

$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の崩壊分岐比と 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
田中恵梨香

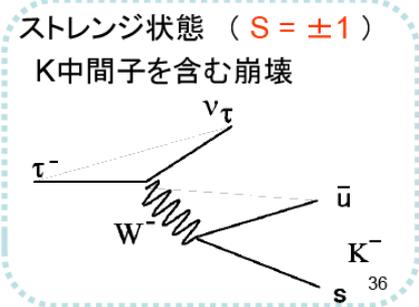
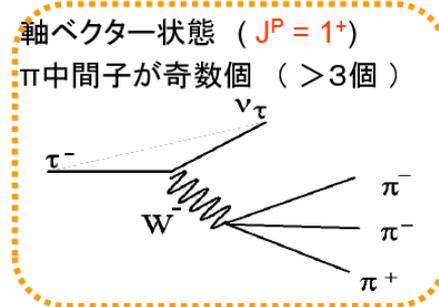
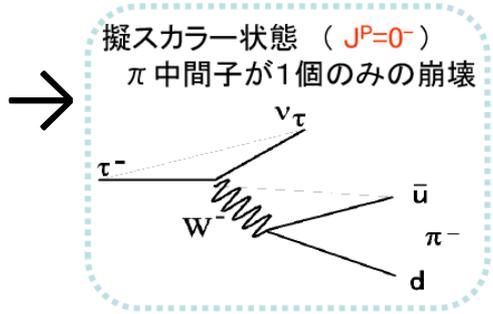
目次

- $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0 \pi^- \nu_\tau$ の物理
- 4 π 系のスペクトラル関数
- 実験装置
- 事象選別
- $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0 \pi^- \nu_\tau$ の質量分布
- 崩壊分岐比
- アンフォールド
- スペクトラル関数の導出
- 以前の実験との比較
- まとめ

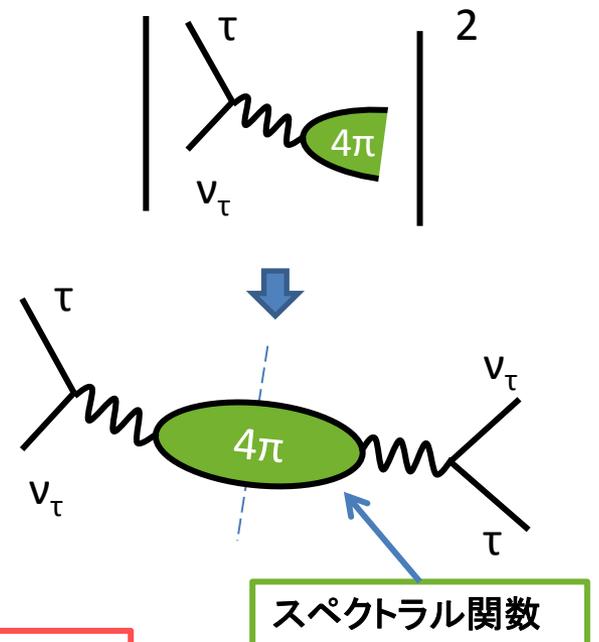
$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の物理

τ 粒子

第3世代に属する最も重いレプトン(電子の約3500倍の質量=1.777GeV)
ハドロニック崩壊をする唯一のレプトン



崩壊分岐比 \propto |振幅|² = M+M



ハドロニック崩壊のスペクトラル関数の測定の重要性

- 強い相互作用 α_s の精密測定に寄与
- 低エネルギーの非摂動項の理解に必須

4π系のスペクトラル関数 ($v^{4\pi}$)

$$v^{4\pi}(s) = \frac{M_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 S_{EW}} \frac{1}{\left(1 - \frac{s}{M_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{M_\tau^2}\right)} \frac{\mathcal{B}_{4\pi}}{\mathcal{B}_e} \frac{1}{N_{4\pi}} \frac{dN_{4\pi}}{ds}$$

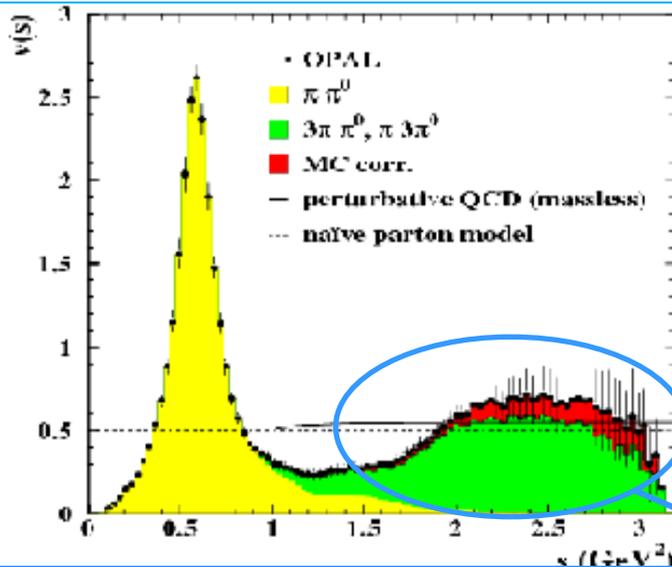
実験によって決まるのは

- 崩壊分岐比
- 質量²分布

崩壊分岐比

質量²分布

OPAL実験のベクター状態のスペクトラル関数



s : 4πの質量²

M_τ : τ粒子の質量

V_{ud} : 小林益川行列のud成分

S_{EW} : 電弱相互作用による補正係数

$\mathcal{B}_{4\pi}$: $\tau \rightarrow 4\pi\nu_\tau$ の崩壊分岐比

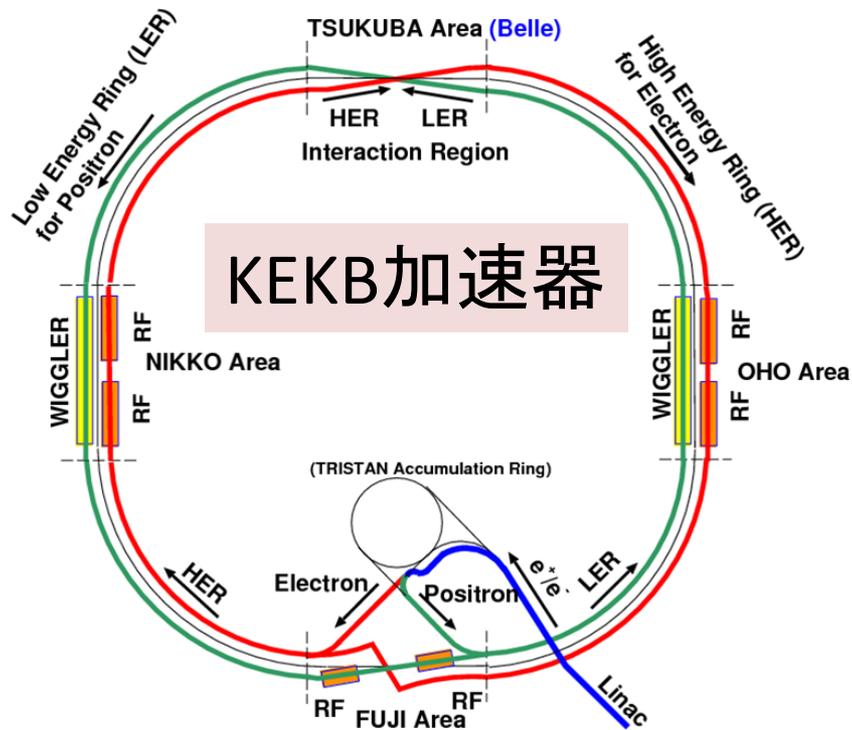
\mathcal{B}_e : $\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau$ の崩壊分岐比

$\frac{1}{N_{4\pi}} \frac{dN_{4\pi}}{ds}$: 4πの質量²分布

緑の分布が4π系に対応

これまでの実験より2桁以上の統計データをもつBelle実験のデータを用いて高い質量領域の精度を上げる

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

e^- : 8GeV
 e^+ : 3.5GeV
 重心系エネルギー : 10.58GeV

B中間子対を大量に生成し研究するために理想的な設計(年間約 10^8 個生成)

