

$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の スペクトラル関数の測定

奈良女子大学大学院 人間文化研究科
物理学専攻 高エネルギー物理学研究室
木原理美

目次

1. 導入
2. 実験装置
3. 事象選別
4. $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ の不変質量分布
5. スペクトラル関数の測定
6. まとめ

1. 導入

● τ (タウ)粒子

- 第3世代に属するレプトン

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

- 電子の質量の約3500倍 ($M_\tau = 1.777 \text{ GeV}$)
- 質量が重い為、ハドロン崩壊が可能
(K^\pm 、 π^\pm 中間子やハドロン共鳴状態に崩壊)

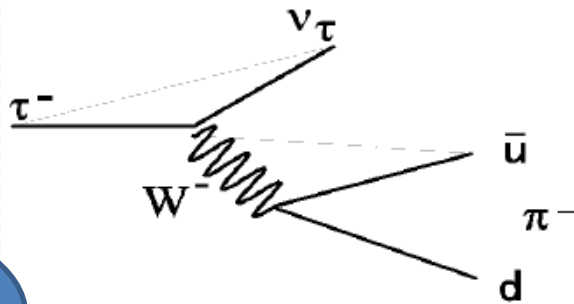
● τ 粒子のハドロン崩壊

- ハドロン状態を研究するのに理想的な系

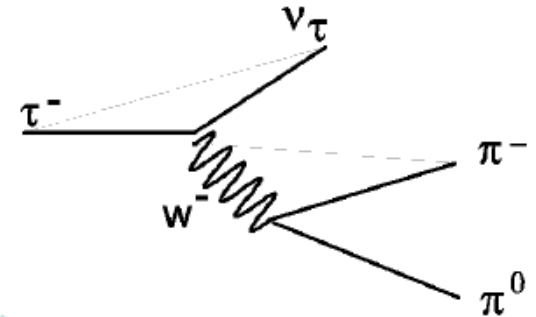
τ 粒子のハドロン崩壊の種類

τ 粒子のハドロン崩壊には、 π 中間子の数によって次のように分類出来る。

擬スカラー状態 ($J^P=0^-$)
 π 中間子が1個のみの崩壊

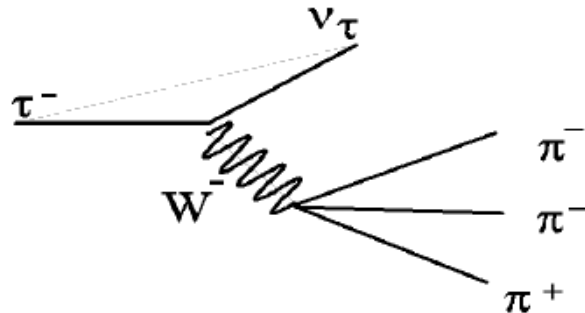


ベクター状態 ($J^P=1^-$)
 π 中間子が偶数個の崩壊

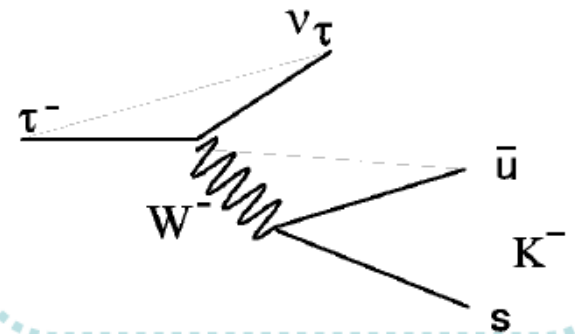


$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$
 は3 π 系なので
 軸ベクター状態

軸ベクター状態 ($J^P=1^+$)
 π 中間子が奇数個 (≥ 3 個)



ストレンジ状態 ($S = \pm 1$)
 K中間子を含む崩壊



α_s と τ 粒子のハドロン崩壊

- QCDで、強い相互作用の結合定数 α_s を最も精密に決めている系

τ 粒子のハドロン崩壊率 R_τ

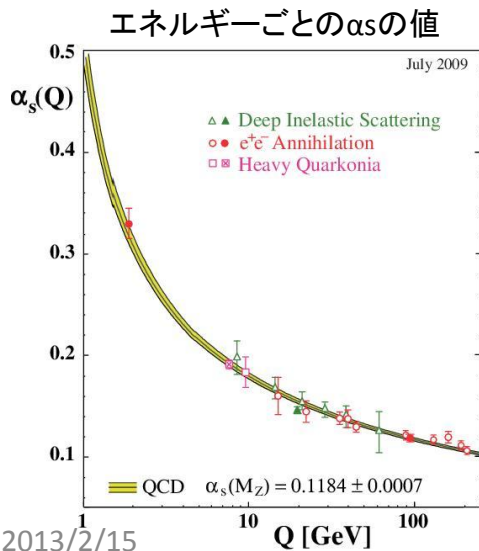
$$R_\tau = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \text{hadrons}\nu_\tau)}{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e\nu_\tau)} = 3.6380 \pm 0.000083$$

$$R_{\tau,V+A} = N_c |V_{ud}|^2 S_{EW} \{1 + \delta_P + \delta_{NP}\} \quad \left\{ \begin{array}{l} N_c = 3 \quad : \text{クォークのカラーの数} \\ S_{EW} = 1.0201 \pm 0.00003 \quad : \text{電磁放射補正} \\ \delta_{NP} \quad : \text{非摂動項} \rightarrow \text{求めるには実験データが必要} \end{array} \right.$$

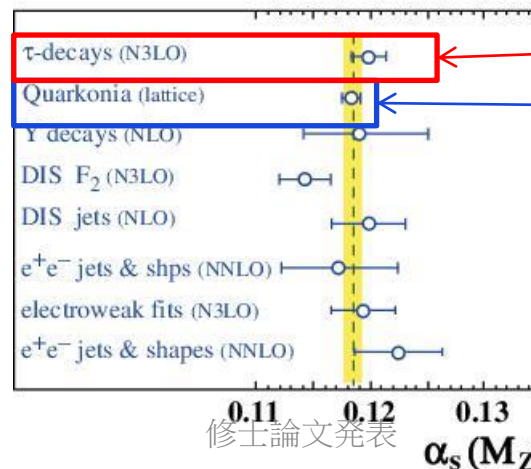
摂動項

$$\delta_P = \frac{\alpha_s(m_\tau^2)}{\pi} + 5.2023 \frac{\alpha_s^2(m_\tau^2)}{\pi^2} + 26.366 \frac{\alpha_s^3(m_\tau^2)}{\pi^3} + (78.003 + K_4) \frac{\alpha_s^4(m_\tau^2)}{\pi^4} + O(\alpha_s^5(m_\tau^2))$$

α_s : 強い相互作用の結合定数
 K_4 : 未知の数値



エネルギーが92GeVの時の α_s



τ 粒子の測定による結果
格子QCDによる計算結果

τ 粒子の結果が最も精度が高い。

τ 粒子のハドロン崩壊

- τ 粒子のハドロン崩壊率 R_τ の質量依存性を調べたい。
 - スペクトラル関数は、 R_τ の質量依存性に比例する。
- このために、軸ベクター状態やベクター状態のスペクトラル関数の測定を行なう事が求められている。
- R_τ はinclusiveな値なので全ての崩壊モードの分を足す必要があるが、実際の測定では各崩壊モードを1種類ずつ調べる。

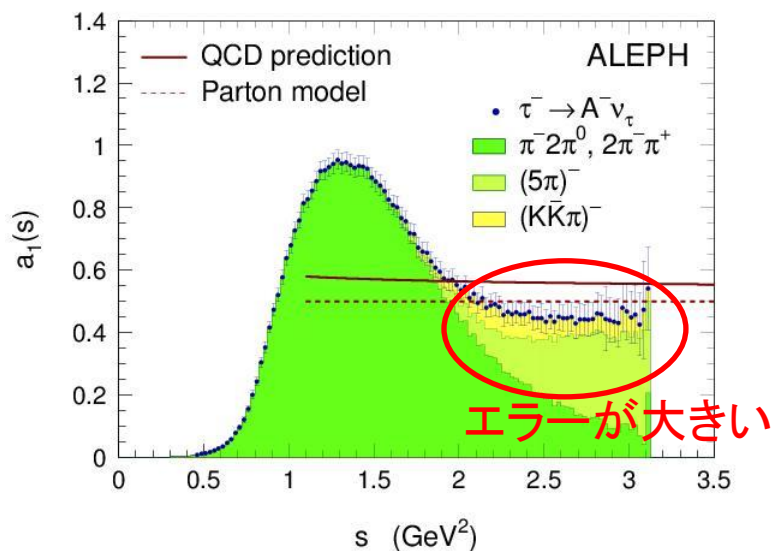


本研究では軸ベクター状態の1つである
 $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の測定を行なう。

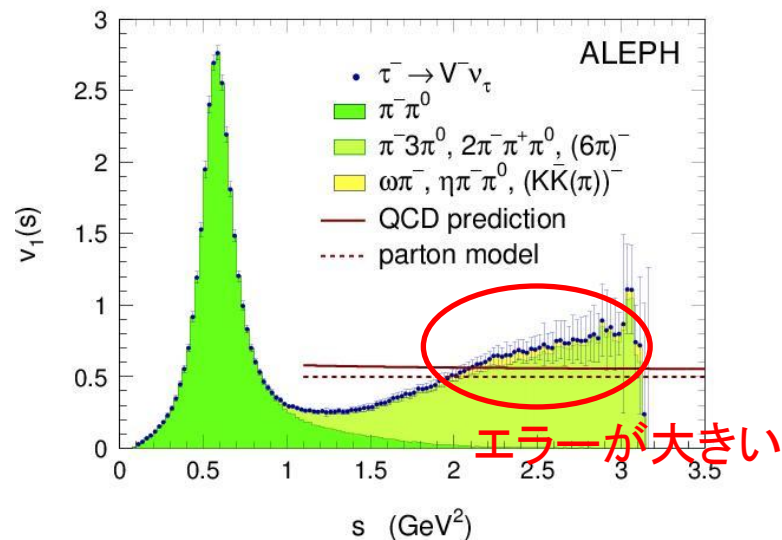
これまでの知見

● ALEPH実験のスペクトラル関数

スペクトラル関数(軸ベクター: 3π , 5π etc.)



