

# タウ・チャーム・ハドロンの物理@BELLE II

早坂 圭司  
(新潟大学)

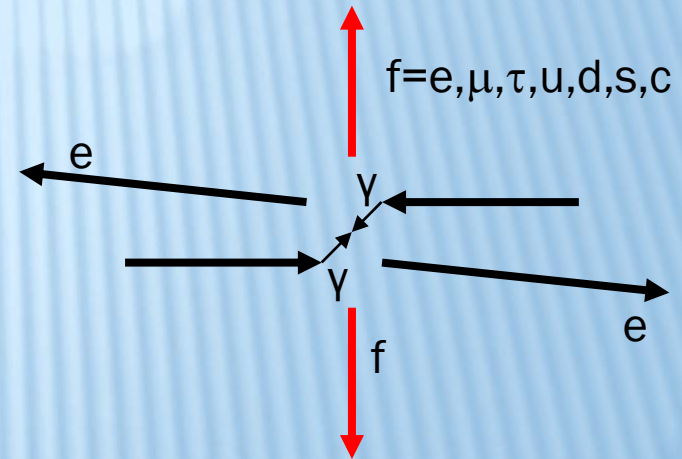
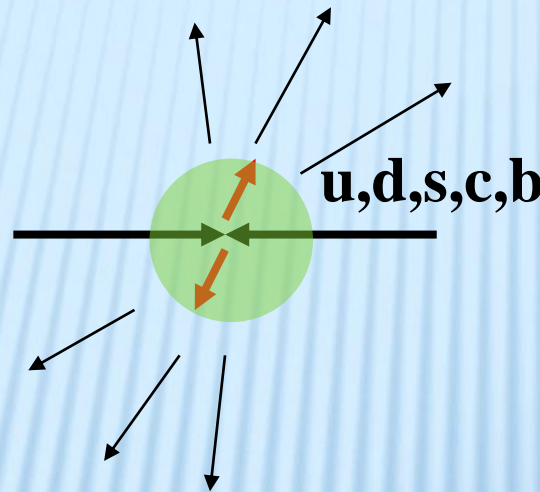
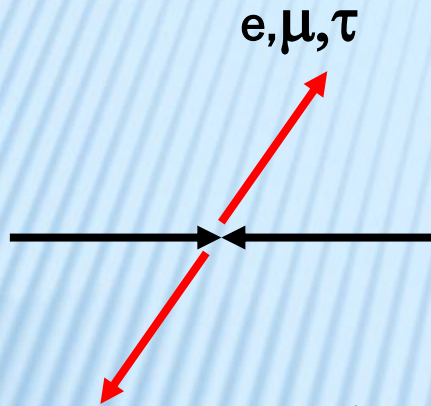
# Bファクトリーで生成されるイベント

✖ Bファクトリーで生成されるのは $B\bar{B}$ だけではない！

レプトン

クォーク

2光子過程 ( $ee \rightarrow \gamma\gamma \rightarrow eeff$ )



$ee \rightarrow ee$ はBhabha過程と呼ばれる。一緒に $\gamma$ が生成される過程はradiativeという形容詞がつく (Radiative Bhabha =  $ee \rightarrow eey$ )

$$\begin{aligned} \sigma(\mu\mu) &\sim \sigma(d\bar{d}) \sim \sigma(c\bar{c}) \sim \sigma(b\bar{b}) \sim \sigma(\tau\tau) \sim 1\text{nb} \\ \sigma(\text{habha}) &\sim 120 \times \sigma(\tau\tau) \\ \sigma(eeee) &\sim 40 \times \sigma(\tau\tau), \quad \sigma(ee\mu\mu) \sim 20 \times \sigma(\tau\tau), \\ \sigma(eeuu) &\sim 10 \times \sigma(\tau\tau) \end{aligned}$$

**B以外の素粒子も十分大量に**

# タウの物理

---

## タウレプトン

### 特徴

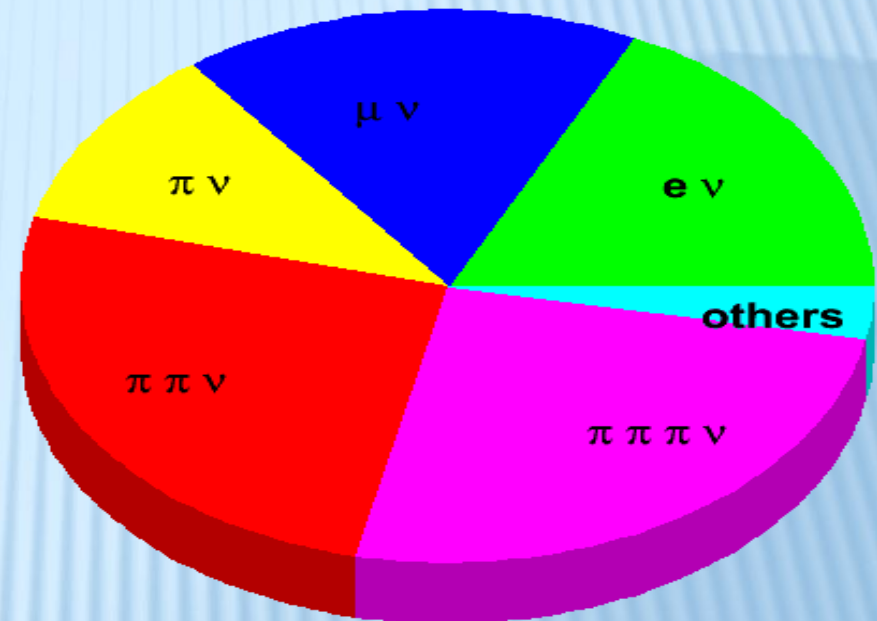
- ✖ 荷電レプトン=電子の仲間
- ✖ 3つ目の荷電レプトン
  - + triton (third) = τριτονの頭文字
- ✖ 最も重いレプトン
  - +  $m_\tau = 1.8\text{GeV}/c^2 =$  崩壊様式が多様
  - cf.  $m_\mu < m_\pi$  なので  $\mu$  は電子にしか
- ✖ 弱い相互作用で崩壊 崩壊できない
  - + 崩壊モードは多彩
  - (ミューオンはせいぜい3種類)

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
$\tau$ tau	1.7771	-1

<http://CPEPweb.org>

# タウレプトンの崩壊

- × レプトニック崩壊 35%
- × 1-prong 崩壊 85%  
(荷電粒子が1個)
- × 3-prong 崩壊 15%
- × 5-prong 崩壊 0.1%
- ×  $\Delta S=1$ 崩壊 3%



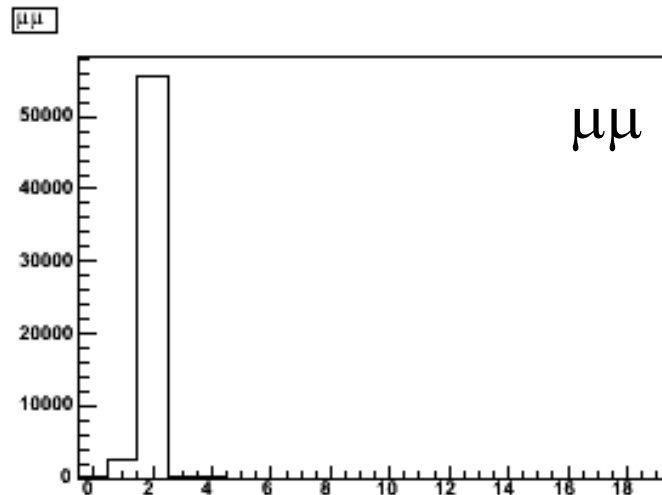
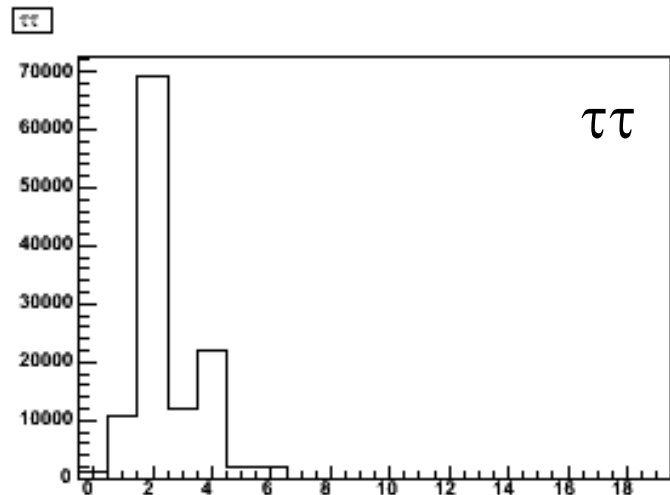
# Bファクトリーでのタウ事象

