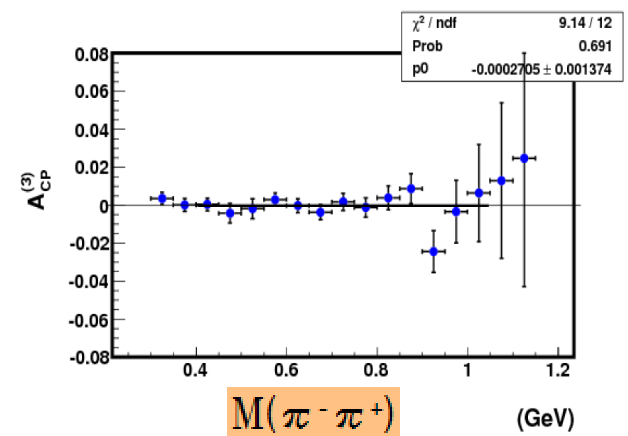










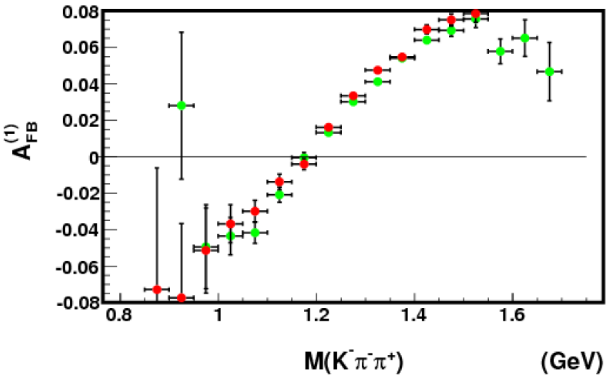


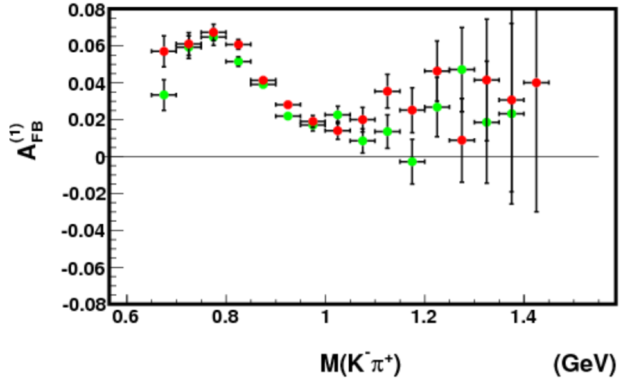
χ^2/ndf : 14.81/12
prob : 0.25
p^0 : 0.0004±0.0012

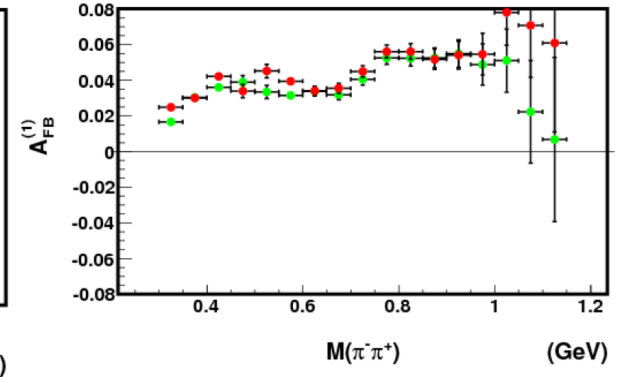
χ^2/ndf : 6.313/12
prob : 0.90
p^0 : −0.00002±0.0012

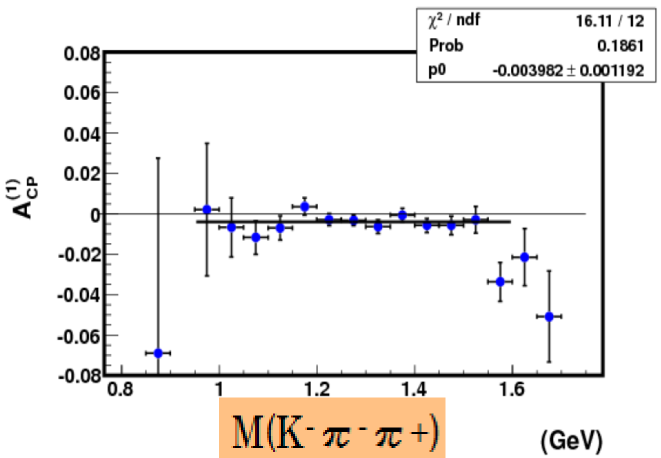
χ^2/ndf : 9.14/12
prob : 0.69
p^0 : −0.0003±0.0014