スペクトラル関数(ベクター: 2π , 4π etc.)



どちらも、縦軸:スペクトラル関数 横軸:不変質量2乗

- 不変質量が大きい領域が興味深いが、現状ではエラーが大きく調べられない。
- Belle実験はこの100倍の量のデータがあるので、より精度良く測定出来る。
- 本研究では 3π 系の $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 v_\tau$ 崩壊を扱うので、軸ベクターのスペクトラル関数を求める。

本研究の目的

- Belle実験で収集した高統計のデータを使用して、

軸ベクター状態の主要な部分を占める 3π 系である
 $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊のスペクトラル関数の測定を行なうこと

特に過去の測定では不十分な高い質量領域で、精度の高い測定をする事が目的である。

2. 実験装置

● Belle測定器

生成された粒子を検出する為の複数の装置で構成

SVD : 粒子崩壊点の測定

CDC : 荷電粒子の飛跡や
運動量の測定

ACC : K^\pm と π^\pm の識別

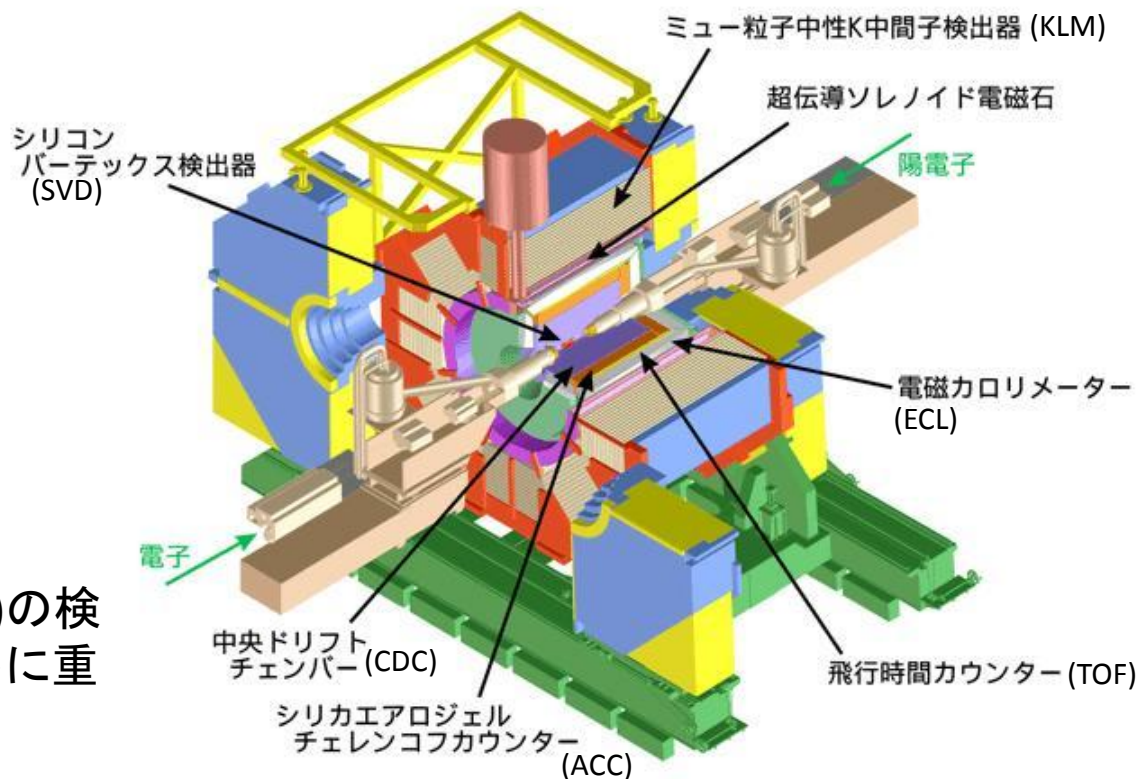
TOF : 荷電粒子の飛行時
間を測定

KLM : K_L, μ 粒子検出器

ECL : 電子や光子の
エネルギー測定



CsI(Tl)カウンターを使って光子(γ)の検出を行なうので、 $\pi^0(->\gamma\gamma)$ の検出に重要な役割を果たす。



3. 事象選別(1)

● $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 事象選別

Belle測定器で収集された全反応の中から τ 対生成を選び出すことが必要。

バックグラウンド・・・B中間子対生成, μ 対生成, $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ 崩壊

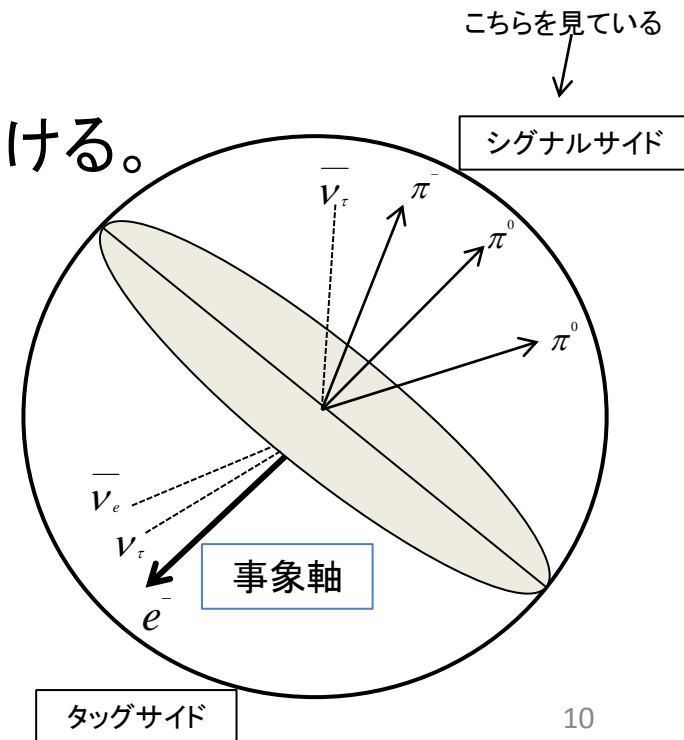
バーバー散乱($e^+e^- \rightarrow e^+e^- (\gamma)$)

二光子過程($e^+e^- \rightarrow e^+e^-l^+l^-$) $l=e,\mu$

● 事象を e^+e^- の重心系で2つの半球に分ける。

•荷電飛跡の中で他の荷電飛跡と 90° 以上離れており、かつ最も運動量の高いものの方向を事象軸と定義する。

•事象軸に垂直な面で2つの半球に分離した。



3. 事象選別(2)

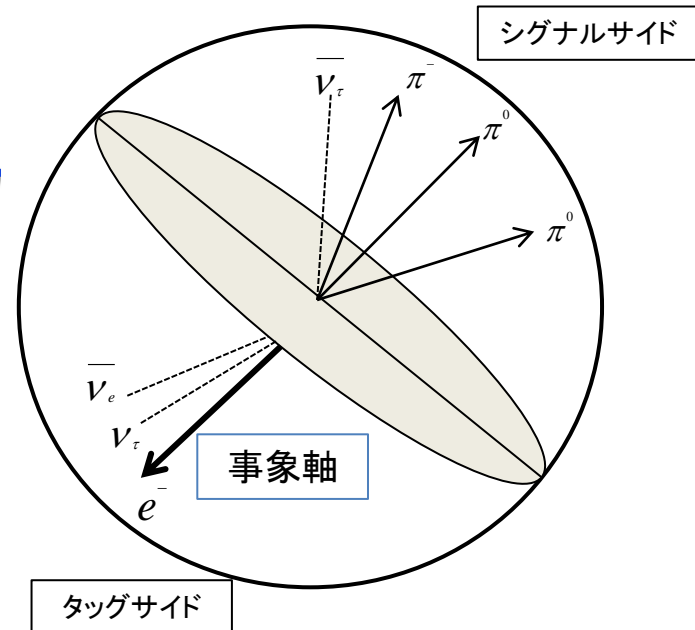
● $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の選別

・ シグナルサイド

- 荷電飛跡が1本
- 光子が4個以上
- 荷電飛跡が π^-
- π^0 が2個

・ タッグサイド

- 荷電飛跡が1本
- その飛跡が電子(e)かミューオン(μ)



$P(\pi/K) \geq 0.6$

次のページ
で詳しく説明

CDCでトラックあり
ECLで信号あり

CDCでトラックあり
KLMで信号あり

π^0 の選別

- π^0 には光子 (γ) が2個含まれている($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)。
 1. γ が4個以上ある事象を選ぶ。
 2. $S_{\gamma\gamma}$ を計算し、 $-10 < S_{\gamma\gamma} < 10$ を満たす事象を選ぶ。
 3. 2個の π^0 で γ の重複がない。