- ✖ Bファクトリーでは、必ずタウはペアでできる  
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$$

7割2分は2-prong, 2割5分は4-prong, 2分は 6-prong  
タウ事象はクォーク事象に比べてprong数が低い

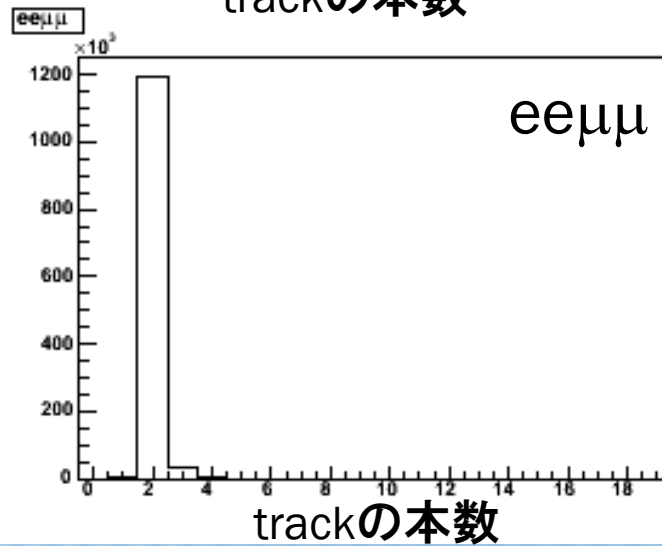
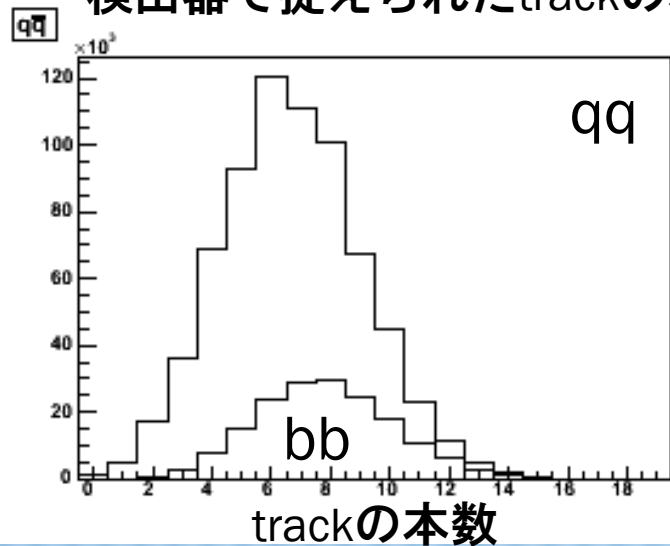
ここでタウ事象とその他の事象の違いを見てみよう

# タウイベントの特徴（１）



検出器で捉えられたtrackの本数

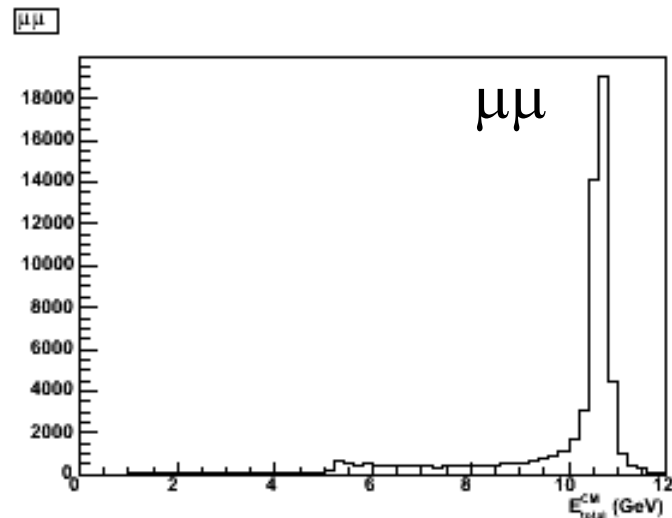
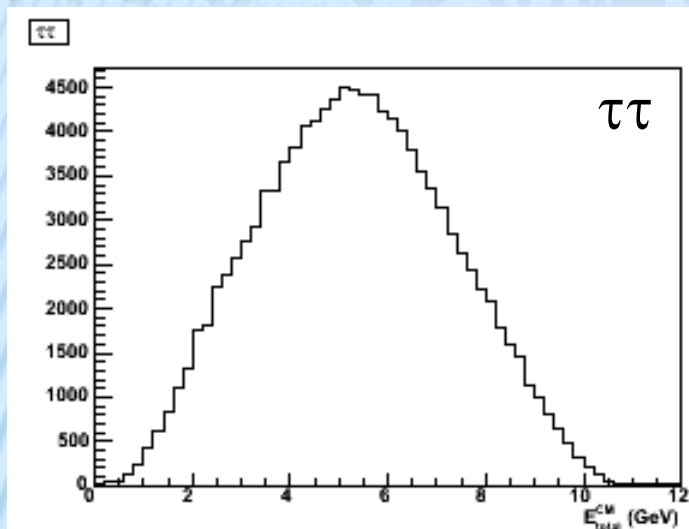
trackの本数



trackの本数

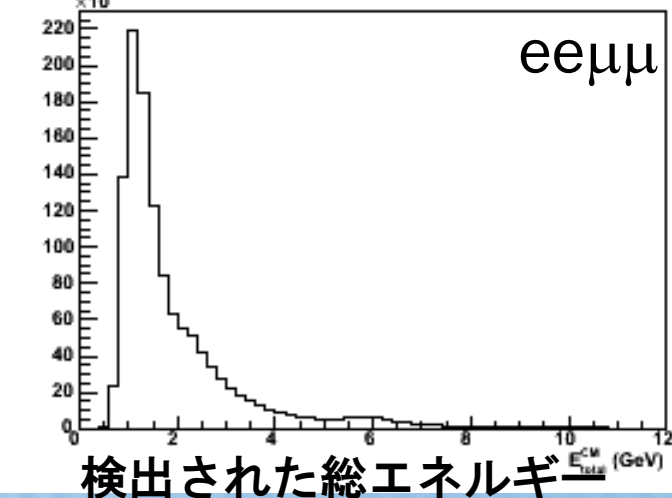
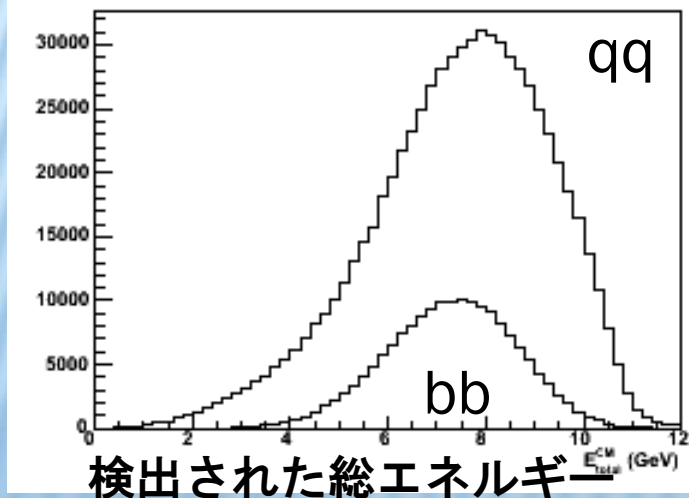
trackの本数