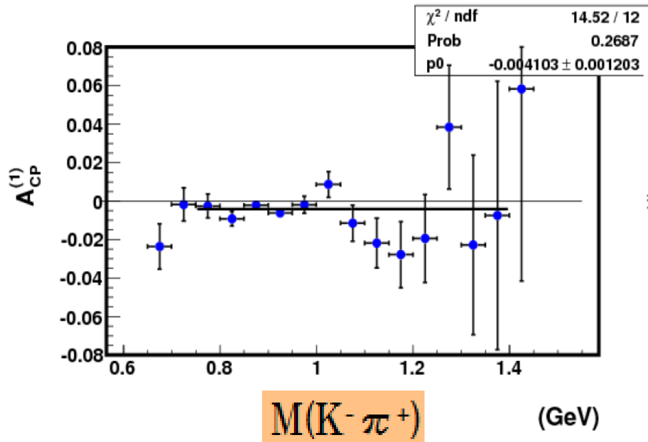
観測レベルでのsinβsinγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(1)}$

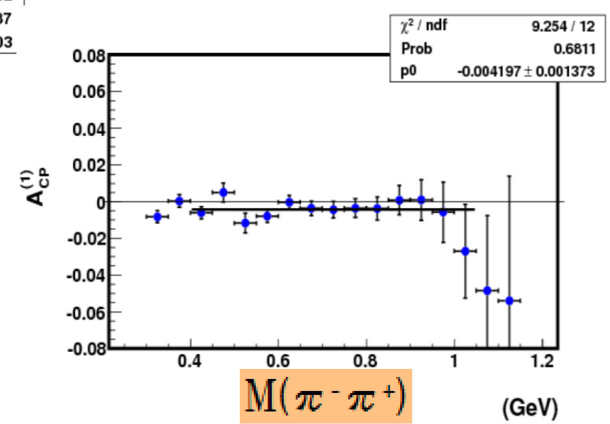










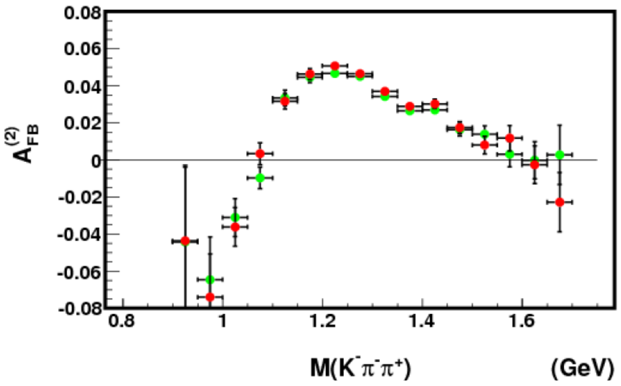


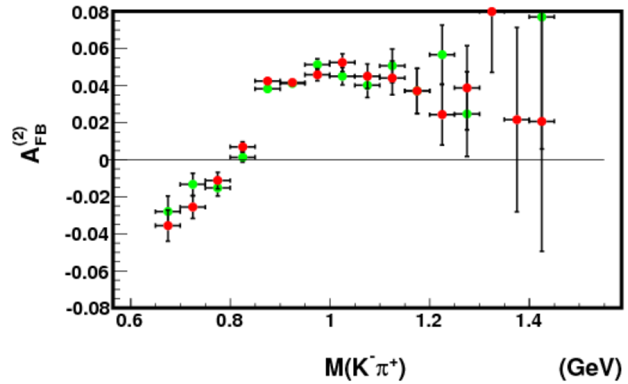
χ^2/ndf : 16.11/12
prob : 0.19
p^0 : −0.0040 ± 0.0012