$S_{\gamma\gamma}$ の式

$$S_{\gamma\gamma} \equiv \frac{(m_{\gamma\gamma} - m_{\pi^0})}{\sigma_{\gamma\gamma}}$$

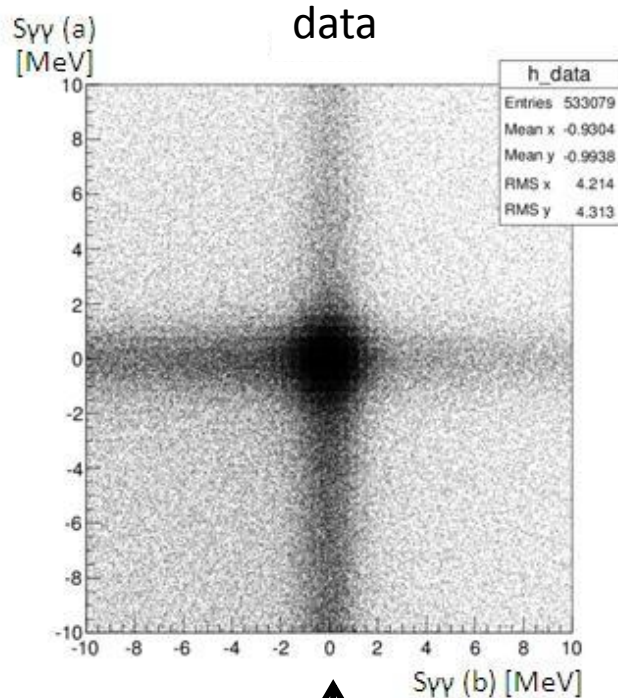
m_{π^0} : π^0 の質量 (=134.98MeV)

$m_{\gamma\gamma}$: 2つの光子の不変質量

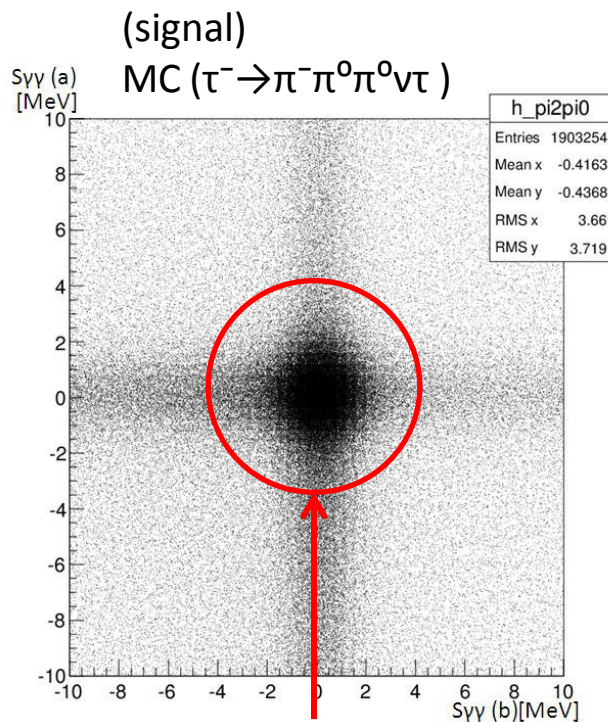
$\sigma_{\gamma\gamma}$: $m_{\gamma\gamma}$ の分解能 (5~8MeV)

π^0 の信号分布

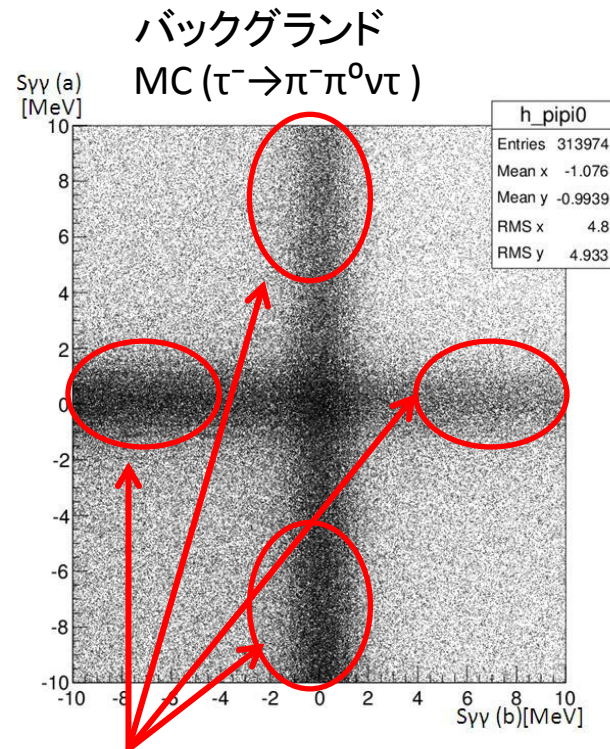
- MC(モンテカルロ)とデータでの $S_{\gamma\gamma}(a)$ vs $S_{\gamma\gamma}(b)$ の2次元プロット



バックグラウンドを含んでいる



比較的中央に
集まっている



π^0 が1個しかない分
この辺りにも多い

シグナル領域・サイドバンド領域の区分け

- より信号を効率よく取り出せるように、 S_{YY} の範囲を決める。
- この $S_{YY}(a)$ vs $S_{YY}(b)$ 2次元プロットで、以下のようにシグナル領域・サイドバンド領域を分けた。

- ・ シグナル領域 (赤)

$$-5 < S_{YY}(a) < 4, -5 < S_{YY}(b) < 4$$

- ・ サイドバンド領域

- B1 (青)

$$-10 < S_{YY}(a) < -6, -10 < S_{YY}(b) < -6$$

$$-10 < S_{YY}(a) < -6, 6 < S_{YY}(b) < 10$$

$$6 < S_{YY}(a) < 10, -10 < S_{YY}(b) < -6$$

$$6 < S_{YY}(a) < 10, 6 < S_{YY}(b) < 10$$

- B2 (紫)

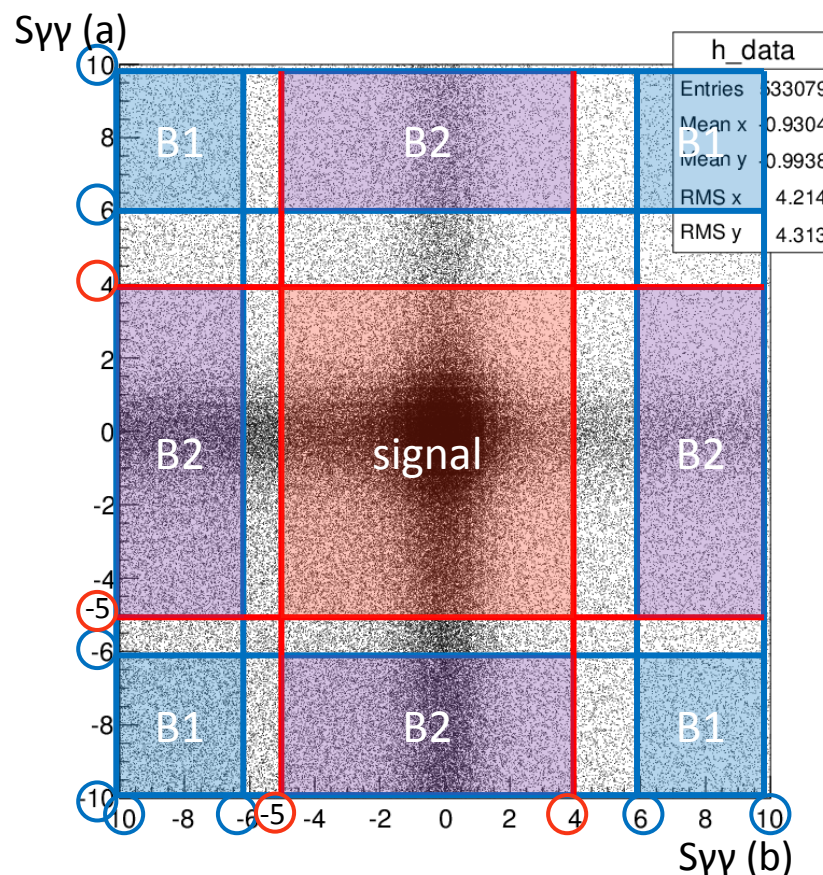
$$-10 < S_{YY}(a) < -6, -4 < S_{YY}(b) < 5$$