# タウイベントの特徴 (2)



$q\bar{q}$  検出された総エネルギー@CM

$e\bar{e}\mu\mu$  検出された総エネルギー@CM



検出された総エネルギー

検出された総エネルギー

# タウのいいところ・わるいところ

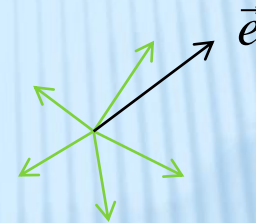
- ✕ 荷電粒子の本数が他の事象に比べて少ない
- ✕ (光子の数も少ない) のでクォーク事象と区別しやすい  
一方で、タウの崩壊では必ず(\*)ニュートリノを伴うので、  
タウの完全再構成は不可能
  - + ほぼ1 prongなので、親タウの情報はあまりない。  
(エネルギーが低いのもニュートリノが検出されないせい)
- ✕ Bファクトリーの $\sqrt{s}=10.6$  GeVに比べてタウペア3.5GeVは  
かなり低いのでタウは高運動量で生成される。(B中間子  
はほぼ止まっている) →どっちのタウの子か分離しやすい
- ✕ タウの方向はよくわかんない

\*SMの範囲内で

# THRUST VECTOR

見えている荷電粒子  
光子全ての和

$$T = \frac{\sum |\vec{p}_i \cdot \vec{e}|}{\sum |\vec{p}_i|}$$

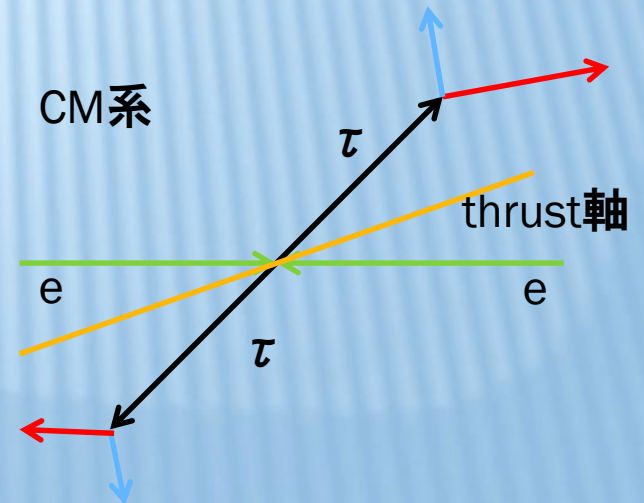


いろいろな  $\vec{e}$  に対して  $T$  を計算して  
最も大きな  $T$  を与える  $\vec{e}$  を向きとして  
大きさを  $T$  とするベクトルを Thrust vector  
と呼ぶ。

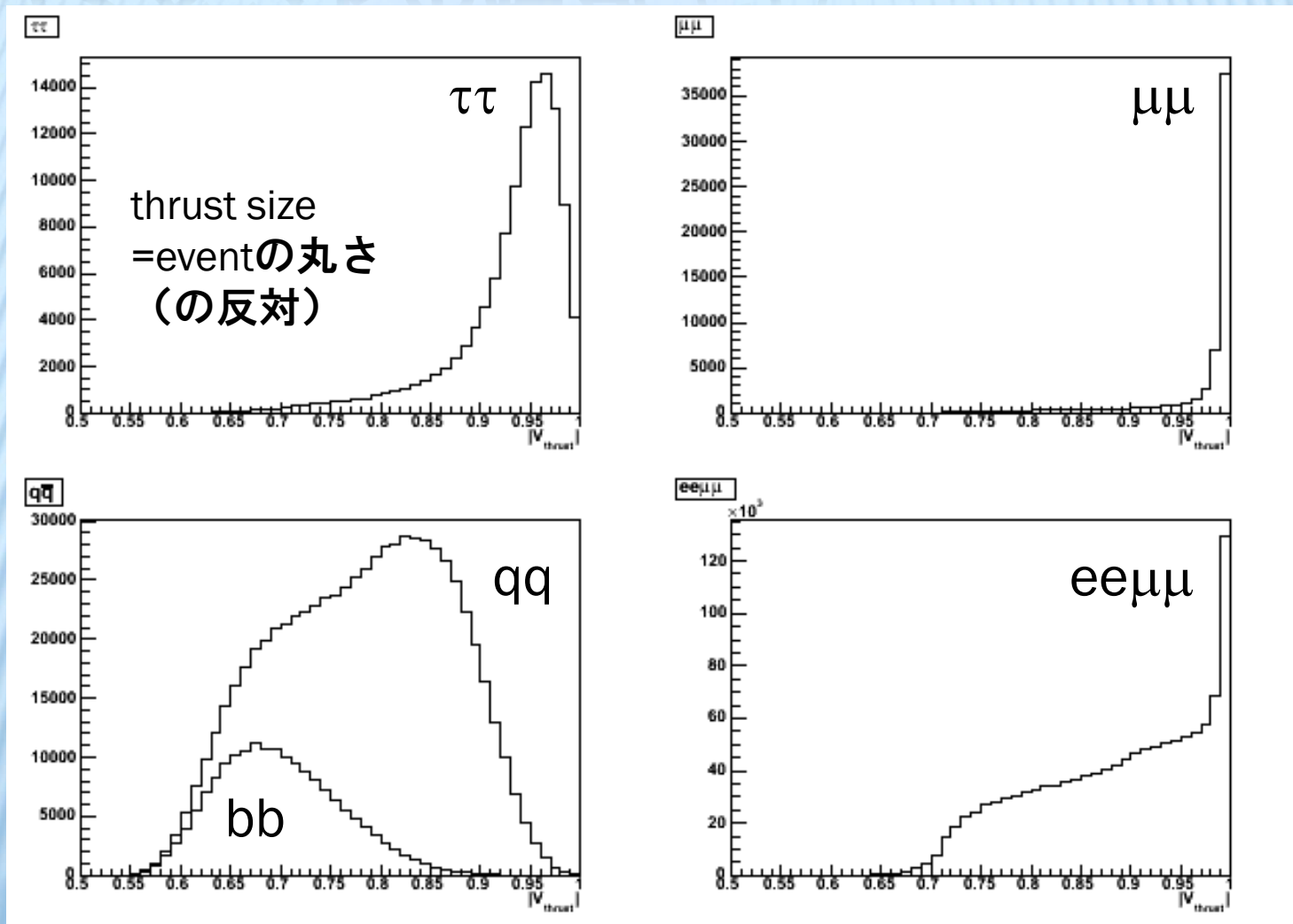
→見えている荷電粒子、光子が  
一番運動量を落とす方向

似たような概念に、acoplanarityと  
sphericityがある。

$\tau$  対事象は、ニュートリノが  
あって、 $\tau$  の方向が決められない  
ので、その“代用品”として便利



# タウイベントの特徴 (3)



# タウ事象の特徴（まとめ）

✖ trackの本数（photonの数）

$bhabha, \mu\mu < 2\text{photon} < \tau\tau \ll qq$

✖ Total energy (逆の相関：欠損運動量)