B中間子とほぼ同数の τ 粒子も生成



τ ファクトリーとしても重要

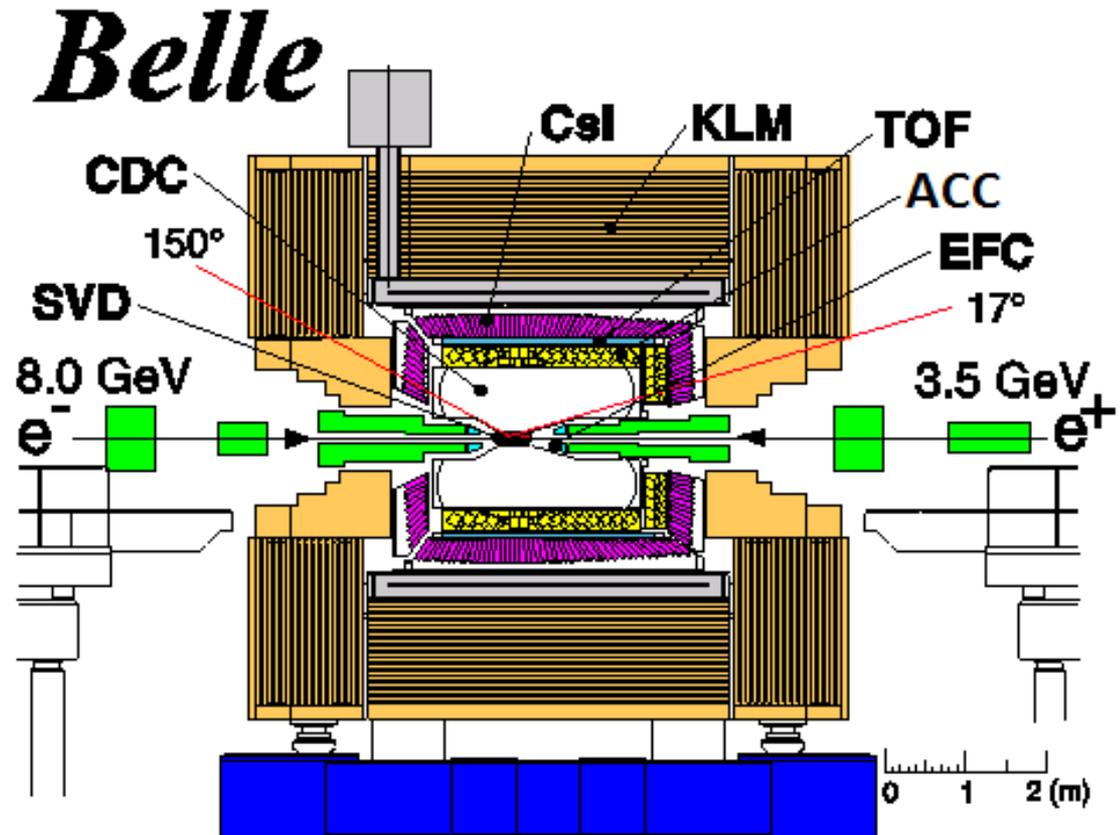


茨城県つくば市
 高エネルギー加速器研究機構

実験装置 Belle検出器

- * KEKB加速器で生成された粒子を検出する大型検出器で複数の検出器から構成されている。
- * 高いエネルギー分解能及び運動量分解能と優れた粒子識別能力を持つ。

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
 ECL : 電子や光子のエネルギー測定
 KLM : K_L, μ 粒子検出器



$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 事象選別1

2000年10月から2008年8月までにBelle実験で収集されたデータ → 775.9/fb

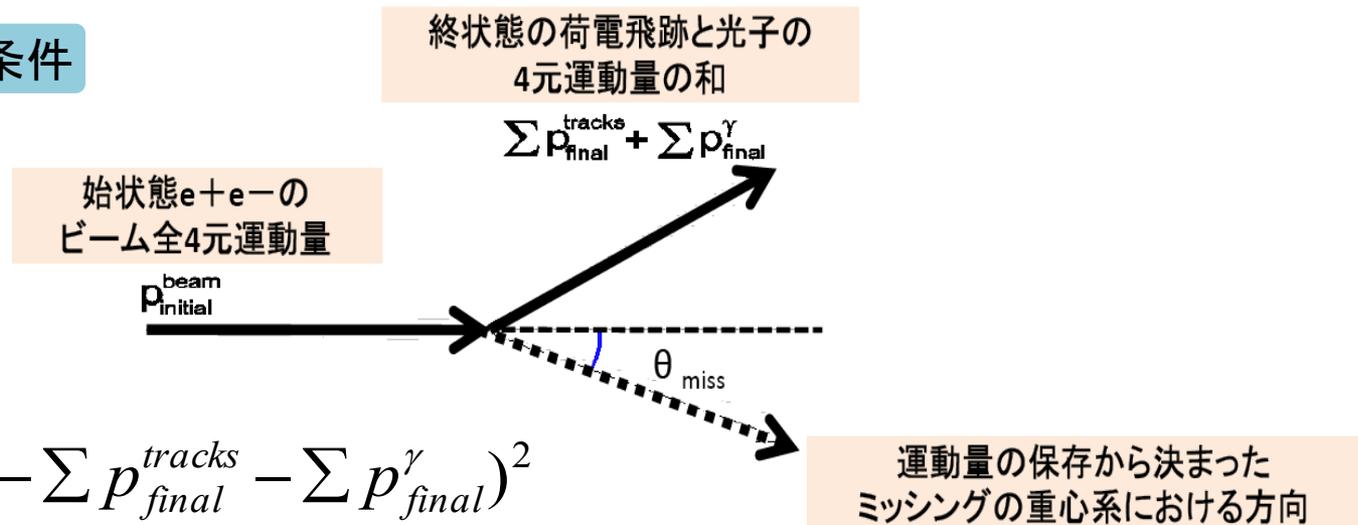
Belle検出器で収集された全反応から、 τ 対生成を選びだすことが必要

□ 荷電粒子の本数が2本または4本で、電荷の合計が0

→ 全 τ 崩壊事象で85%を選ぶことが出来る

□ 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})の情報をういた条件が必要

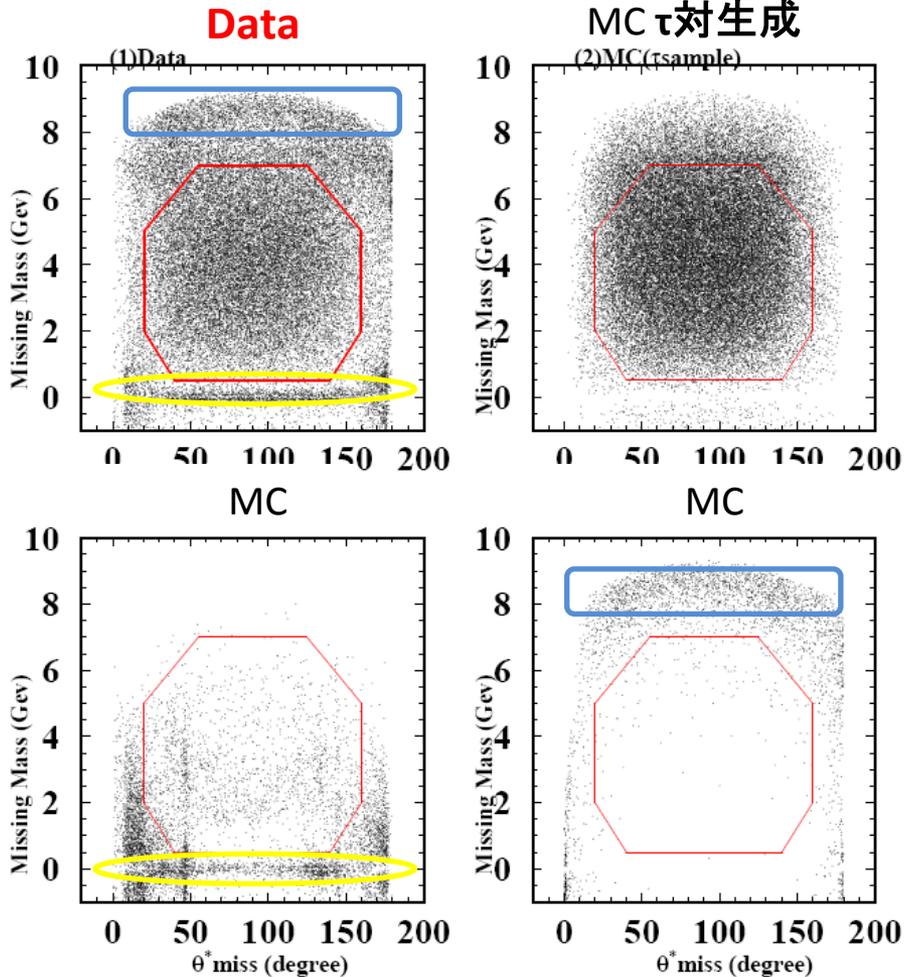
ミッシングによる条件



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

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 選別条件2

ミッシング角とミッシング質量の2次元プロット



バーバー散乱
 μ 粒子対生成

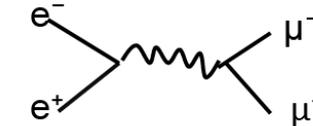
2光子生成反応

バーバー散乱、 μ 粒子対生成、2光子生成
反応などのBGを除くため、
 τ 対生成の条件としてグラフの八角形(赤色)
の中にあることを要求した。

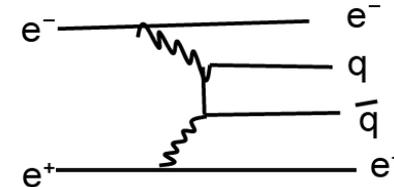
バーバー散乱



μ 粒子対生成



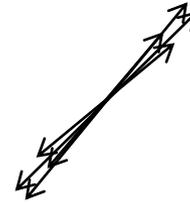
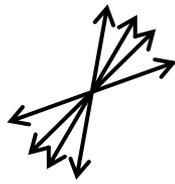
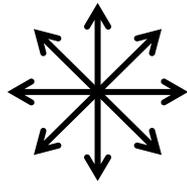
2光子生成反応