$$6 < S_{YY}(a) < 10, -4 < S_{YY}(b) < 5$$

$$-5 < S_{YY}(a) < 4, -10 < S_{YY}(b) < -6$$

$$-5 < S_{YY}(a) < 4, 6 < S_{YY}(b) < 10$$

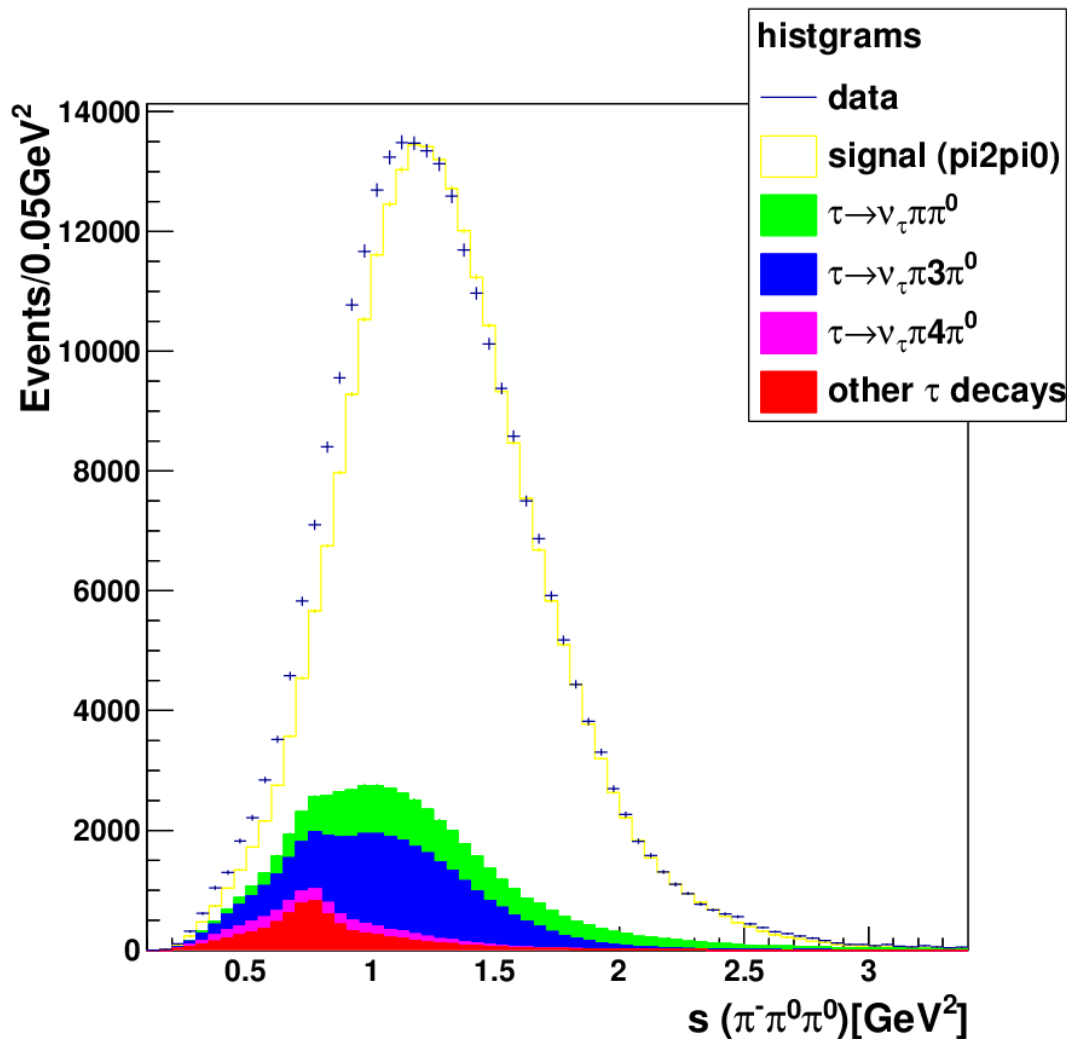
シグナル領域のみに絞ると、事象数は全体の64%となる。



$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ の選別の結果

Selection	efficiency (number of event)
< Signal side >	
①荷電飛跡が1本	
②光子が4個以上	49.19% (②/①)
③ π^0 が2個	66.97% (③/②) , 32.94% (③/①)
④荷電飛跡が π^-	94.36% (④/③)
< Tag side >	
⑤荷電飛跡が1本	88.70% (⑤/④) :Determined by B_1prong
⑥その飛跡が電子(e)かミューオン(μ)	39.77% (⑥/⑤) :Determined by Be,B μ
⑦シグナル領域に入っている	64.21% (⑦/⑥)
全ての条件	2.56%

4. $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ の不変質量分布



- 縦軸:事象数 横軸:不変質量2乗
- 点線がデータ、色のついた部分はモンテカルロで見積もったバックグラウンド。(672/fb data)

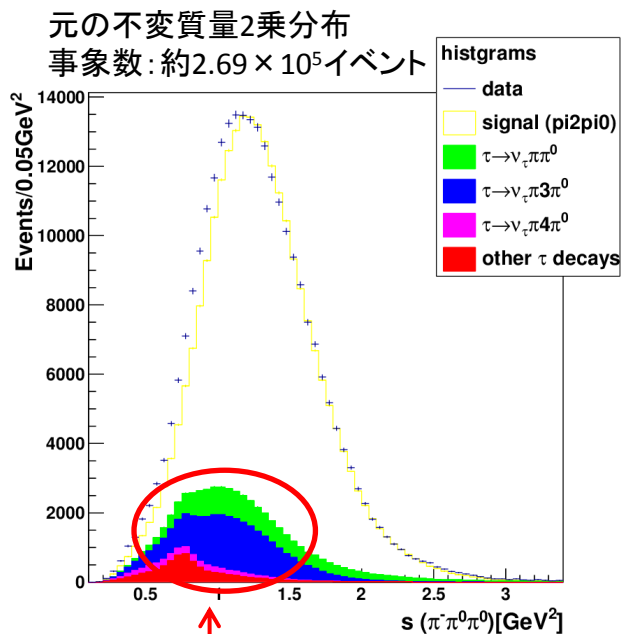
- $S(\pi^- \pi^0 \pi^0)$ は不変質量の2乗を表わす。

バックグラウンドの割合

Decay mode(back ground)	ratio
$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ (緑)	6.53%
$\tau^- \rightarrow \pi^- 3\pi^0 \nu_\tau$ (青)	10.28%
$\tau^- \rightarrow \pi^- 4\pi^0 \nu_\tau$ (ピンク)	1.56%
Other τ decays (赤)	2.53%