$2\text{photon} \ll \tau\tau < qq < bhabha, \mu\mu$

✖ size of thrust vector

$qq < \tau\tau < bhabha, \mu\mu$

タウ事象は、タウ自身を再構成できないために、  
上記のような条件から、タウ事象とその他の事象を区別して解析に臨む

# レプトンフレーバの保存則

## × レプトンフレーバ数

+ 電子と電子ニュートリノ : 電子フレーバ数 1

+  $\mu^-$  と  $\mu$  ニュートリノ :  $\mu$  フレーバ数 1

+  $\tau^-$  と  $\tau$  ニュートリノ :  $\tau$  フレーバ数 1

※反粒子には -1 を割り当てる

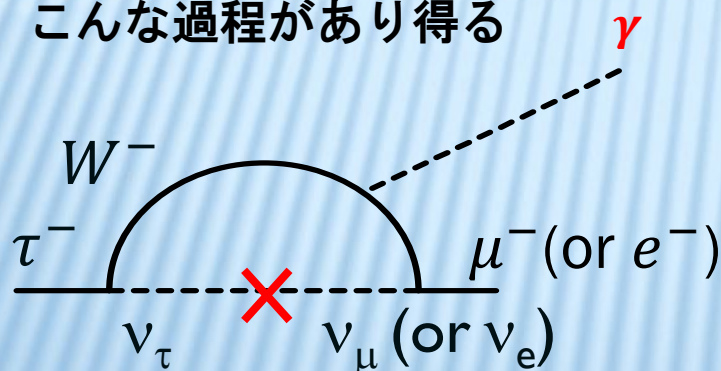
	$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu_\tau \bar{\nu}_\mu$			$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau$			$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$		
電子フレーバ数	0	0	0 0	0	0	0 0	0	1	0 - 1
$\mu$ フレーバ数	0	1	0 - 1	0	0	0 0	1	0	1 0
$\tau$ フレーバ数	1	0	1 0	1	0	1 0	0	0	0 0

反応の前後でレプトンフレーバ数の合計は一致する

# レプトンフレーバの破れ

- ✖ ニュートリノ振動の発見によってレプトンフレーバの保存則は厳密には成り立っていないことが明らかになった。=荷電レプトンにもレプトンフレーバが破れた(LFV)現象が見えるはず

こんな過程があり得る



しかし、計算してみると

$$Br(\tau \rightarrow \ell \gamma)_{SM} \propto \left( \frac{\delta m_\nu^2}{m_W^2} \right)^2 < 10^{-54}$$

あまりにも小さい！

しかし、ここでくじけてはいけない！

# 「（ほぼ）ない」という予言はチャンス

- × 既存の理論（SM）が「（ほぼ）ない」と言っているものは実験家にとっては**チャンス**
- × **新物理は「ない」ところほど見えやすい**
  - + 「ある」ところに現れた新物理は  
「ある」 $\gg$ 新物理 なので「ある」の  
いろいろなエラーに埋もれる

treeがなく、loopから始まる過程なんかは典型的

# 「（ほぼ）ない」という予言はチャンス

- × 既存の理論 (SM) が「（ほぼ）ない」と言っているものは実験家にとっては**チャンス**
  - × **新物理は「ない」ところほど見えやすい**
    - + 「ある」ところに現れた新物理は  
「ある」 $\gg$ 新物理 なので「ある」の  
いろいろなエラーに埋もれる
- 「ない」ところが「ある」になったら = 新物理**  
treeがなく loopから始まる過程なんかは典型的

# 「(ほぼ)ない」という予言はチャンス



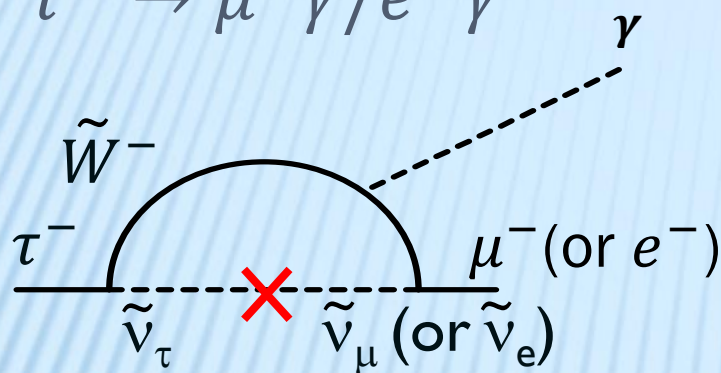
# では、どんなモードが考えられる？

## ✖ とりあえず、電荷保存とスピン保存は守る

- +  $\tau^- \rightarrow \mu^- \gamma / e^- \gamma$  一番あり得そうなモード
- +  $\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$  ( $\tau^- \rightarrow \ell^- \ell^+ \ell^-$ ,  $\ell = e, \mu$ ) 一番解析が楽なモード
- +  $\tau^- \rightarrow \mu^- e^+ \mu^-$ ,  $e^- \mu^+ e^-$  Lepton number も破れているモード  
double charged Higgs? ( $H^{++}$ )
- +  $\tau^- \rightarrow \mu^- \eta$  ( $\tau^- \rightarrow \ell^- P^0$ ,  $P^0 = \pi^0, \eta, \eta', K_s^0$ ) Higgs mediated で enhance されそうなモード
- +  $\tau^- \rightarrow \mu^- \pi^+ \pi^-$  ( $\tau^- \rightarrow \ell^- h^+ h^-$ ,  $h = \pi, K$ ) これも Higgs mediated
- +  $\tau^- \rightarrow \mu^+ \pi^- \pi^-$  ( $\tau^- \rightarrow \ell^+ h^- h^-$ ) LNV,  $H^{++}$
- +  $\tau^- \rightarrow \pi^- \Lambda / \pi^- \bar{\Lambda}$  ( $\tau^- \rightarrow h^- \Lambda$ ) LFV だけじゃなくて Baryon NV  
他にも  $\tau \rightarrow \ell V^0, \tau \rightarrow \ell h^0 h^0$  など

# 様々なLFV崩壊 (1)

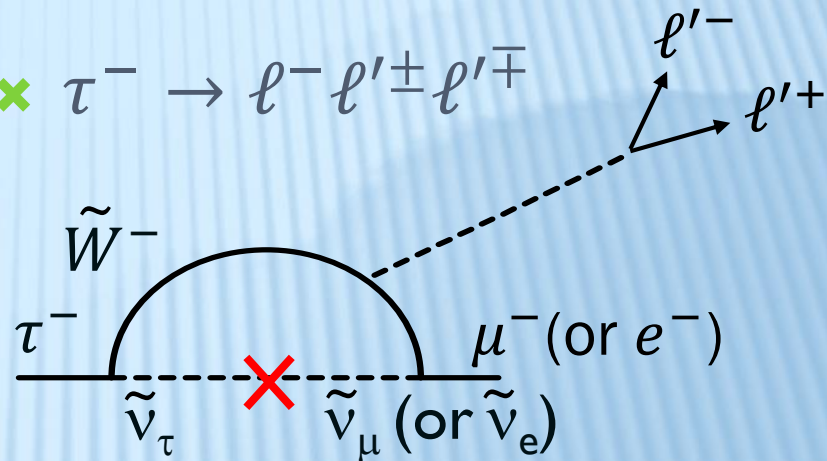
✖  $\tau^- \rightarrow \mu^- \gamma / e^- \gamma$



cf.  $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$

※ここで出した過程は一例です。  
この過程で必ず引き起こされるとは  
限りません。

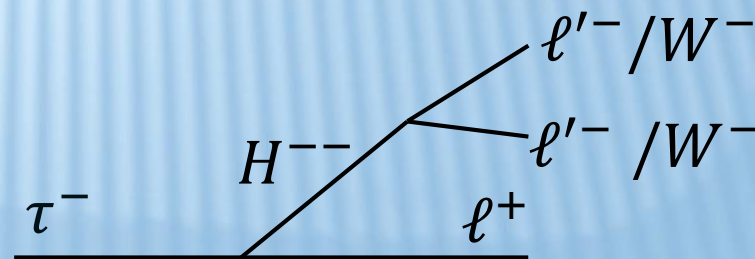
✖  $\tau^- \rightarrow \ell^- \ell'^{\pm} \ell'^{\mp}$