$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 選別条件3

Thrustによる条件 Thrust > 0.9

Thrust = 事象の丸さを表す & 事象軸を決める

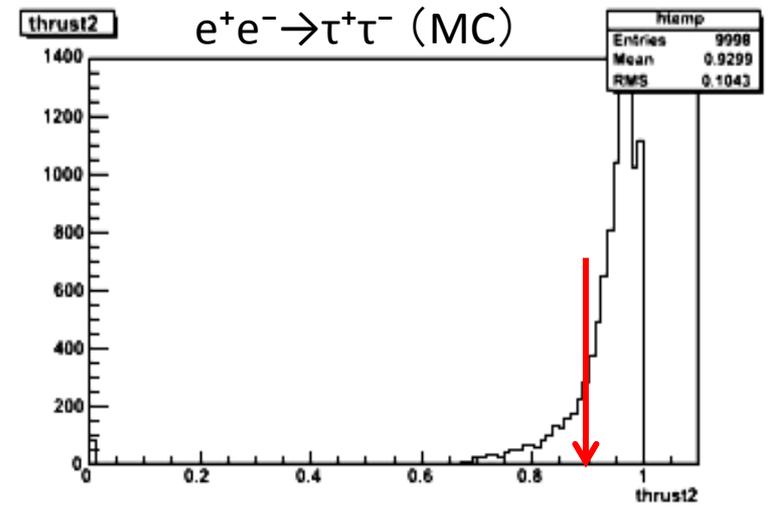
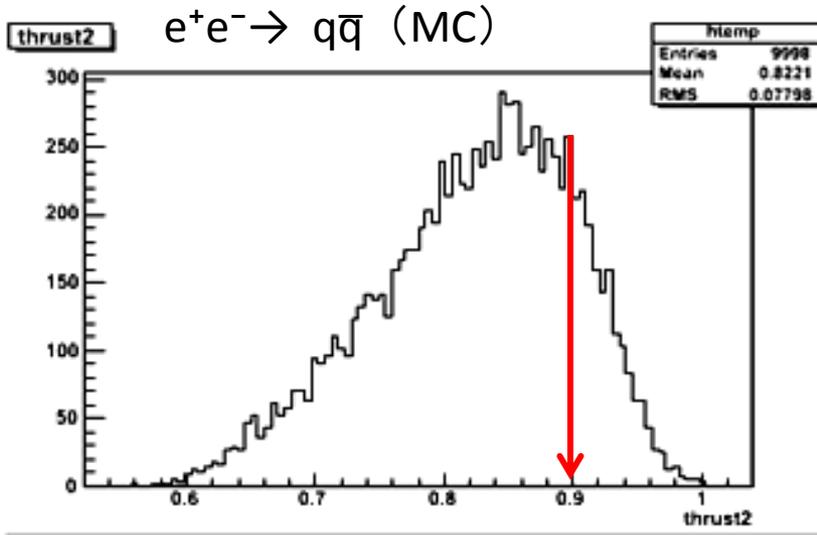


$$\text{Thrust} = \max \left[\sum_i |\hat{n} \cdot \vec{P}_i| / \sum_i |\vec{P}_i| \right]$$

n: 事象軸

P_i : 粒子の運動量

Thrust 0.5 ← ————— → 1.0



以上の条件より

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 事象候補
約3億5140万事象

$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 事象選別1

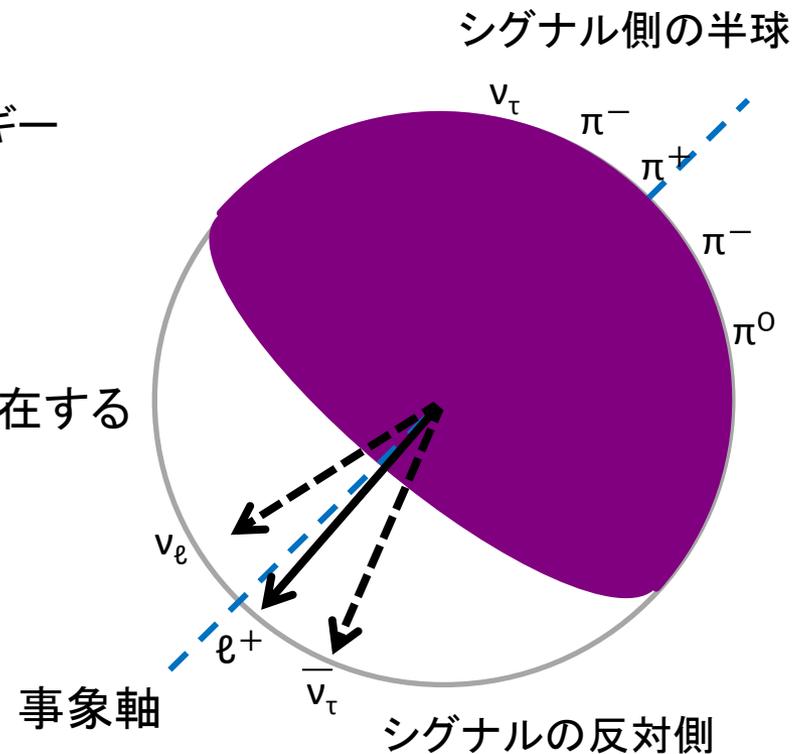
τ 粒子が1つの π^0 と3つの荷電 π に崩壊する事象を選別する。
(もう片方の τ 粒子は電子か μ 粒子に崩壊)

シグナル側の半球

1. 半球中に π^0 が1つある(π^0 再構成について次ページ)
2. 半球中に荷電飛跡が3本あり、その荷電の合計が-1または+1である
3. 荷電粒子が π であることを要求(次ページ)
4. π^0 を2個以上含む事象の除去
 π^0 から崩壊した2つの光子以外に高いエネルギー(200MeV以上)の光子がある事象は除く

シグナルと反対側(tagside)の半球

1. 電子が1つ、または μ 粒子が1つのみが存在する



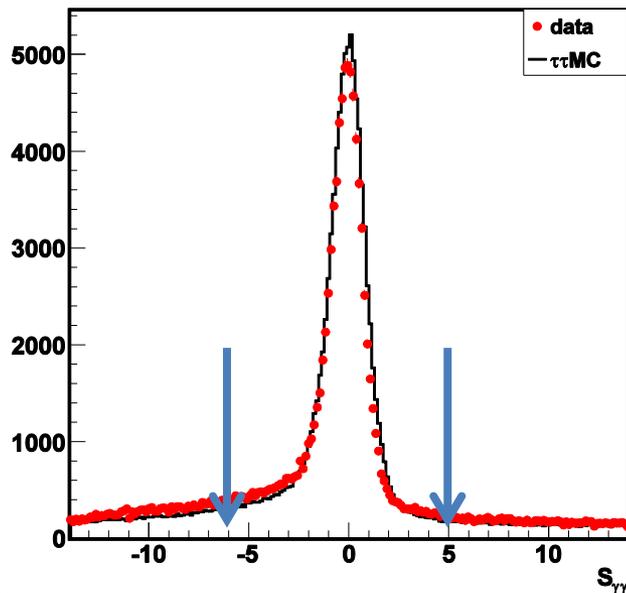
$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 事象選別2

荷電 π を識別する条件

粒子識別の確率 $P(\pi/K)$ を用いて荷電粒子が π であることを要求
 $P(\pi/K) \geq 0.6$ を π と仮定する。

π^0 を再構成するために用いる光子の条件

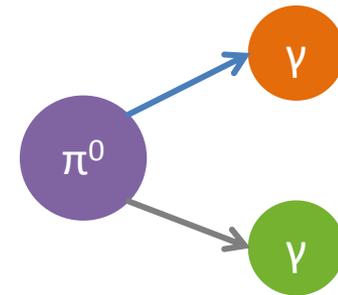
2つの光子の不変質量と π^0 の質量の差を、
 光子の質量分解能で割ったものを $S_{\gamma\gamma}$ と定義した。



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

$m_{\gamma\gamma}$: γ の不変質量
 m_{π^0} : π^0 の質量
 $\sigma_{\gamma\gamma}$: $m_{\gamma\gamma}$ の分解能

シグナル領域を $-6 \leq S_{\gamma\gamma} \leq 5$ として
 シグナル領域のみを解析に用いる。



光子対の選択

2つの光子(光子対)で π^0 中間子が再構成される。

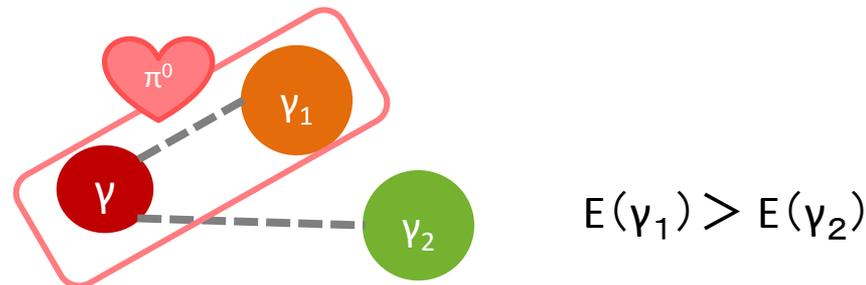
光子対の選び方 $S_{\gamma\gamma}$ の緩い条件 ($-14 < S_{\gamma\gamma} < 14$) のとき