各binの統計誤差は1.3%
統計が多く、エラーは小さい。

データのバックグラウンド除去結果

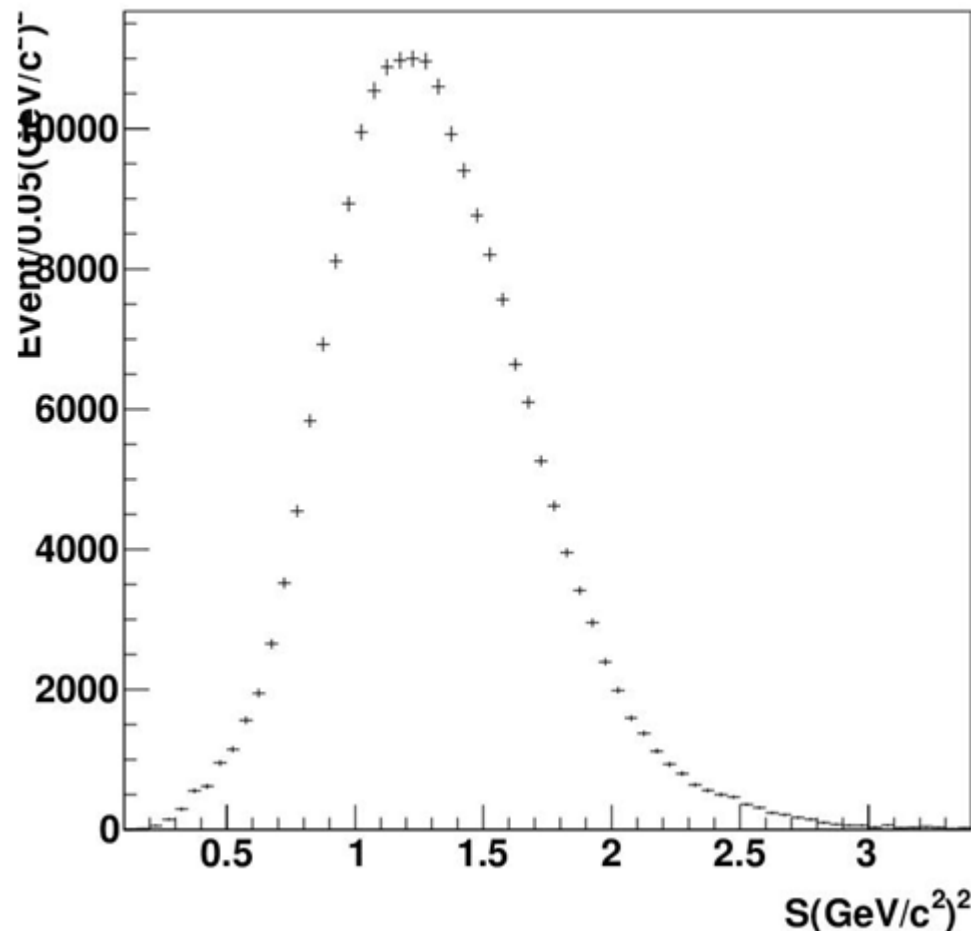


このバックグラウンド
を除去

事象数はバックグラウンド除去前と
比べて79.6%に減った。
統計誤差は1.6%

Data-BG

バックグラウンド除去後のデータの不変質量2乗分布
事象数: 約 2.14×10^5 イベント



5. スペクトラル関数の測定

- スペクトラル関数の計算までの流れ

1. データのアンフォールディング (unfolding)
2. スペクトラル関数の計算

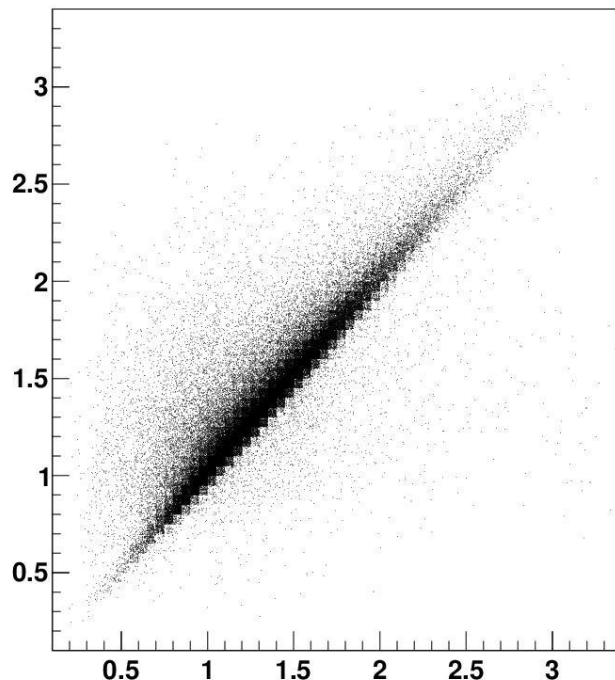
5-1. データのアンフォールディング

- アンフォールディング (unfolding) とは、測定器の有限な分解能と検出効率の補正を直す事。
- 今回使用したのは、SVD(Singular Value Decomposition)法。
- アンフォールディングの流れ
 1. MCによるアンフォールディングのテスト
 2. データを使ったアンフォールディング

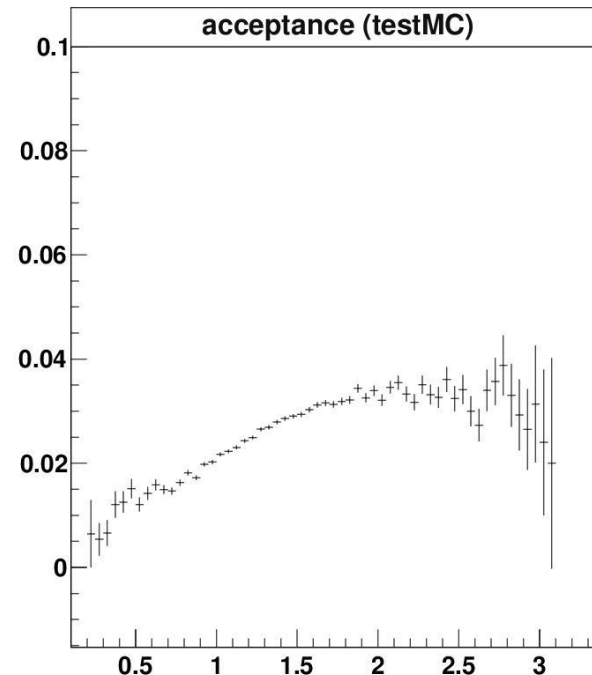
MCによるアンフォールディングのテスト

- データの代わりにMCを使用。
- MCは観測レベルの質量分布とMCで見積もった真の質量分布を読み、アンフォールディングを行なう。

observer and generator mass(square)



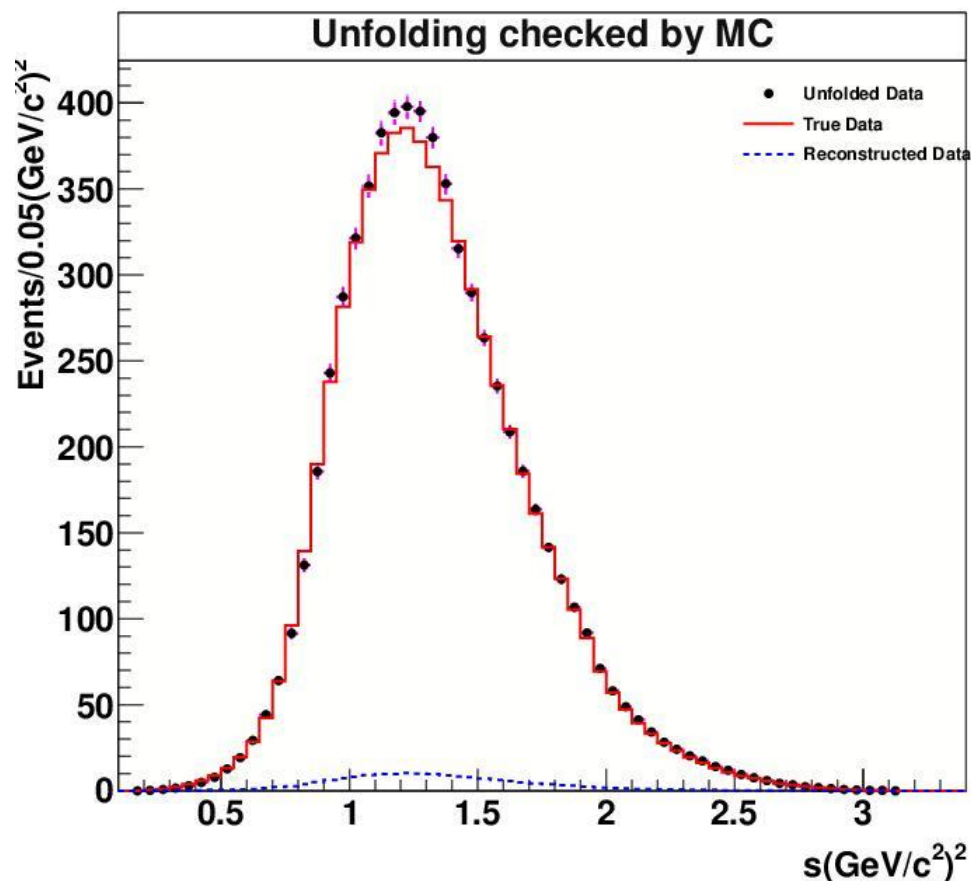
真の分布と再構成の分布の相関関係
縦軸: 真の分布 横軸: 観測レベル
(測定器の分解能の効果を表す)



アクセプタンス(検出効率)の質量依存性
縦軸: アクセプタンス 横軸: 不変質量2乗
全体のアクセプタンスは0.026(=2.6%)