cf.  $\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-$

$h = \pi, K$

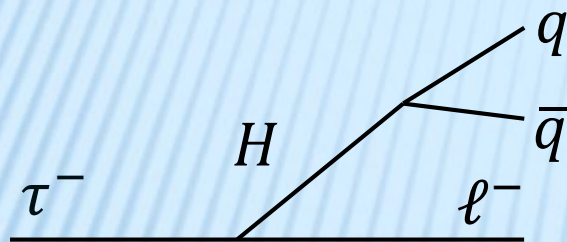
✖  $\tau^- \rightarrow \ell^+ \ell'^- \ell'^- / h^- h^-$



cf.  $\mu$  崩壊では対応なし

# 様々なLFV崩壊 (2)

✖  $\tau^- \rightarrow \ell^- P^0 / \ell^- h^+ h'^-$   
 $P^0 = \pi^0, \eta, \eta', h^\pm = \pi^\pm, K^\pm$



cf.  $\mu^- \rightarrow e^-$  転換

$\mu^-$	$e^-$
$q$	$q$

✖  $\tau^- \rightarrow h^- \Lambda / \bar{\Lambda}$

複雑すぎて絵が描けません

※  $\Lambda(uds)$ : 中性バリオン

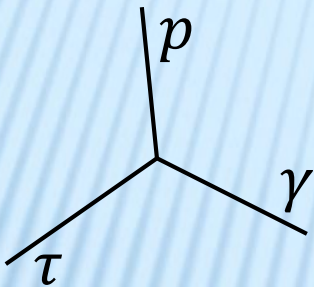
レプトン数をL, バリオン数をB  
 とすると、

	$\tau^-$	$h^- \Lambda$	$h^- \bar{\Lambda}$
レプトン数	1	0	0
バリオン数	0	1	-1
B-L	-1	1	-1
B+L	1	1	-1

GUTはB-Lは保存するようになっている

# 様々なLFV崩壊（ちなみに...）

- ×  $\tau^- \rightarrow \bar{p}\gamma$ を考えないのですか？と時々聞かれます。  
陽子質量1GeV, タウ質量1.8GeVなので可能そうです。



こういう実効相互作用がある程度の  
(Belle II実験で見えるくらいの)  
強さであったとするとぐるっと回すと  
仮想タウを通じて陽子崩壊を引き起こしそうです。

我々のリストには陽子に関するLFV崩壊は入れていません。

# 信号の見分け方（1）

✖ タウLFV崩壊はニュートリノを含まないので、  
完全再構成できる

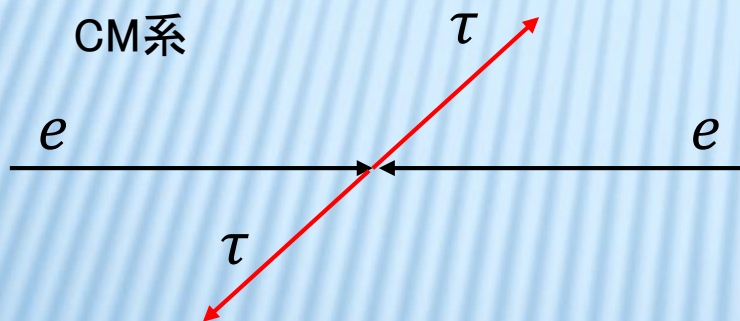
→信号はタウの子供候補の4元運動量を足し合わせて  
不変質量を組むとタウ質量付近になるはず。

そんなわけで、タウLFVを見ようとする事は  
人類で始めてレプトンピークを見ようとする試みでもあります。

# 信号の見分け方（2）

- ✖ タウLFV崩壊はニュートリノを含まないので、完全再構成できる

→Bファクトリーで対生成されるタウに関してはもう1つ利用できる変数があります。



エネルギー保存則を考えると

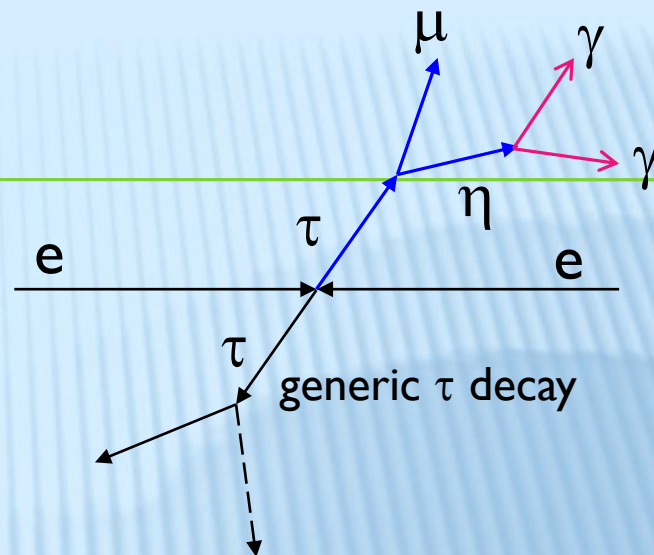
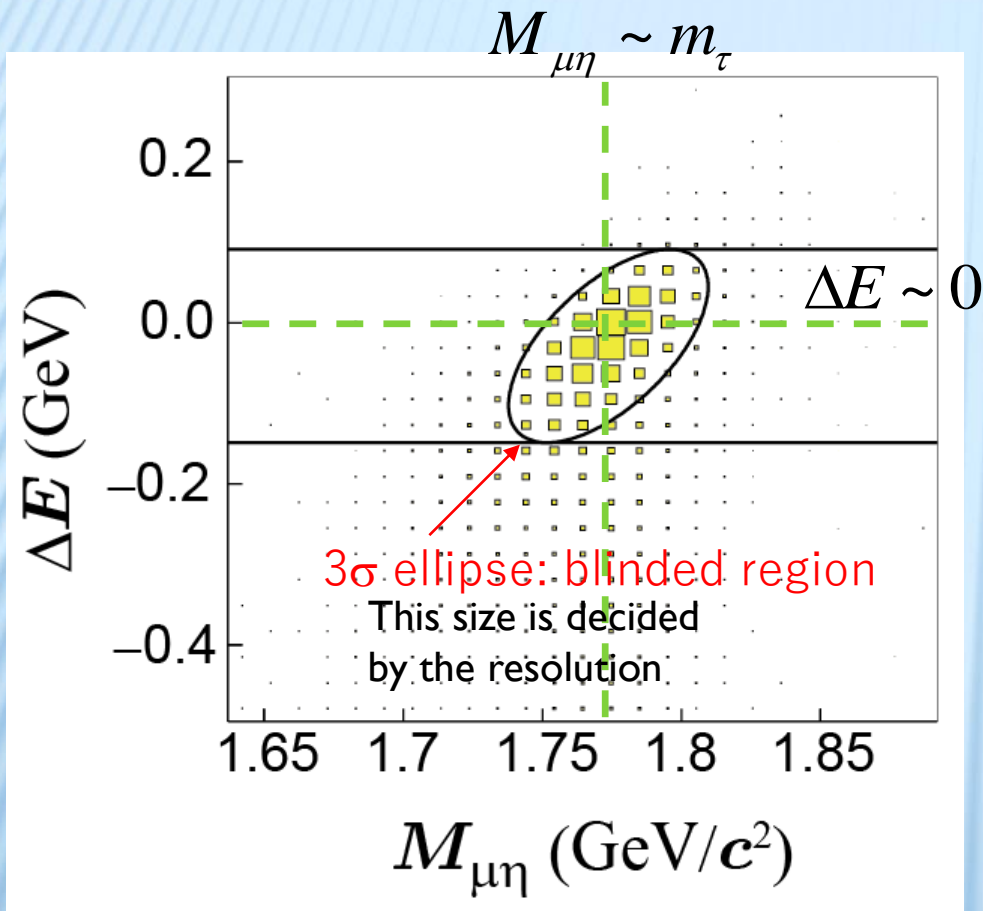
$$2E_e^{CM} = 2E_\tau^{CM}$$