- 光子対の組み合わせが1通りに限られる場合: **80%**



- 複数の π^0 候補に1つの光子が重複して用いられる場合: **20%**

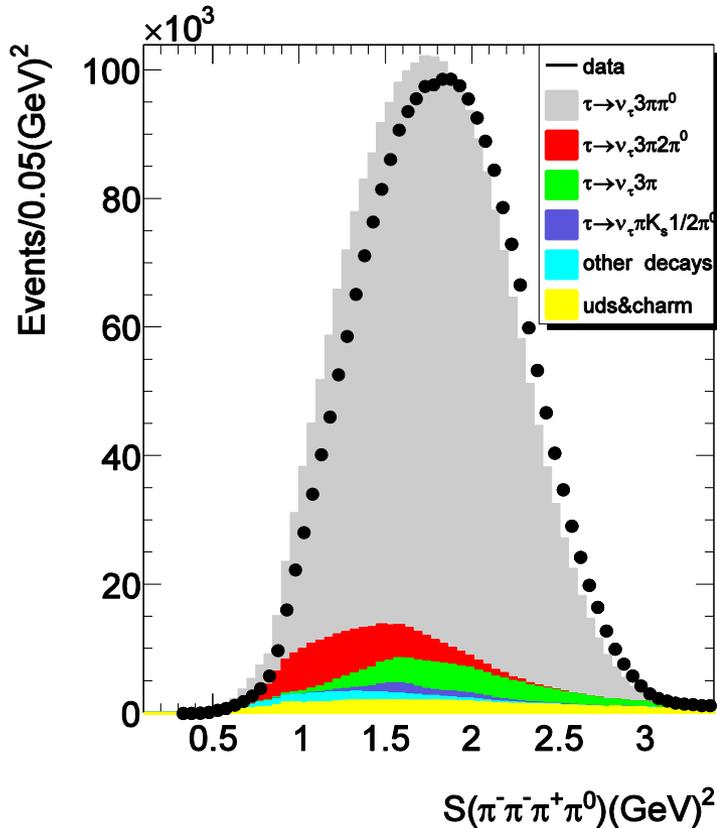
→相手方のうち、エネルギーが高い光子(γ_1)との対を選択する。



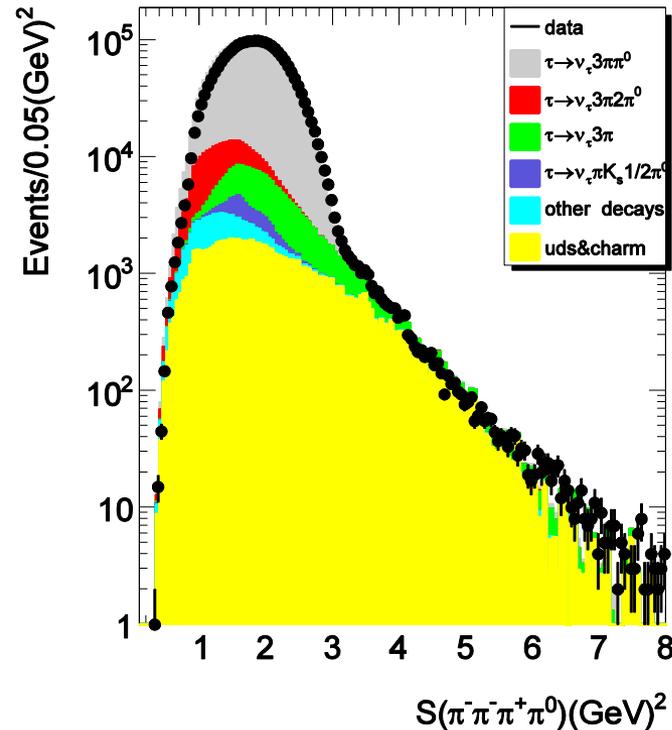
質量²分布

$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 崩壊の候補 245万事象

4 π の質量²分布 $S=(M_{4\pi})^2$



4 π の質量²分布のlogスケール



黒丸・・・データ
 (ほとんどのエラーが黒丸のサイズ以下)

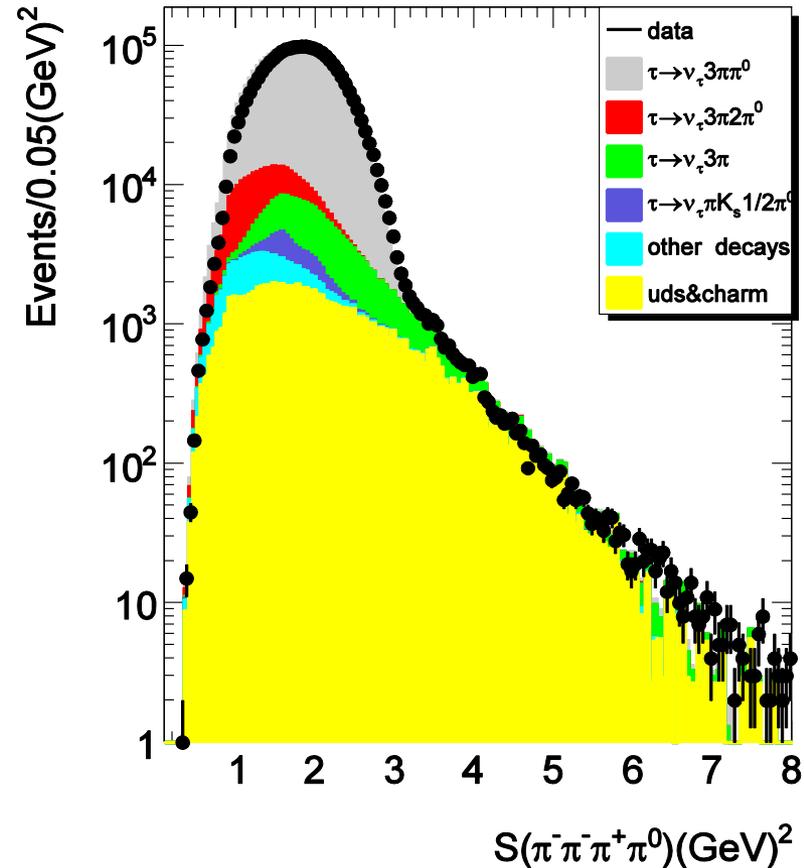
灰色・・・シミュレーションの信号分布
 (Taulora: τ のシミュレーションの標準プログラム)

赤緑紫青黄・・・
 シミュレーションのバックグラウンド

バックグラウンド

Source	fractions (%)
$3\pi 2\pi^0$	4.58
3π	3.56
$\pi K_s (1/2)\pi^0$	0.70
$3\pi \geq 3\pi^0$	0.08
$K2\pi\pi^0$	0.23
$\pi 2\pi^0$	0.16
other τ decays	0.58
not lepton in tag-side	2.25
uds($e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$)	0.74
charm($e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$)	1.94
Total	14.8

4 π の質量²分布のlogスケール



$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ($q=u,d,s,c$)の分布の形はMCのシミュレーションを使用し、絶対値は τ より高い 3.4GeV^2 以上の高質量領域でデータから評価した

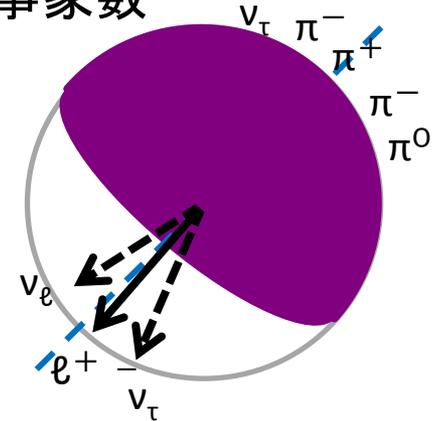
崩壊分岐比の測定方法

$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 事象 (反対側は電子か μ 粒子に崩壊) の事象数

$$N_{4\pi-\ell} = 2 \times N_{\tau\tau} \times (B_{4\pi} \times B_e + B_{4\pi} \times B_\mu)$$

$$B_{4\pi} = \frac{N_{4\pi-\ell}}{2 \times N_{\tau\tau} \times (B_e + B_\mu)}$$

このとき $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ 事象の事象数 $N_{\tau\tau}$ を求めるために崩壊分岐比が精度よく測られている $e-\mu$ 事象 を使う



$e-\mu$ 事象とは

片方の τ 粒子が電子へ、もう片方の τ 粒子が μ 粒子へ崩壊する事象。

$$B_{4\pi} = \frac{N_{4\pi-\ell}}{N_{e-\mu}} \times \frac{B_e \times B_\mu}{(B_e + B_\mu)} \quad \text{この式で崩壊分岐比を測定！}$$

→ $e-\mu$ 事象との事象数の比から求めることで、多くの系統誤差 (ルミノシティ、 $\sigma_{\tau\tau}$ 、 η_{track} 、 η_{PID}) がキャンセルまたは減少できる

e- μ 事象の選別

崩壊分岐比

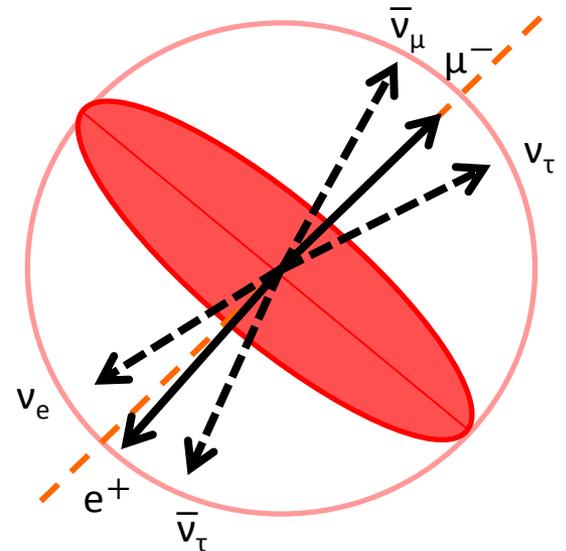
$$B_{4\pi} = \frac{N_{4\pi-\ell}}{N_{e-\mu}} \times \frac{B_e \times B_\mu}{(B_e + B_\mu)}$$

崩壊分岐比を測定するために
e- μ 事象を選別する必要あり！

e- μ 事象選別条件

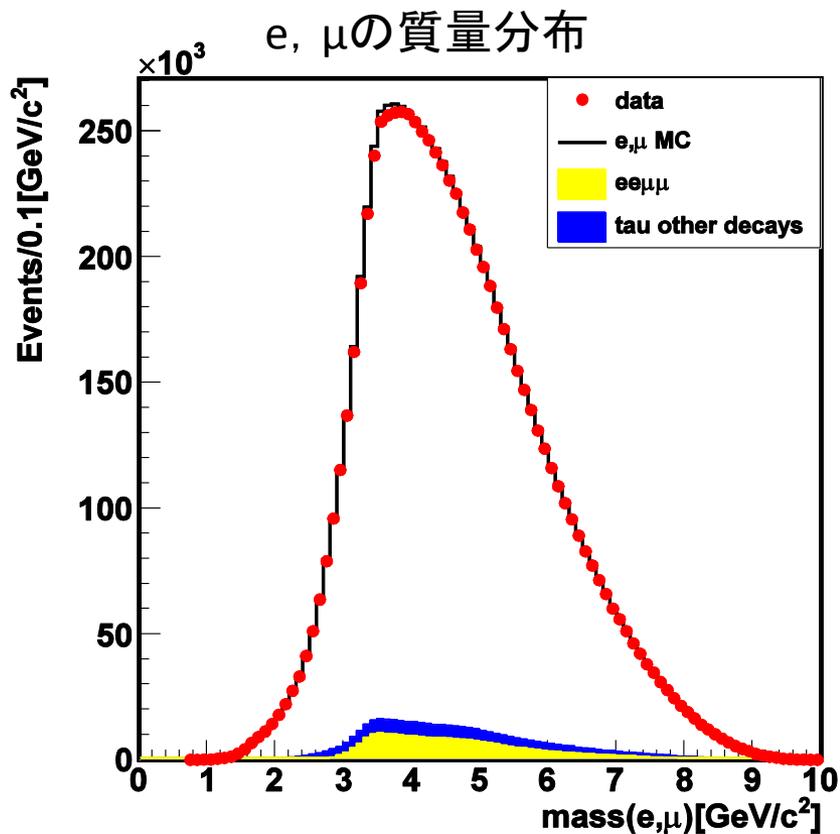
それぞれの半球で電子1つと μ 粒子1つに崩壊する事象を選別。

1. 荷電粒子が半球に1本ずつの計2本ある。
2. 荷電粒子が電子と μ 粒子であることを要求。



e- μ 質量分布

e- μ 事象の候補 809万事象



赤丸…データ
 黒線…シミュレーションの信号分布
 青黄…シミュレーションのバックグラウンド

バックグラウンド

Mode	fraction
$\pi - e$	1.44 %
$\rho - e$	0.36 %
$\pi - \mu$	0.13 %
$K - e$	0.14 %
Other tau decays	0.17 %
ee \rightarrow e e $\mu \mu$	3.08 %
Total	5.33 %