アンフォールディングのテスト結果

アクセプタンスを加味したアンフォールディング後のデータ



黒点: アンフォールディング後の分布
青: 観測レベルの分布
赤: モンテカルロの真の分布
縦軸: 事象数 横軸: 不変質量²乗

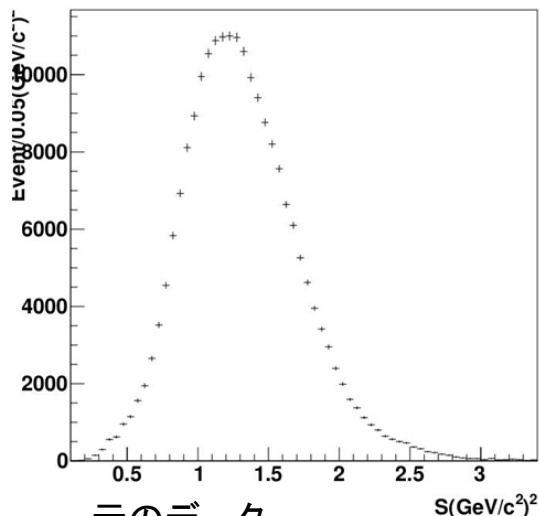
頂点付近の差は読み込んだモンテカルロの違いによるもの。

正常にアンフォールディングが出来ていたため、今度はデータを使ってアンフォールディングを行なう。

データのアンフォールディング結果

バックグラウンド除去後のデータを用いて、テストの時と同様にアンフォールディングを行なった。

Data-BG



元のデータ

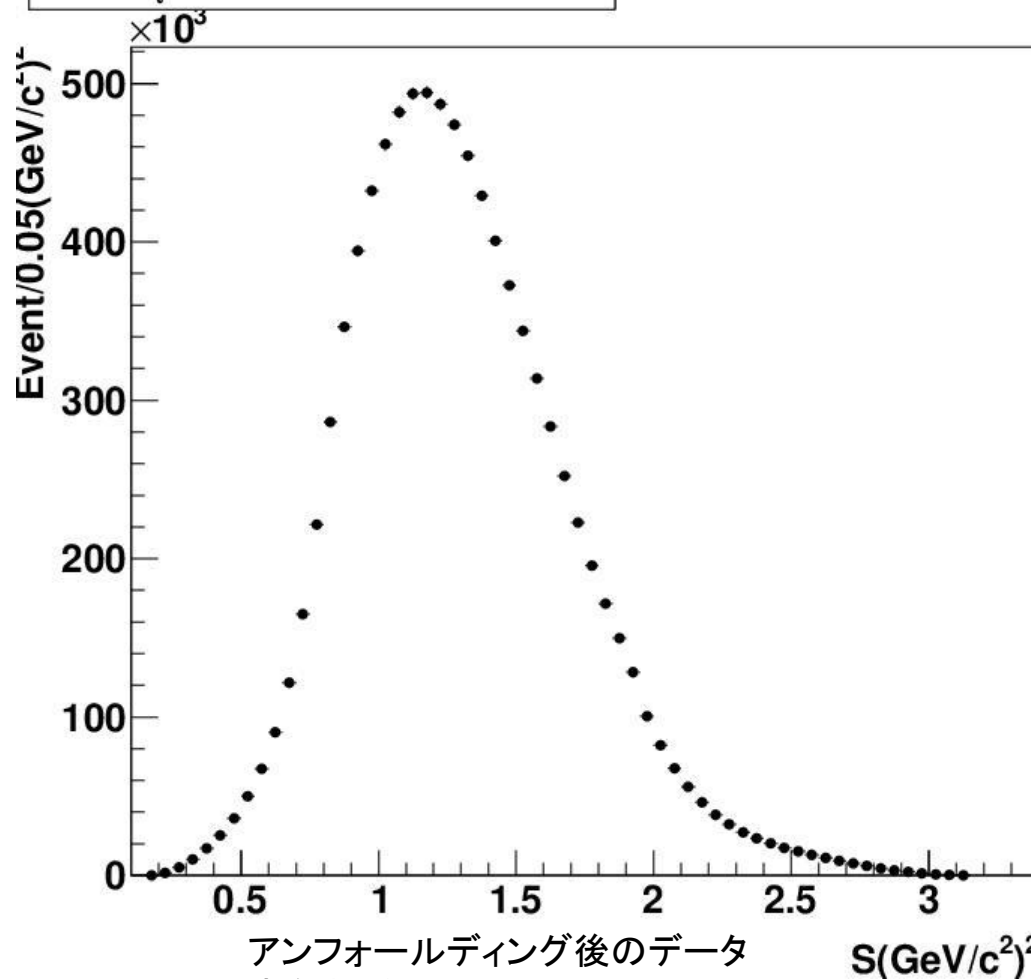
事象数: 約 2.14×10^5 イベント

縦軸: 事象数

横軸: 不変質量2乗

統計誤差は1.1%

$\tau \rightarrow \nu_\tau \pi^- \pi^0 \pi^0$ unfolded data



アンフォールディング後のデータ

事象数: 約 8.54×10^6 イベント

5-2. スペクトラル関数の計算

● スペクトラル関数の式 $a(s)$ ($a(s)$: 軸ベクター)

$$a(s) = \frac{m_\tau^2}{6|V_{ud}|^2(1 - \frac{s}{m_\tau^2})^2(1 + \frac{2s}{m_\tau^2})S_{EW}} \left(\frac{\mathcal{B}_{\pi^2\pi^0}}{\mathcal{B}_e} \right) \left(\frac{1}{N_{\pi^2\pi^0}} \frac{dN_{\pi^2\pi^0}}{ds} \right)$$

m_τ^2 ... τ の質量の2乗 (=1.777² GeV²)

S_{EW} ... 放射補正 (=1.0198)

V_{ud} ... CKM行列の成分 (=0.97425)

\mathcal{B}_e ... $\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$ 崩壊分岐比 (=17.83%)

$\mathcal{B}_{\pi^2\pi^0}$... $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊分岐比 (=9.30%)

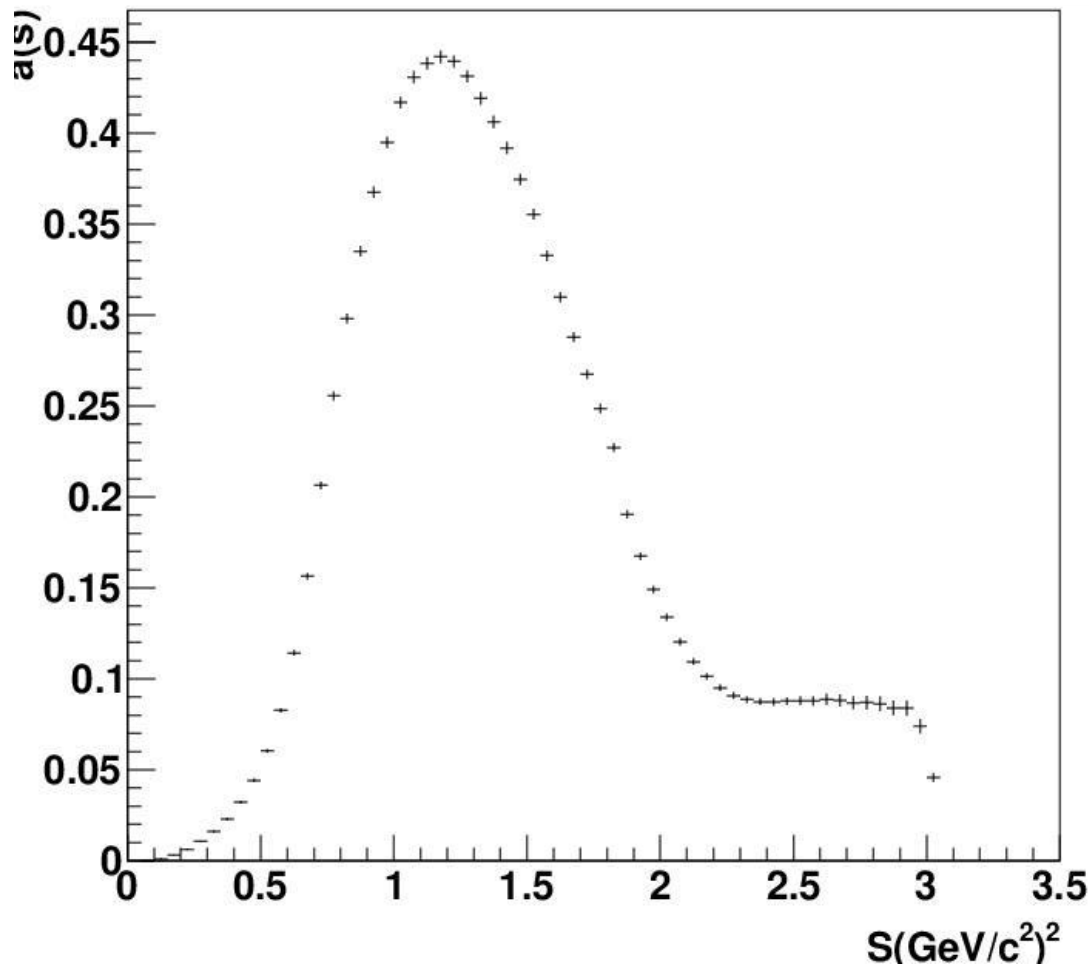
s ... 不変質量2乗

$\frac{1}{N_{\pi^2\pi^0}} \frac{dN_{\pi^2\pi^0}}{ds}$... normalizeした質量分布 → 今回の測定

$N_{\pi^2\pi^0}$... 全事象数 (= 約8.54 × 10⁶ イベント)

得られたスペクトラル関数

$\tau \rightarrow \nu_{\tau} \pi^{-} \pi^0 \pi^0$ spectral function



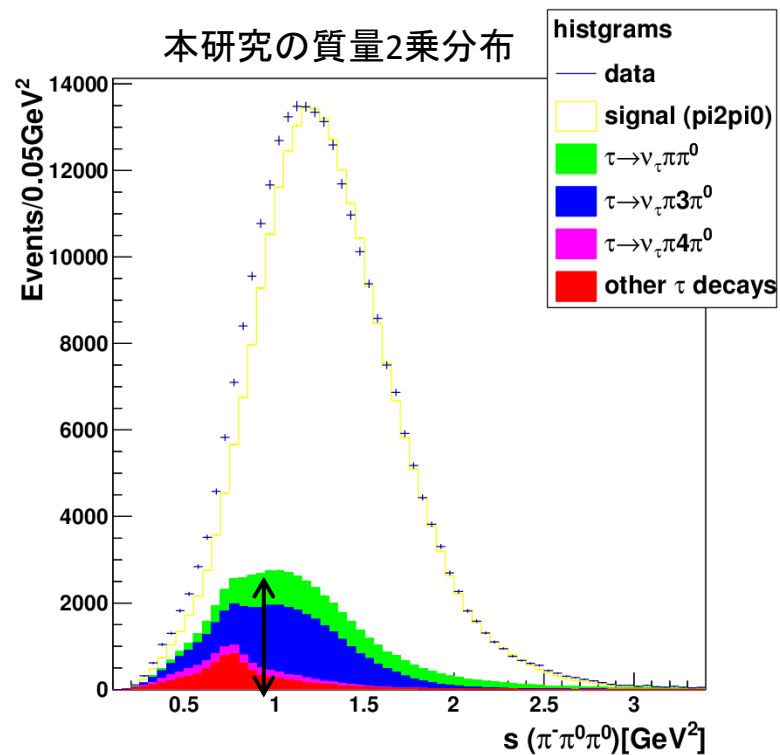
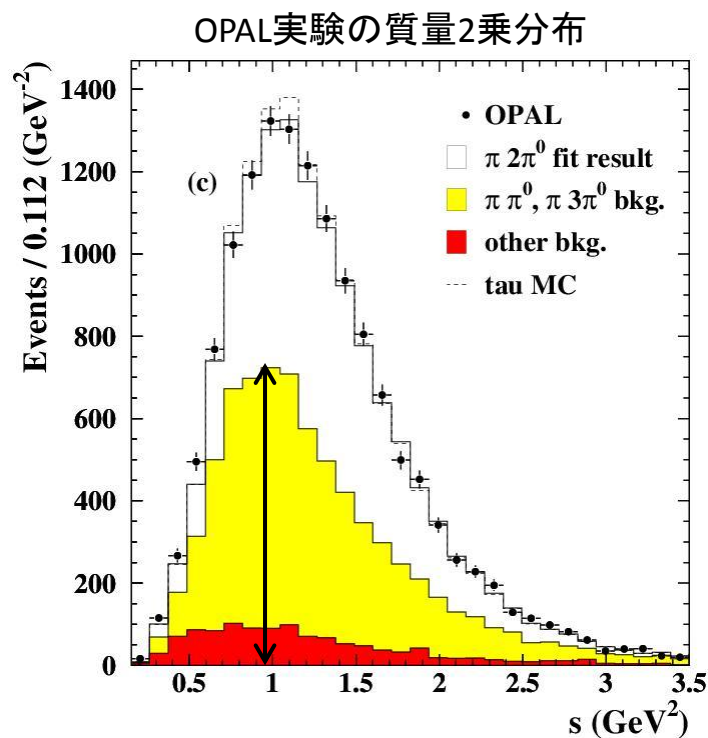
アンフォールディング後の
データでスペクトラル関数を
計算した。