よって

$$\Delta E = E_\tau^{CM} - E_e^{CM} = 0$$

$E_e^{CM}$  はわかっているので例えば  $\mu$  と  $\gamma$  のエネルギーから  $\Delta E$  を評価してあげると信号なら0付近の値になるはず。

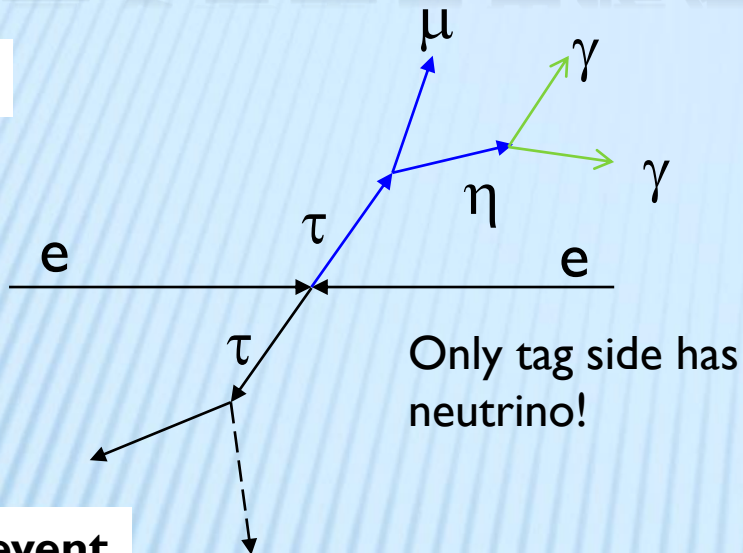
# 信号の見分け方（その3）



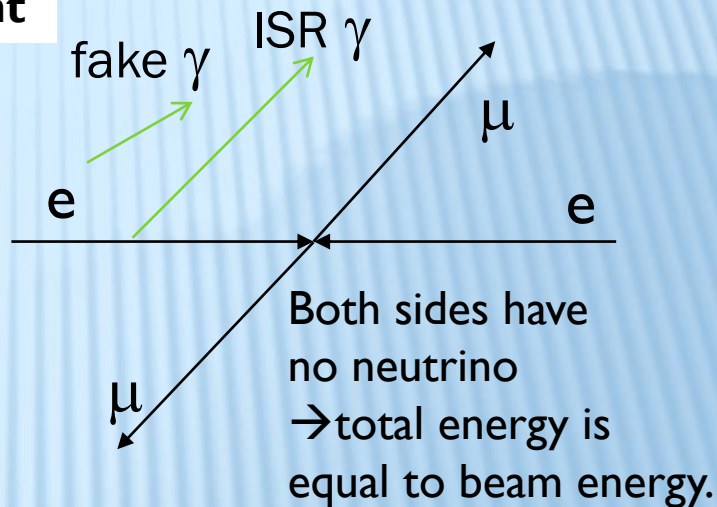
- ✖ 実際には先ほどの $\Delta E$ と再構成した不変質量との2次元平面を考える
- ✖ 検出器には測定精度（分解能）があるので、実際の信号は広がりを持って観測される