データとシミュレーションが良くあっている！

バックグラウンドと検出効率の補正

崩壊分岐比

$$Br_{4\pi} = \frac{N_{4\pi-l}(1-b_{4\pi-l})}{\eta_{4\pi-l}} \times \frac{\eta_{e-\mu}}{N_{e-\mu}(1-b_{e-\mu})} \times \frac{B_e B_\mu}{(B_e + B_\mu)}$$

崩壊分岐比を実験時期ごとに求めた
代表例

4π事象の候補数: $N_{4\pi-l} = 254651$
 e-μ事象の候補数: $N_{e-\mu} = 843955$
 4π事象のバックグラウンド:
 $b_{4\pi-l} = 14.7\%$
 e-μ事象のバックグラウンド:
 $b_{e-\mu} = 5.53\%$
 4π事象の検出効率: $\eta_{4\pi-l} = 11.0\%$
 e-μ事象の検出効率: $\eta_{e-\mu} = 18.2\%$
 $\tau \rightarrow e \nu_e \nu_\tau$ の崩壊分岐比:
 $B_e = 17.8\%$ (PDG)
 $\tau \rightarrow \mu \nu_\mu \nu_\tau$ の崩壊分岐比:
 $B_\mu = 17.4\%$

8年分

実験番号	$N_{4\pi-l}$	$N_{e-\mu}$	$b_{4\pi-l}(\%)$	$b_{e-\mu}(\%)$	$\eta_{4\pi-l}$	$\eta_{e-\mu}$
9	13050	46286	15.014	5.525	10.732	18.565
11	28686	100197	14.890	5.533	10.739	18.647
13	36027	124142	14.546	5.542	10.700	18.478
15	42799	149361	14.884	5.648	10.598	18.335
17	35382	124316	14.997	5.641	10.451	18.185
19	84021	294606	14.936	5.651	10.436	18.164
21	11742	39132	15.334	5.633	10.416	18.272
23	22731	79843	15.122	5.659	10.513	18.253
25	81643	287350	15.040	5.652	10.433	18.187
27	86701	305724	15.033	5.719	10.426	18.176
31	62740	208302	15.021	5.417	11.090	18.272
33	65109	211109	14.950	5.436	11.215	18.424
35	58499	185938	14.788	5.389	10.959	18.193
37	213957	701098	14.835	5.430	10.972	18.108
39	153025	495743	13.699	5.534	11.088	18.250
41	203557	662029	14.888	5.487	10.946	18.022
43	197894	634534	14.958	5.475	10.917	17.931
45	48529	156444	14.577	5.525	11.115	18.139
47	127126	411798	14.777	5.469	10.993	18.000
49	93201	302051	14.825	5.524	10.959	17.932
51	139285	453727	14.807	5.475	11.113	18.231
55	254651	843955	14.726	5.534	11.021	18.222
61	122504	401666	14.668	5.498	11.218	18.507
63	126264	412924	14.659	5.529	11.266	18.379
65	139933	459975	14.522	5.532	11.230	18.319

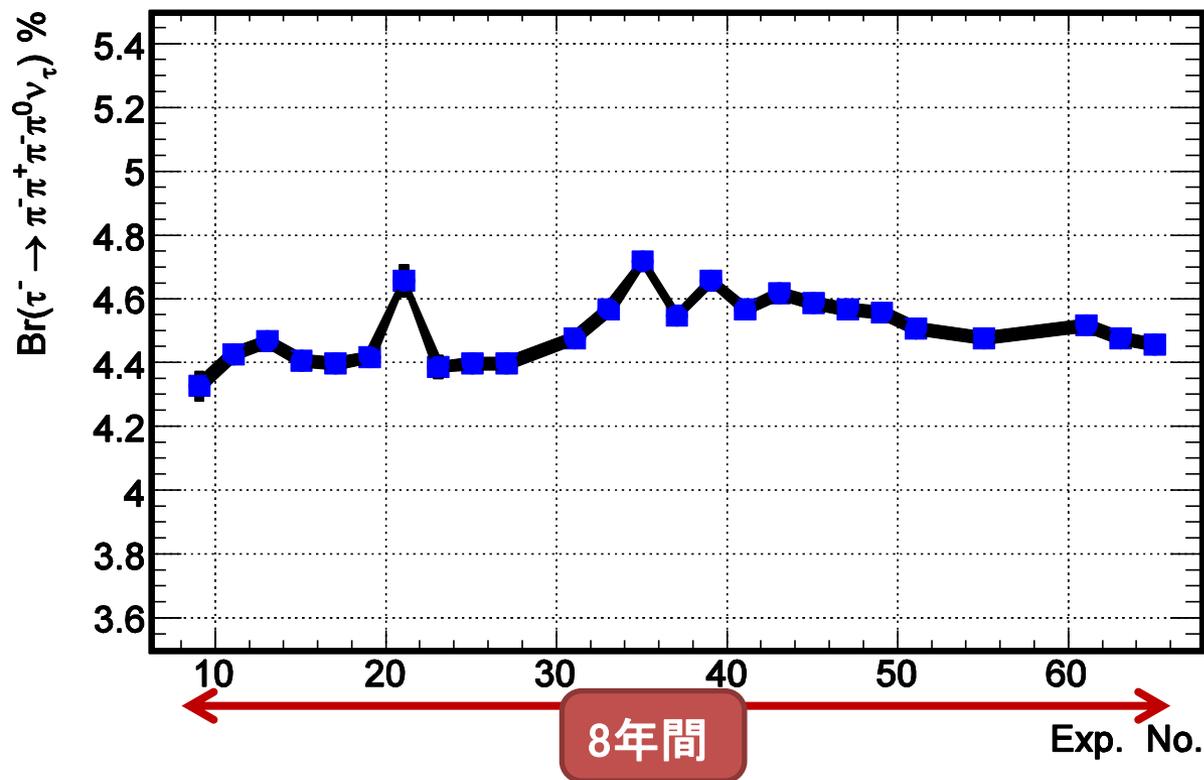
(PDG)

崩壊分岐比の系統誤差の評価

Items	$\Delta Br/Br$
トラックの検出効率の不定性	0.7%
π 中間子識別効率の不定性	1.5%
π^0 中間子の検出効率の不定性	1.5%
τ のバックグラウンドの不定性	0.4%
レプトニック崩壊の崩壊分岐比の不定性	0.1%
$ee \rightarrow e e \mu \mu$ の寄与の不定性	0.6%
γ ベトー効率の不定性	1.2%
トリガー効率の不定性	0.8%
ハドロン崩壊モデルの不定性	0.7%
Total	2.8%

崩壊分岐比

長期間の崩壊分岐比の安定性



崩壊分岐比 $B_{4\pi} = 4.53 \pm 0.00 \pm 0.13$ %

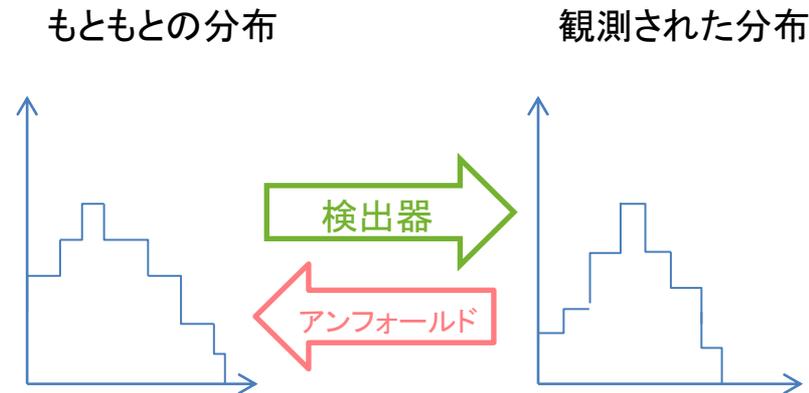
世界平均 (PDG) $B_{4\pi} = 4.48 \pm 0.06$ %

真の質量分布の測定

観測された質量²分布には、検出器の検出効率や分解能などの影響が含まれている。
これを真の分布に戻すためにアンフォールドが必要！

アンフォールドとは

観測された分布には、もともとの分布から歪められている。



これを、もともとの分布に戻すことをアンフォールドという。

- x : 真の分布(求めたい分布)
- b : 観測された分布
- A : 検出器のresponse matrix

$$Ax = b$$

今回用いたアンフォールドの方法は
Singular Value Decomposition(SVD)法である

SVD法とは

行列Aの固有値がどこまで意味あるのかをチェックし意味ある部分だけを用いる

$$A\mathbf{x} = \mathbf{b}$$

\mathbf{x} : 真の分布(知りたい分布)