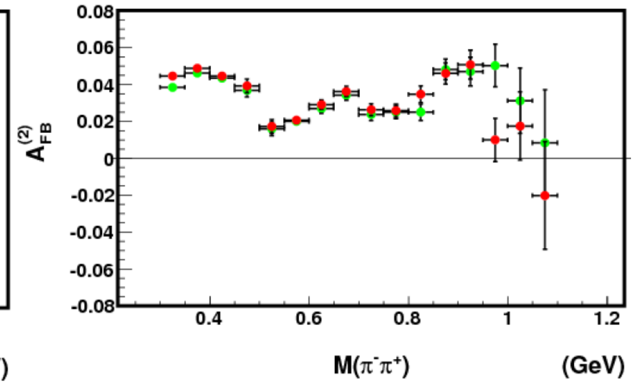
χ^2/ndf : 14.52/12
prob : 0.27
p^0 : −0.0041 ± 0.0012

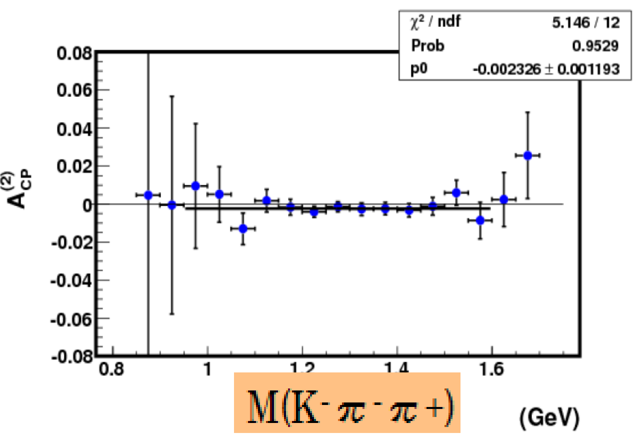
χ^2/ndf : 9.254/12
prob : 0.68
p^0 : −0.0042 ± 0.0014

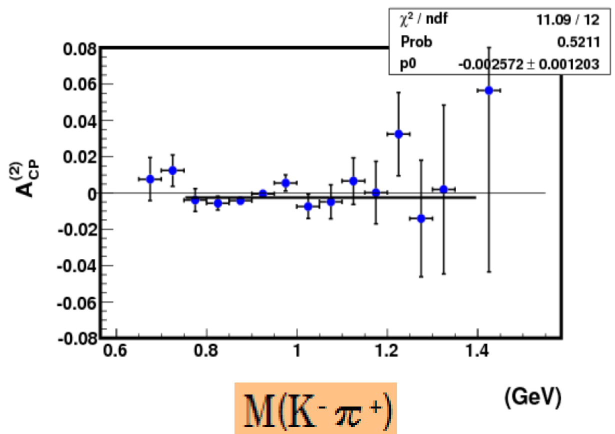
観測レベルでのsinβcosγに関するCP非対称度$A_{CP}^{(2)}$

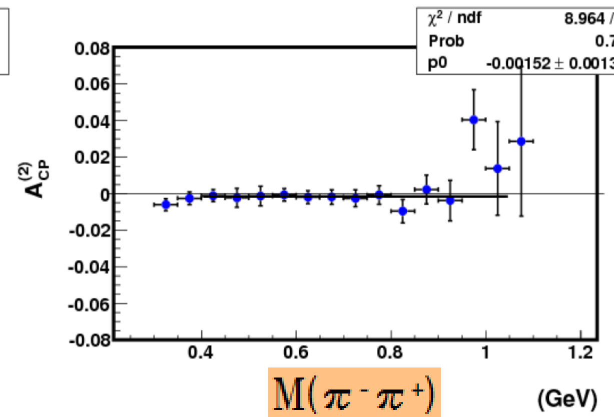












χ^2/ndf : 5.146/12
prob : 0.95
p^0 : −0.0023±0.0012

χ^2/ndf : 11.09/12
prob : 0.52
p^0 : −0.0026±0.0012

χ^2/ndf : 8.964/12
prob : 0.71
p^0 : −0.0015±0.0014