# 信号と背景事象候補

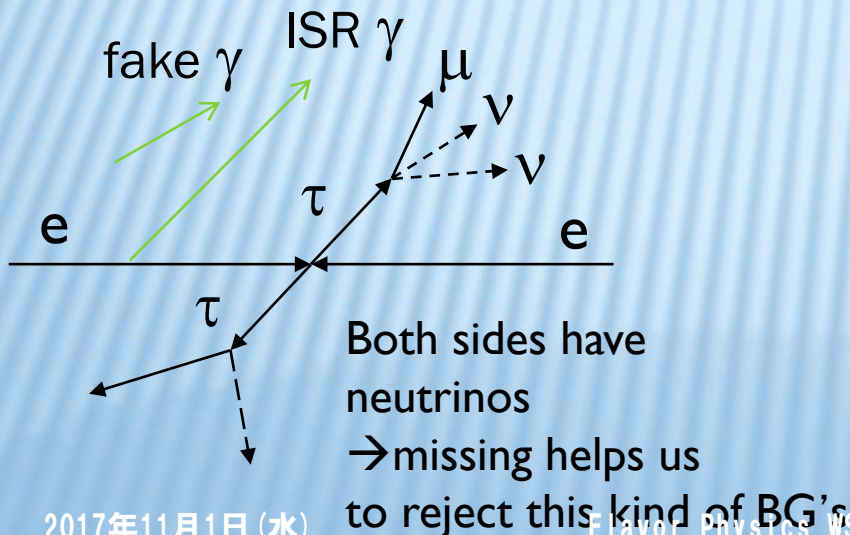
signal



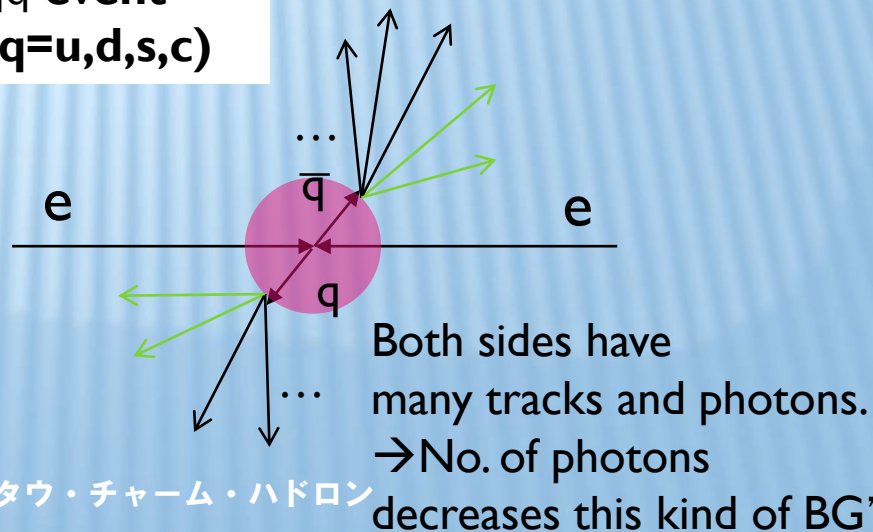
$\mu\mu$  event



SM  $\tau\tau$  event

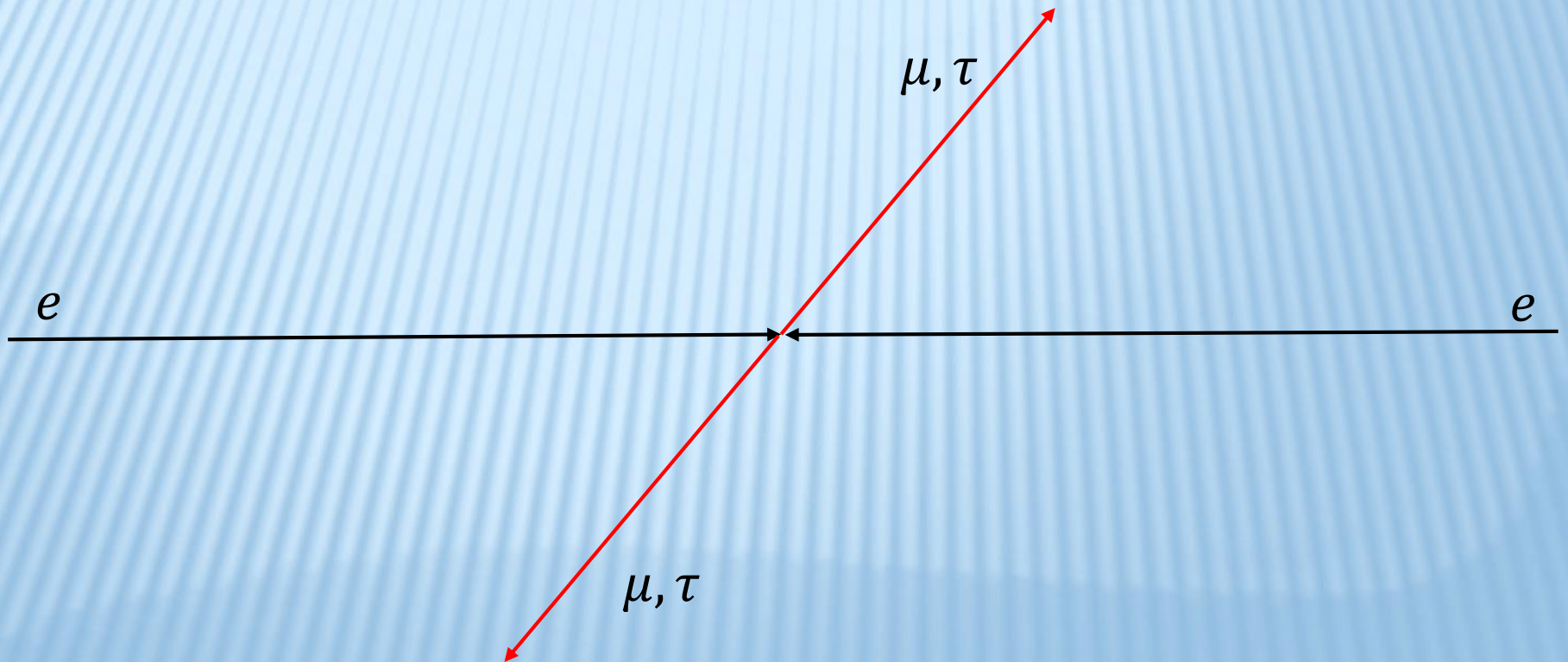


$q\bar{q}$  event  
( $q=u,d,s,c$ )



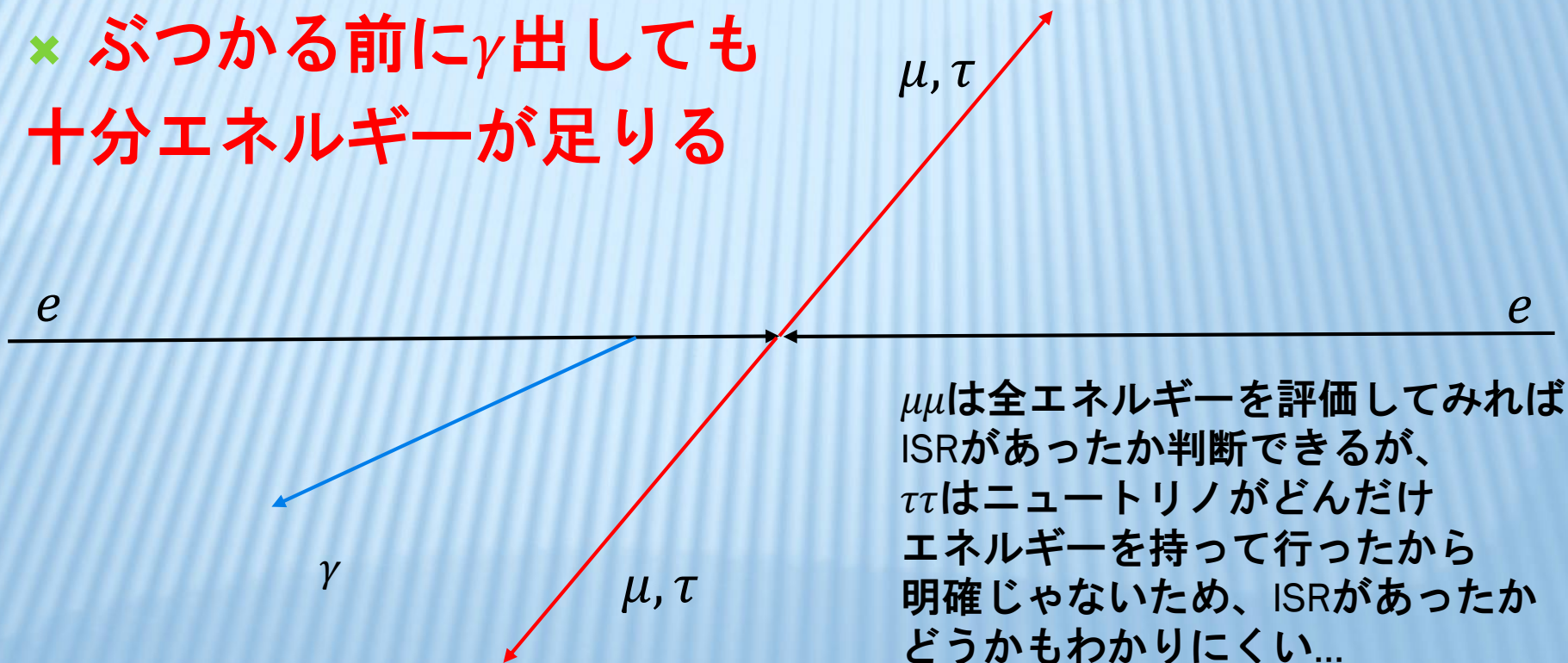
# INITIAL STATE RADIATION (ISR)