$$\mathbf{x} = A^{-1}\mathbf{b}$$

\mathbf{b} : 観測された分布

A : 検出器のresponse matrix

しかしAの逆行列が必ずしもとまらない。

この問題は行列Aを分解することで解決できる

$$A = USV$$

ここでSは対角行列、UとVは直交行列

$$S = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & s_n \end{pmatrix}$$

s_i はAの固有値 $s_1 > s_2 > \cdots > s_n$

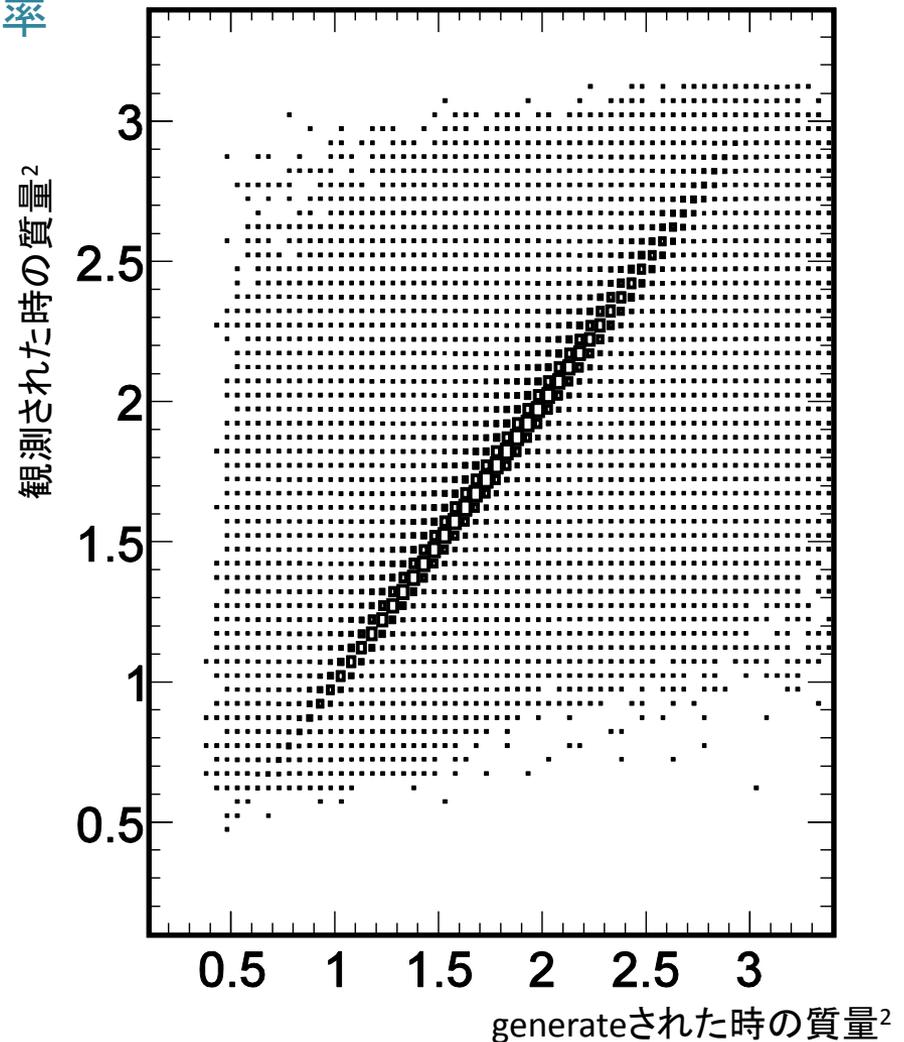
固有値 s_i のうち観測された分布 \mathbf{b} のbinごとの統計と比較して意味のあるところだけとることが必要