縦軸: スペクトラル関数 $a(s)$
(軸ベクター)
横軸: 不変質量 2 乗

統計誤差は1.3%

他の実験との比較

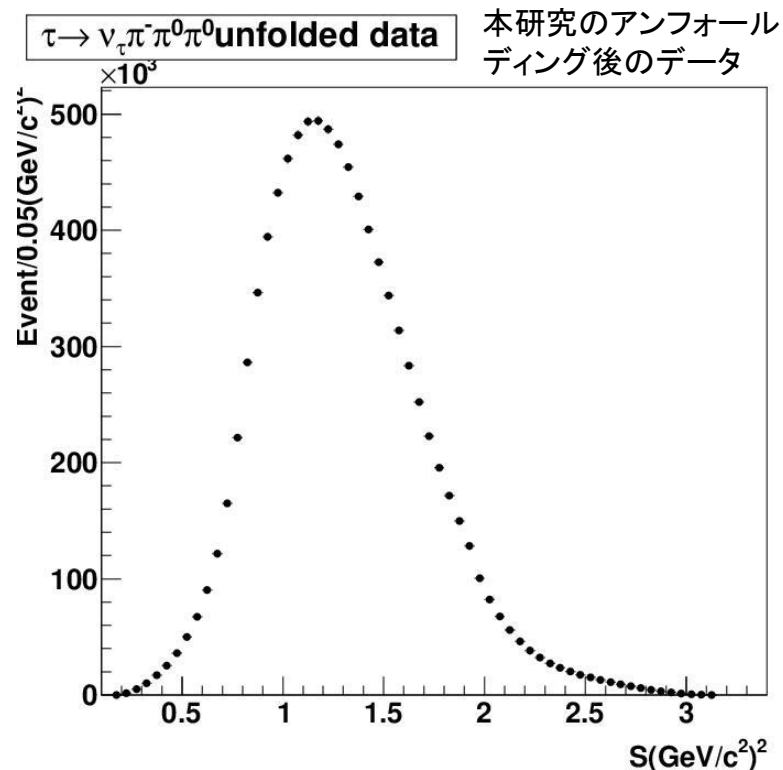
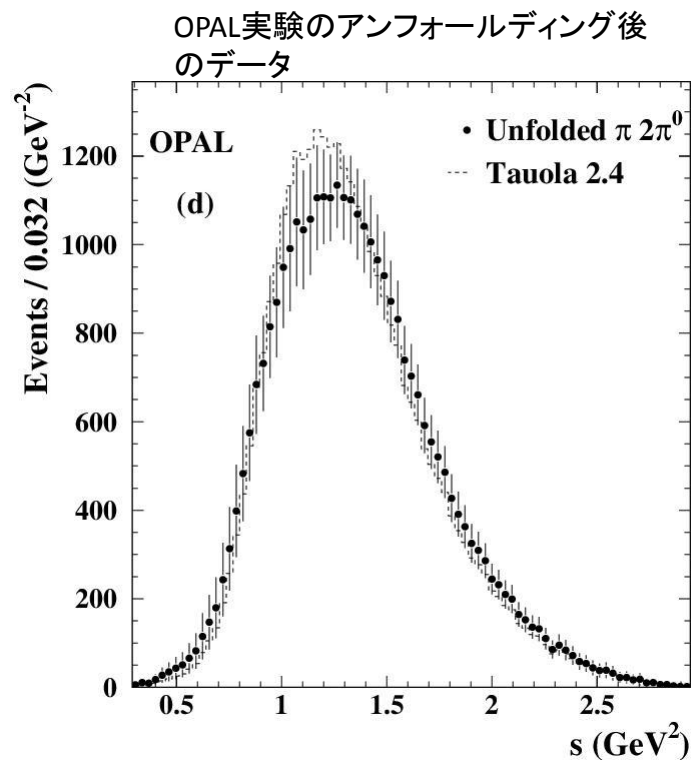
● 質量2乗分布の比較



- 縦軸: 事象数 横軸: 不変質量2乗
- 本研究の方が統計量が多くバックグラウンドが少ない。

他の実験との比較

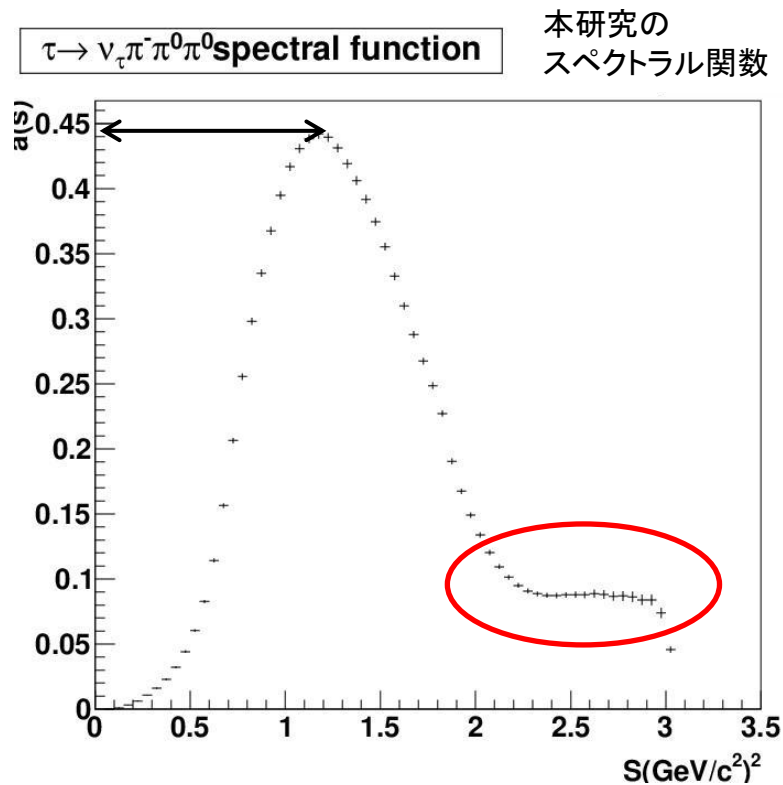
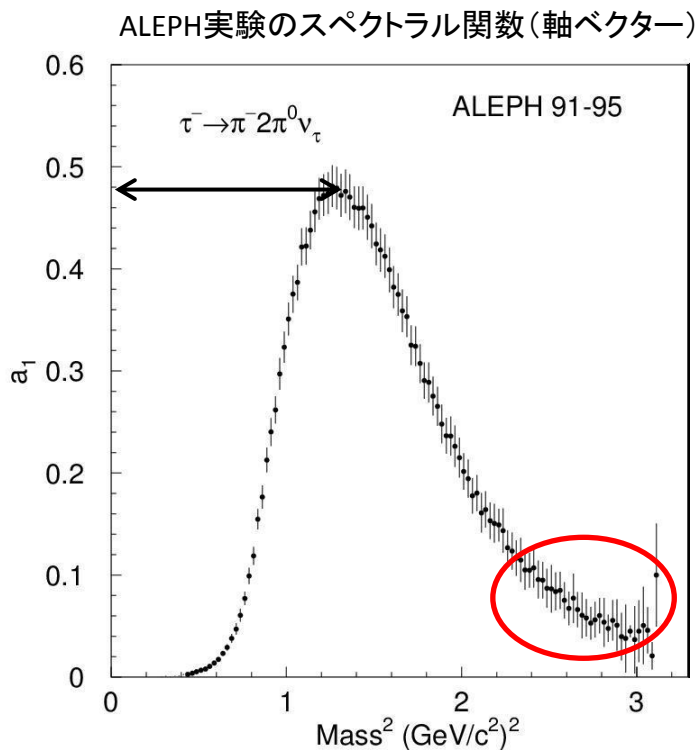
● アンフォールディング後のデータの比較



- 縦軸: 事象数 横軸: 不変質量2乗
- 本研究の方が統計量が多い。

他の実験との比較

● スペクトラル関数の比較



- 縦軸: スペクトラル関数(軸ベクター) 横軸: 不変質量2乗
- 比較すると頂点付近の値は本研究が約0.45、ALEPH実験が約0.48なので両者は近いと言える。横軸の不変質量2乗が2より小さな領域では関数の形は概ね近い。
- 不変質量2乗が2を超えた領域では、関数の形が異なっている。