どこまで固有値の値を残すかが非常に重要！！

Response matrixの質量分解能部分

「真の分布」ではj番目のBinにあったものが、
「観測された分布」ではi番目のBinにある確率

$$M_{3\pi^0}^2 |_{gen} \text{ V.S. } M_{3\pi^0}^2 |_{obs}$$



モンテカルロ

検出器のシミュレーション

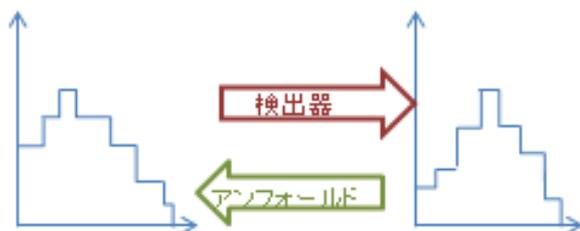
解析プログラム

Generateされた時の分布と観測されたときの分布の2次元plot

Response matrixの質量分解能

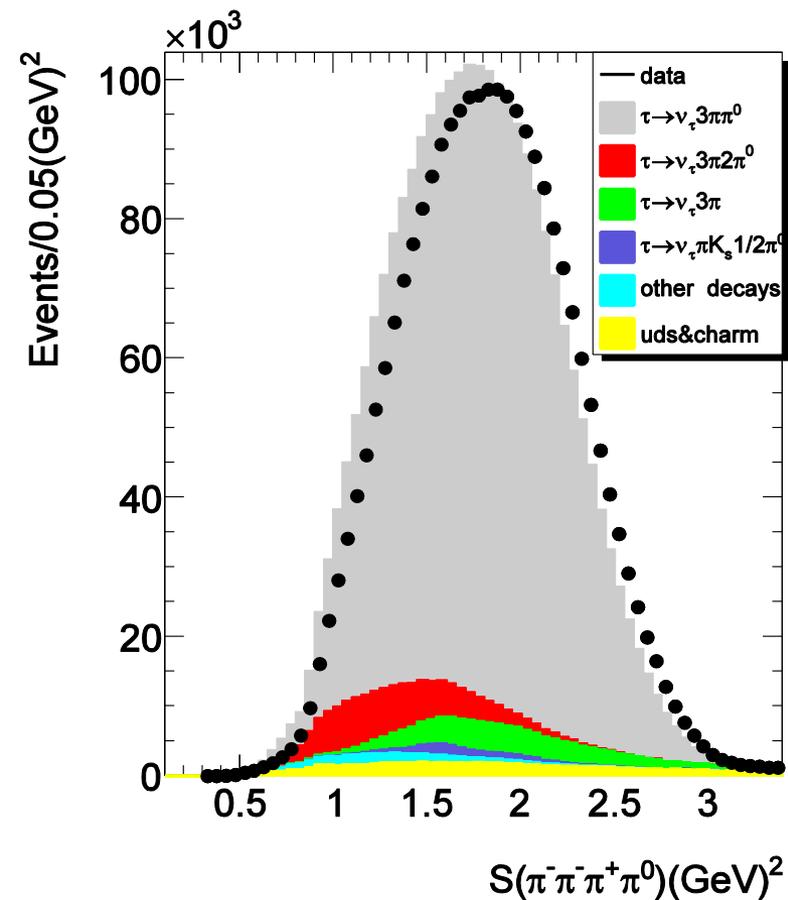
もともとの分布

観測された分布



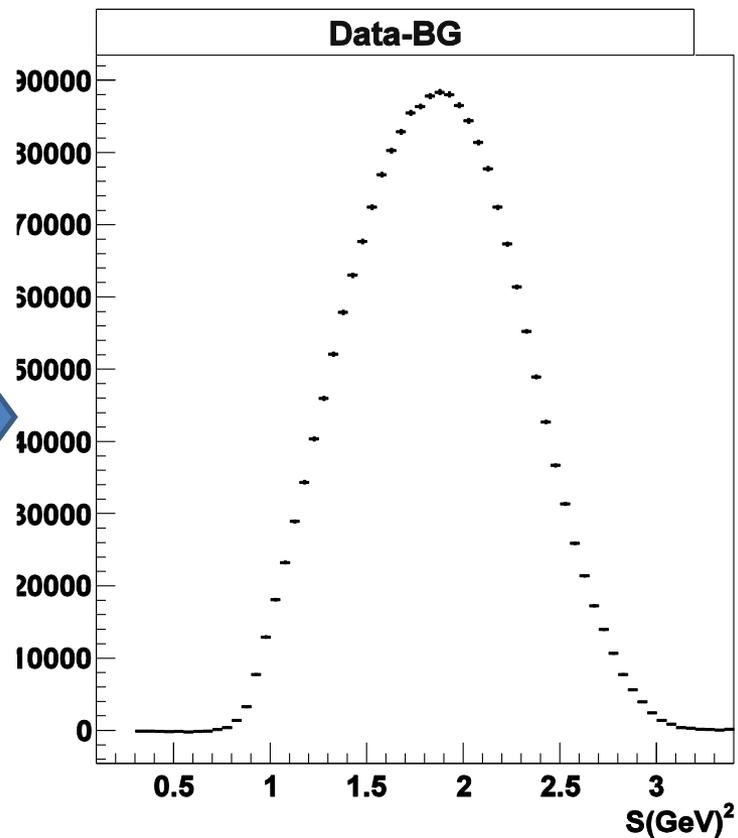
アンフォールド準備

質量²分布からバックグラウンドを除いた分布を作る



2435380事象

黒丸-5色

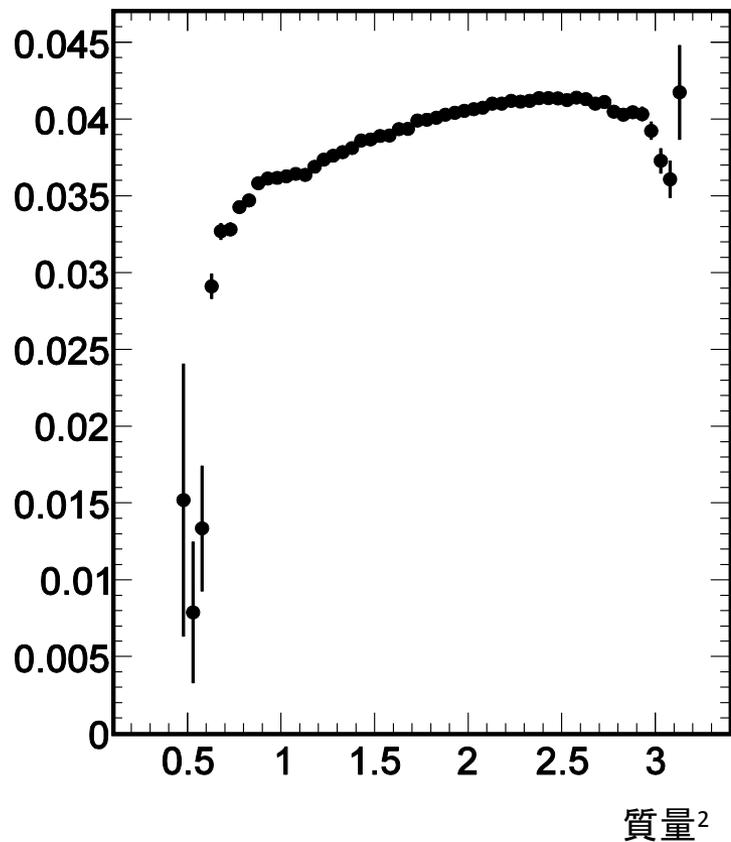


2068880事象

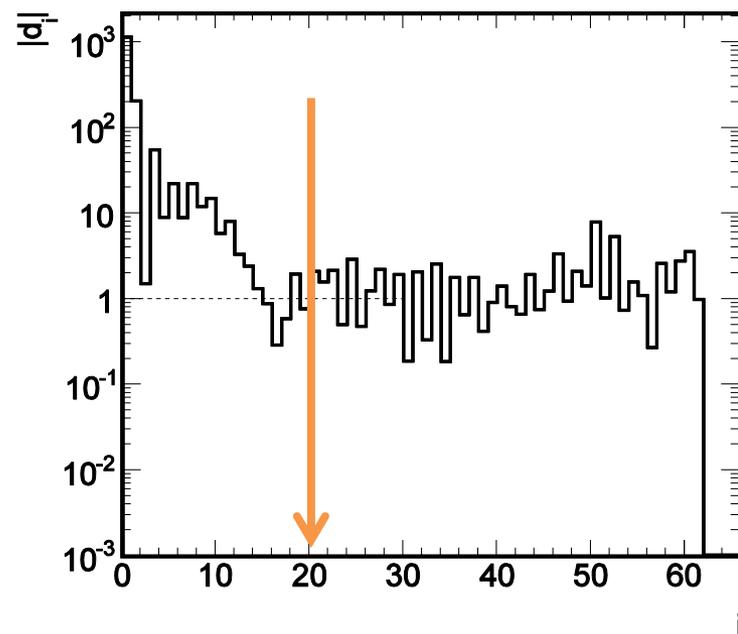
アンフォールド準備

観測された時の質量²分布
generateされた時の質量²分布

アクセプタンス



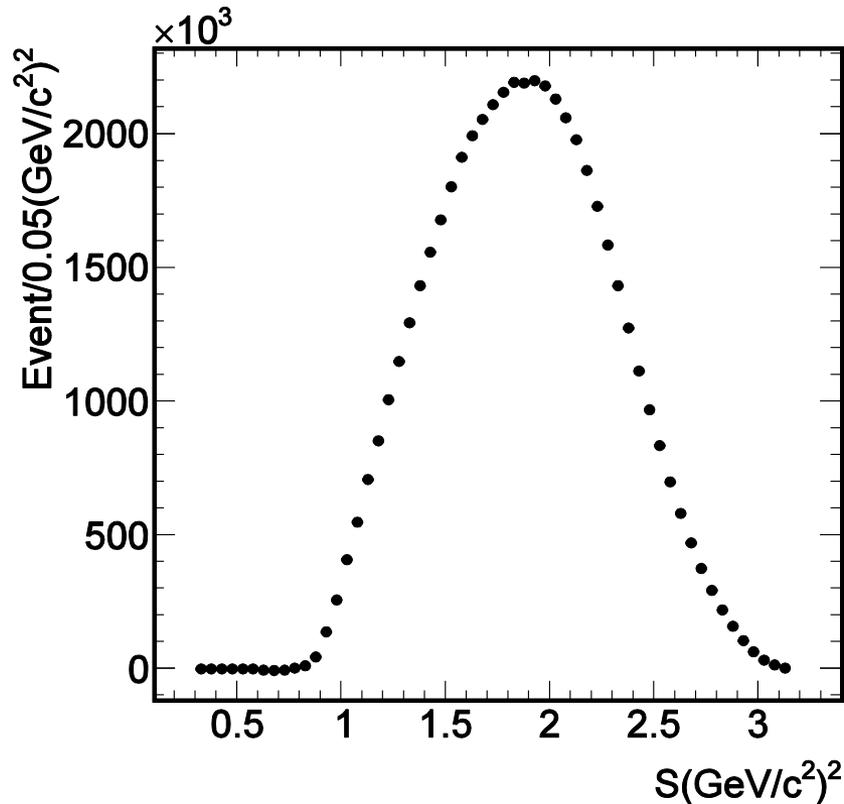
観測値が統計誤差とどれだけ有意
義であるかを示す分布



$$S = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & s_2 & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & | & \vdots \\ 0 & 0 & s_{20} & | & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & | & s_n \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{固有値} \\ \\ \\ \text{20番目まで使う} \end{array}$$

実験データでのアンフォールド

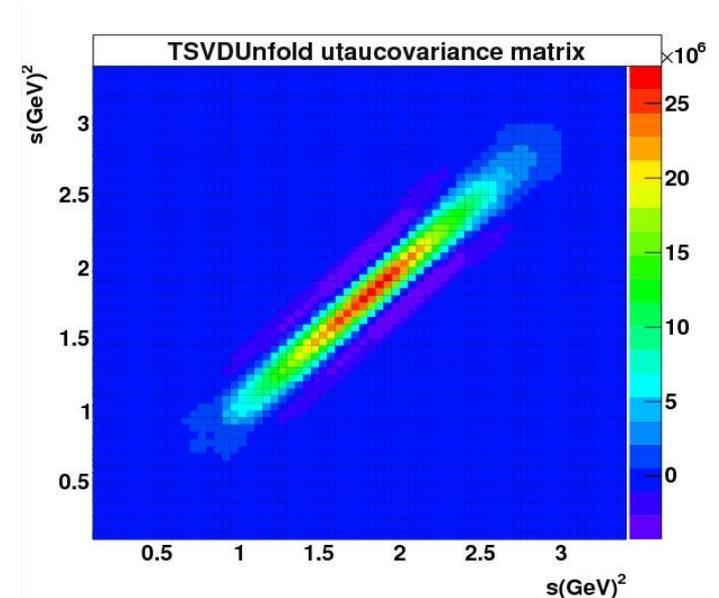
バックグラウンドを除いたデータでアンフォールドを行った



Bin幅:0.05
Bin数:66

Binごとの統計誤差は0.5～1.0%程度

アンフォールド後のエラーマトリックス

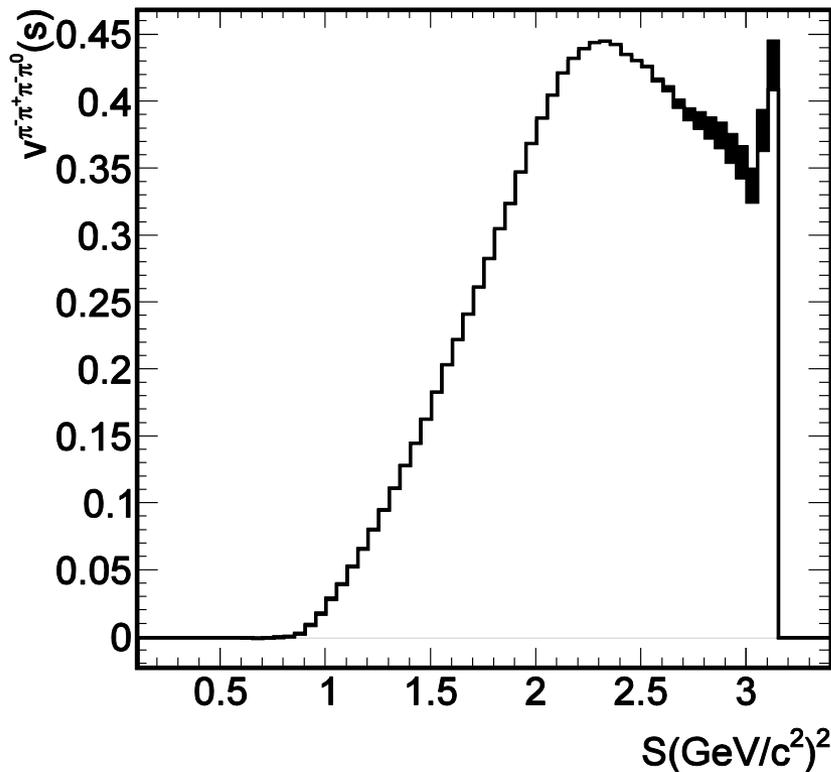


* エラーマトリックスはほぼ対角

スペクトラル関数結果

$$v^{4\pi}(s) = \frac{M_\tau^2}{6|V_{ud}|^2 S_{EW}} \frac{1}{\left(1 - \frac{s}{M_\tau^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{M_\tau^2}\right)} \frac{\mathcal{B}_{4\pi}}{\mathcal{B}_e} \frac{1}{N_{4\pi}} \frac{dN_{4\pi}}{ds}$$