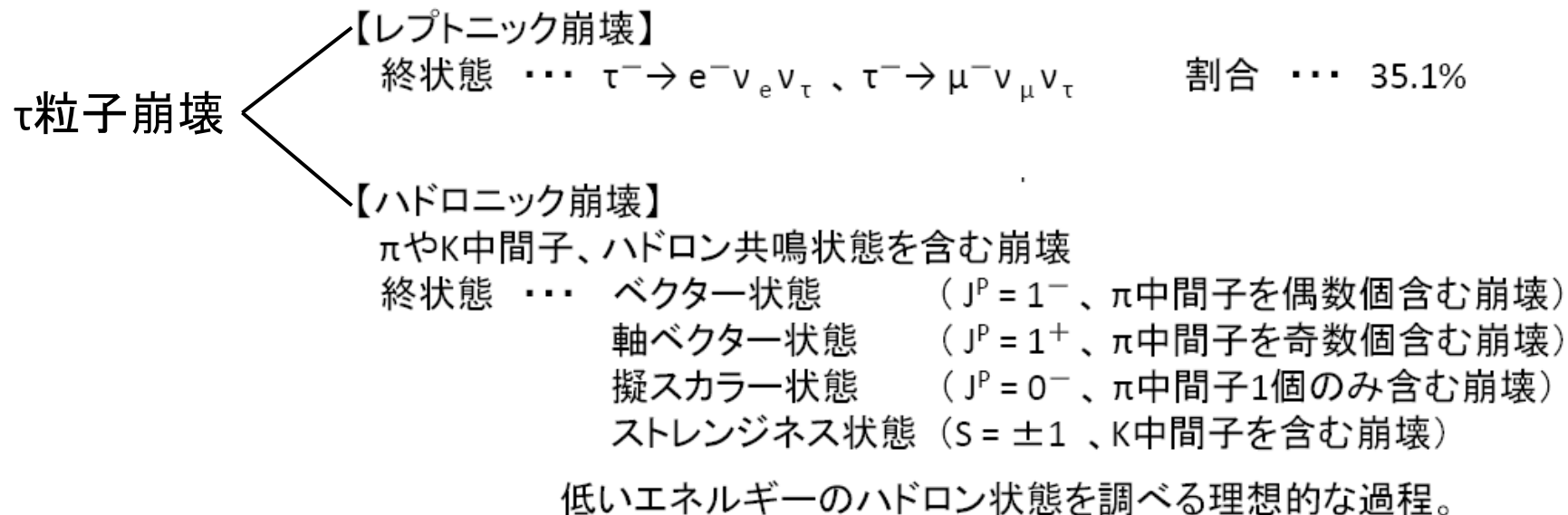
6. まとめ

- Belle/KEKB実験で収集した高統計の τ 粒子対生成事象を用いて、 $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の不変質量分布を求め、スペクトラル関数の測定を行なった。統計誤差1%という高い精度で測定する事が出来た。
- スペクトラル関数を過去の実験と比較して、不変質量が小さな領域では過去の実験と概ね一致していた。
- それに対して、過去の実験ではエラーの大きかった不変質量の大きな領域では、関数の形が過去の実験とは違いが見られた。これについての検討が必要である。
- 今後、より詳しい系統誤差の検討も必要。

BACK UP

τ粒子崩壊について

- τ粒子崩壊にはレプトニック崩壊とハドロニック崩壊がある。



- Inclusive … 条件を満たす全ての崩壊モードの和
↕
(Exclusive … 条件を満たす個々の崩壊モード)

ハドロニック崩壊

低エネルギー(1 GeV 付近) のハドロン状態の研究に理想的

- * スペクトラル関数(真空期待値)の決定
 - * 強い相互作用の結合定数(α_s) の決定
- } に使用される。

実験データによる

崩壊分岐比や不変質量など

を測定することで求めることができる。

→ 実験による高精度な解析結果が重要

スペクトラル関数

- $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の微分崩壊率から導出

$$\frac{d\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)}{ds} = \Gamma_e^0 \frac{6\pi |V_{ud}|^2 S_{EW}^{\pi^2 \pi^0}}{m_\tau^2} \left(1 - \frac{s}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{m_\tau^2}\right) a(s)$$



$$\Gamma_e^0 = \frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}{S_{EW}^e} \leftarrow \Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau) \equiv \Gamma_e^0 S_{EW}^e$$

$$a(s) = \frac{1}{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \frac{d\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)}{ds} \frac{m_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 \left(1 - \frac{s}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{m_\tau^2}\right) \frac{S_{EW}^{\pi^2 \pi^0}}{S_{EW}^e}}$$

$$\frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)}{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} \frac{1}{\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)} \frac{d\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)}{ds}$$

$$\frac{\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)}{\Gamma(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} = \frac{\mathcal{B}_{\pi^2 \pi^0}}{\mathcal{B}_e} \quad \frac{1}{\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)} \frac{d\Gamma(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau)}{ds} = \frac{1}{N_{\pi^2 \pi^0}} \frac{dN_{\pi^2 \pi^0}}{ds}$$

$$S_{EW} = S_{EW}^{\pi^2 \pi^0} / S_{EW}^e$$

$$a(s) = \frac{m_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 \left(1 - \frac{s}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{m_\tau^2}\right) S_{EW}} \left(\frac{\mathcal{B}_{\pi^2 \pi^0}}{\mathcal{B}_e}\right) \left(\frac{1}{N_{\pi^2 \pi^0}} \frac{dN_{\pi^2 \pi^0}}{ds}\right)$$

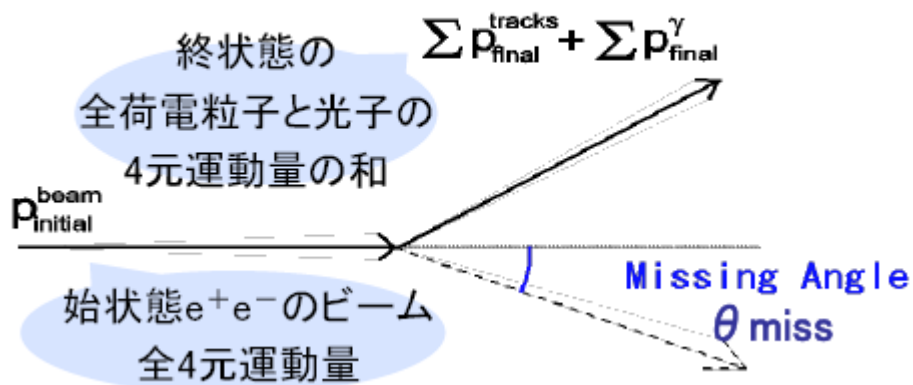
$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 選別条件

- 荷電飛跡の本数が2~4本 全 τ 崩壊事象の85%を選ぶことができる
- 全電荷が保存されていること。
- 検出されないニュートリノによる、ミッシング質量(MM)とミッシング角 (θ_{miss})の情報をを用いた条件。赤枠内を τ 対生成として選別。

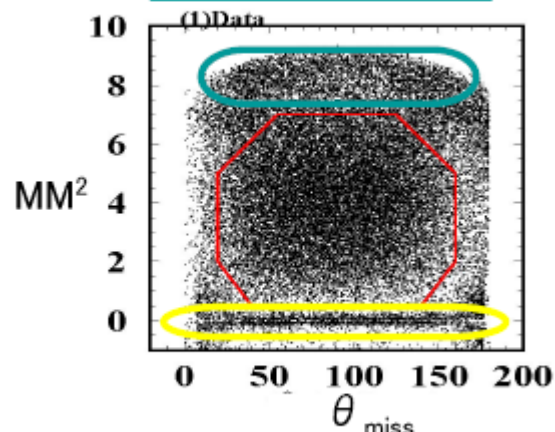
選別後 τ 対事象数 22.7×10^6

ミッシングによる条件

$$MM^2 = (p_{initial}^{beam} - \sum p_{final}^{tracks} - \sum p_{final}^{\gamma})^2$$

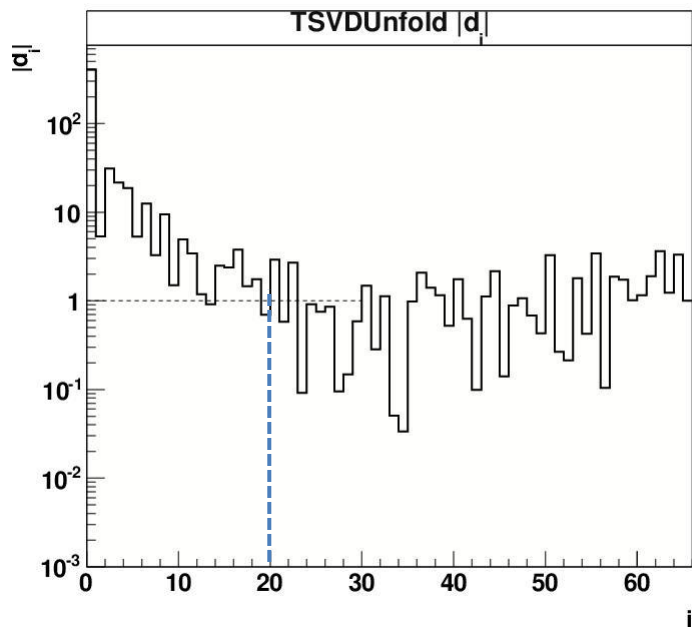


2光子過程反応



バーバー散乱、 μ 対生成

アンフォールディング



固有値(統計誤差) $|d_i|$ の分布。縦軸: $\log |d_i/\sigma_{d_i}|$ 横軸: i
初めて $\log |d_i/\sigma_{d_i}| \sim 1$ となる i が、データとして意味がある所と統計的に意味のない所を区別する為の値(rank)になる。この場合、rank=20 である。

covariance matrix (エラーを2乗して求める)
上: statical error
下: all error