$3\pi\pi^0$ のスペクトラル関数



崩壊分岐比

質量²分布

測定したものを代入

s : 4π の質量²

$M_\tau = 1.777 \text{ GeV}$

$V_{ud} = 0.974$

$S_{EW} = 1.02$

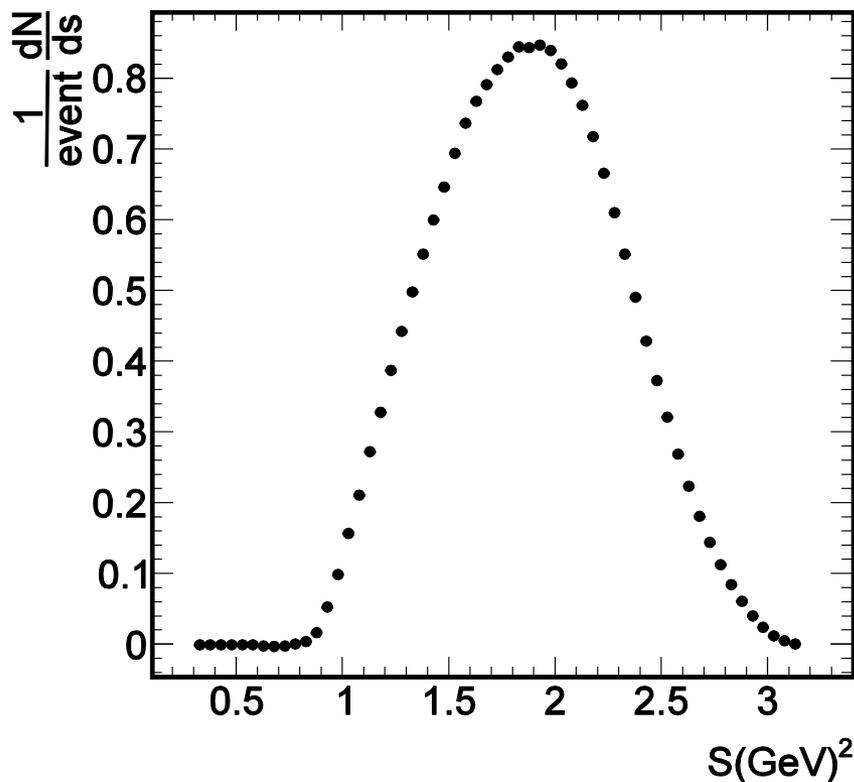
$\mathcal{B}_{4\pi} = 4.53\%$

$\mathcal{B}_e = 17.83\%$

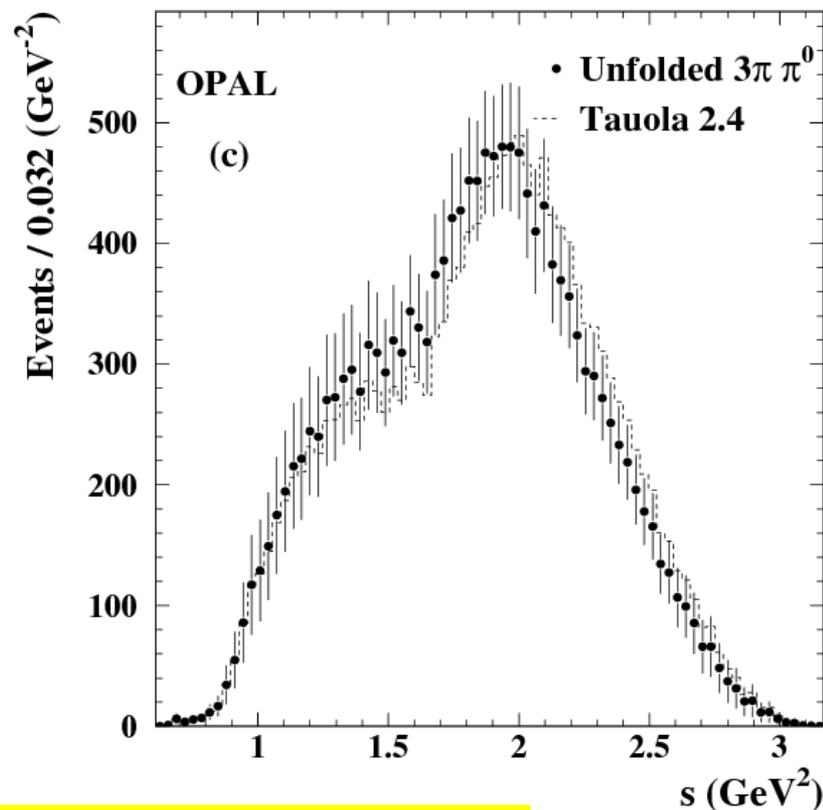
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ($q=u,d,s,c$)の不定性からの
系統誤差を考慮した時のエラー

以前の実験結果との比較(質量²分布)

(本研究)バックグラウンドを差し引き、アンフォールドを行った後



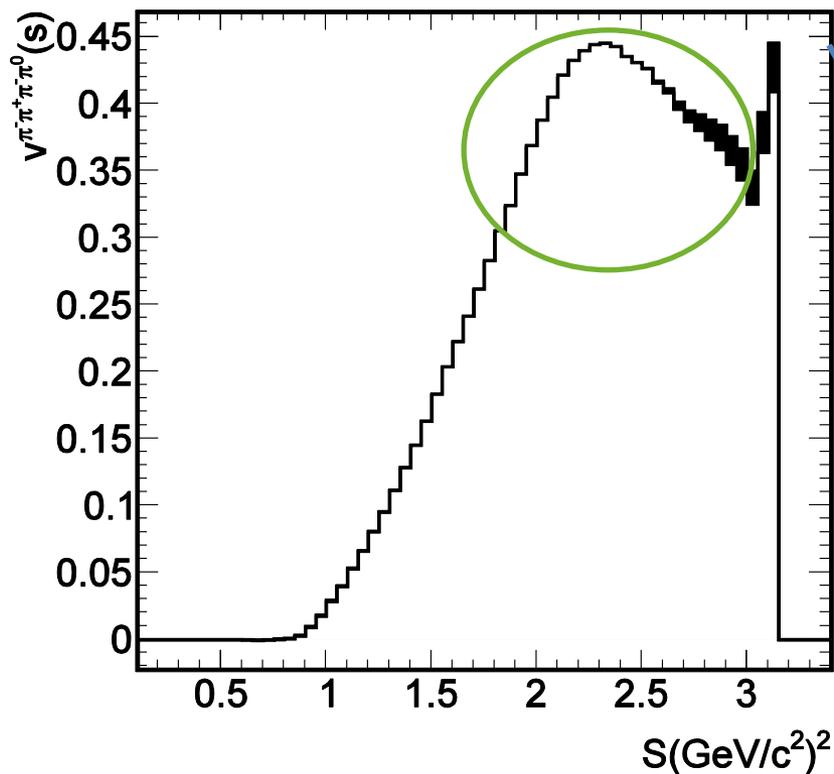
OPAL実験: 4π 系でのアンフォールド後



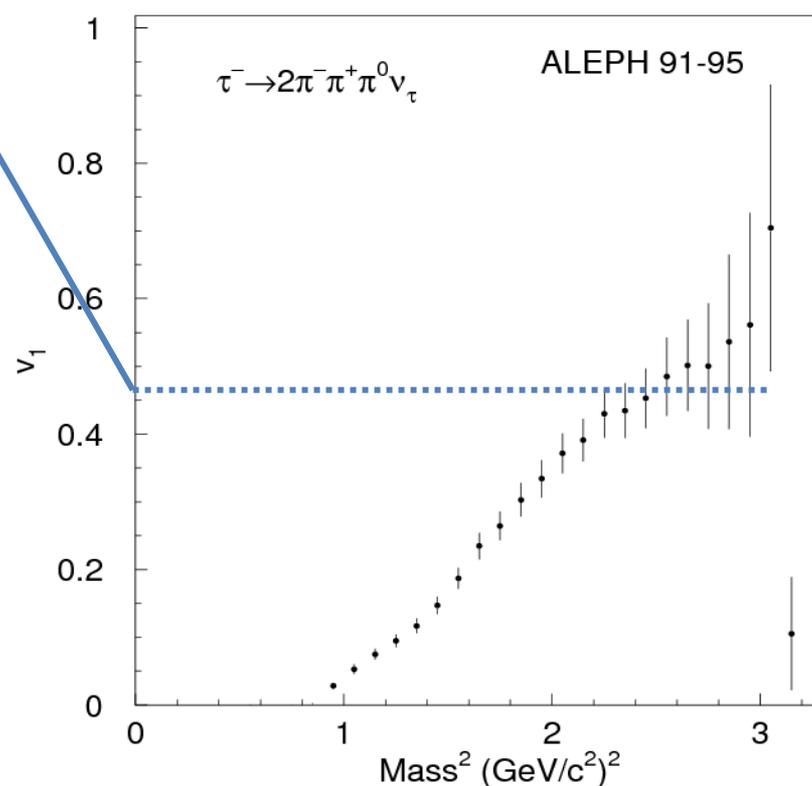
1.5GeV付近ではスムーズに変化している
本実験の方が明らかに誤差が少ない

以前の実験結果との比較 (スペクトラル関数)

(本研究): 4 π スペクトラル関数



ALEPH実験: 4 π スペクトラル関数



本実験の方が明らかに誤差が少ない

2 GeV^2 以上のふるまいが大きく異なる

今後この結果は理論的な
研究に用いられる!

まとめ

- Belle実験で2000年10月から2008年6月に収集した775.9/fbのデータから $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 事象 2.4×10^6 事象観測。
- e- μ 事象の観測も同時に行い 8.1×10^6 事象観測し、 $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ 事象の崩壊分岐比 $B_{4\pi} = 4.53 \pm 0.13$ と測定。世界平均と誤差範囲内で一致。
- SVD法でアンフォールドした 4π 質量²分布と測定した崩壊分岐比を用いてスペクトラル関数を測定。現在**もっとも精度の良い測定結果**である。
- 今後はこの結果を用いて理論的な解析に使われる予定。