- ✖  $\tau\tau$  とか  $\mu\mu$  とかは Bファクトリーのエネルギー 10.6 GeV に比べると十分に軽い

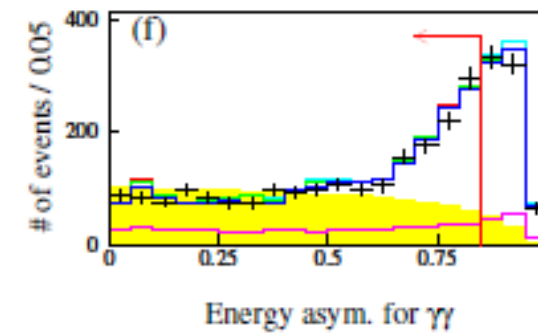
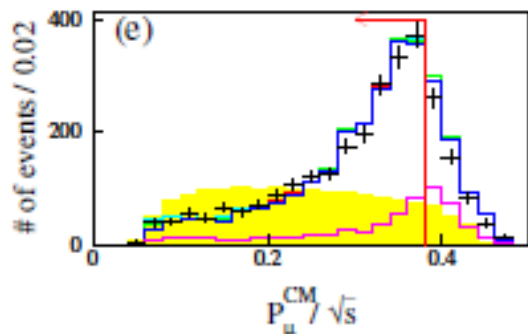
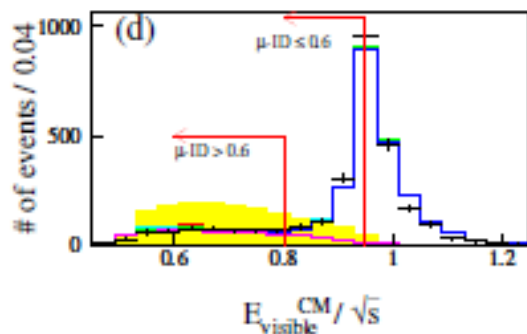
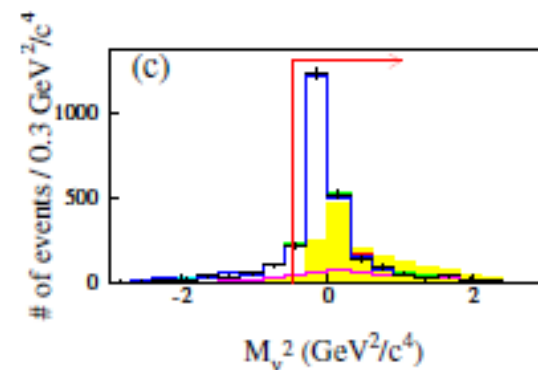
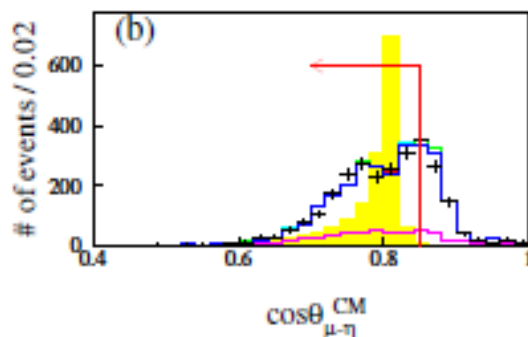
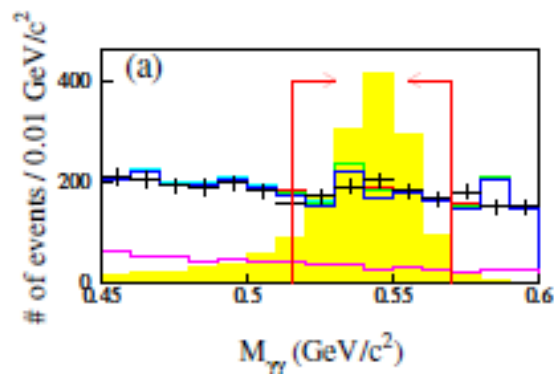


# INITIAL STATE RADIATION (ISR)

- ✖  $\tau\tau$ とか $\mu\mu$ とかはBファクトリーのエネルギー10.6GeVに比べると十分に軽い
- ✖ **ぶつかる前に $\gamma$ 出しても十分にエネルギーが足りる**



# 事象選別

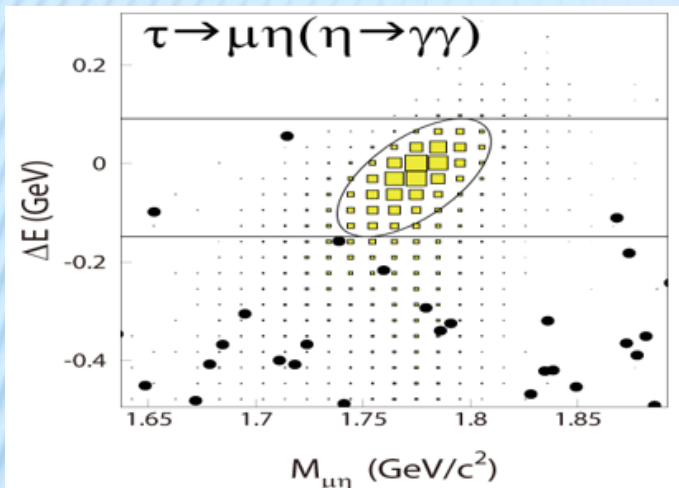


+ 実験データ

■ : 信号のシミュレーション

- : BGのシミュレーション

# 実際の解析と結果の評価

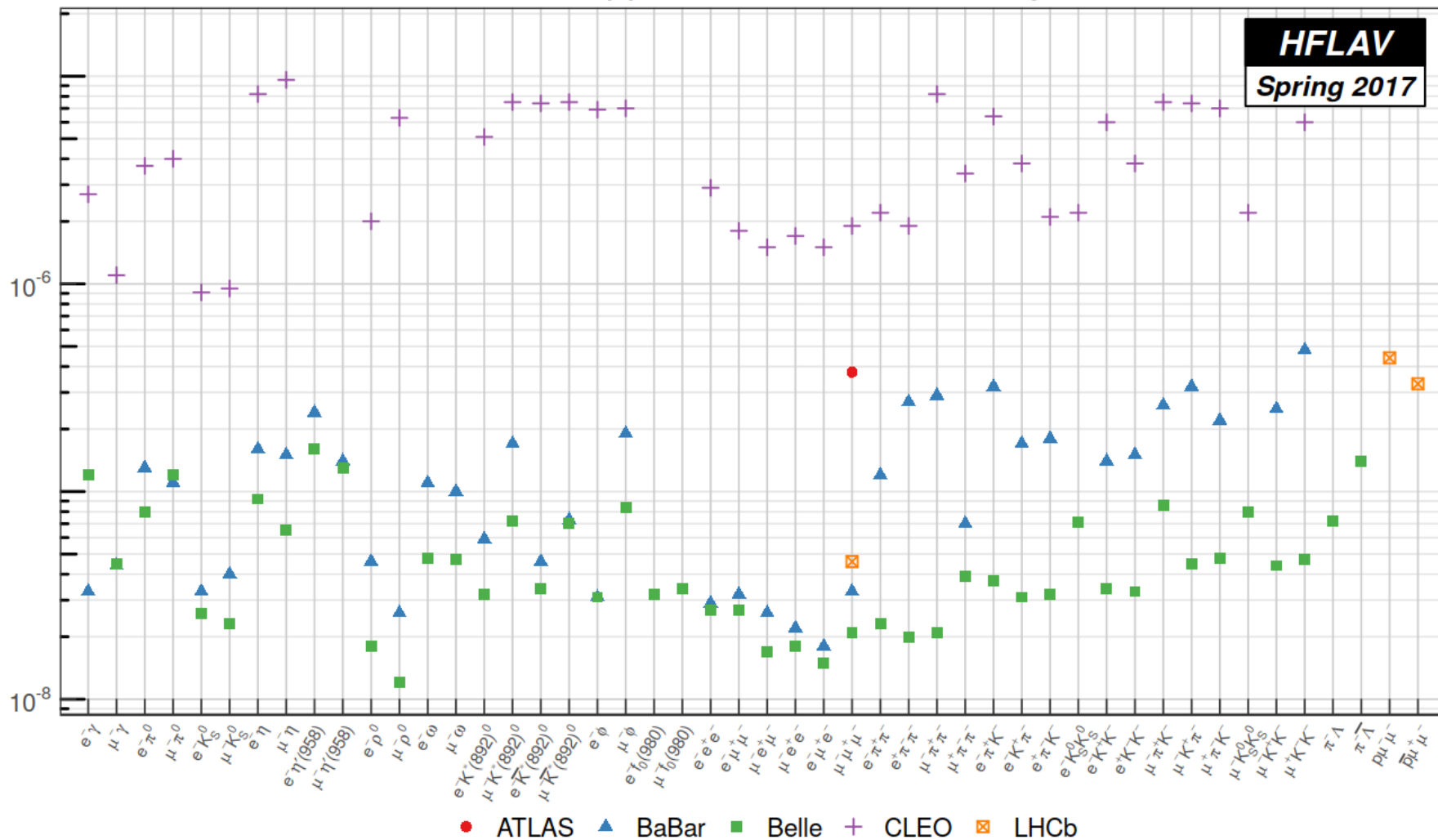


- ✖ 実際の解析では楕円の中のデータは見ないで進める。(信号を恣意的に引き出してしまおうのを防ぐため: blind analysis)

平行線の間は背景事象は均等に分布していると仮定して平行線の間的事象数を数えて面積比から楕円の中に分布すると期待される背景事象数を推定する。楕円の中を見た時、背景事象より有意な数の信号が見られれば発見！そうでなければ統計操作によって信号数の上限値を評価→分岐比の上限値

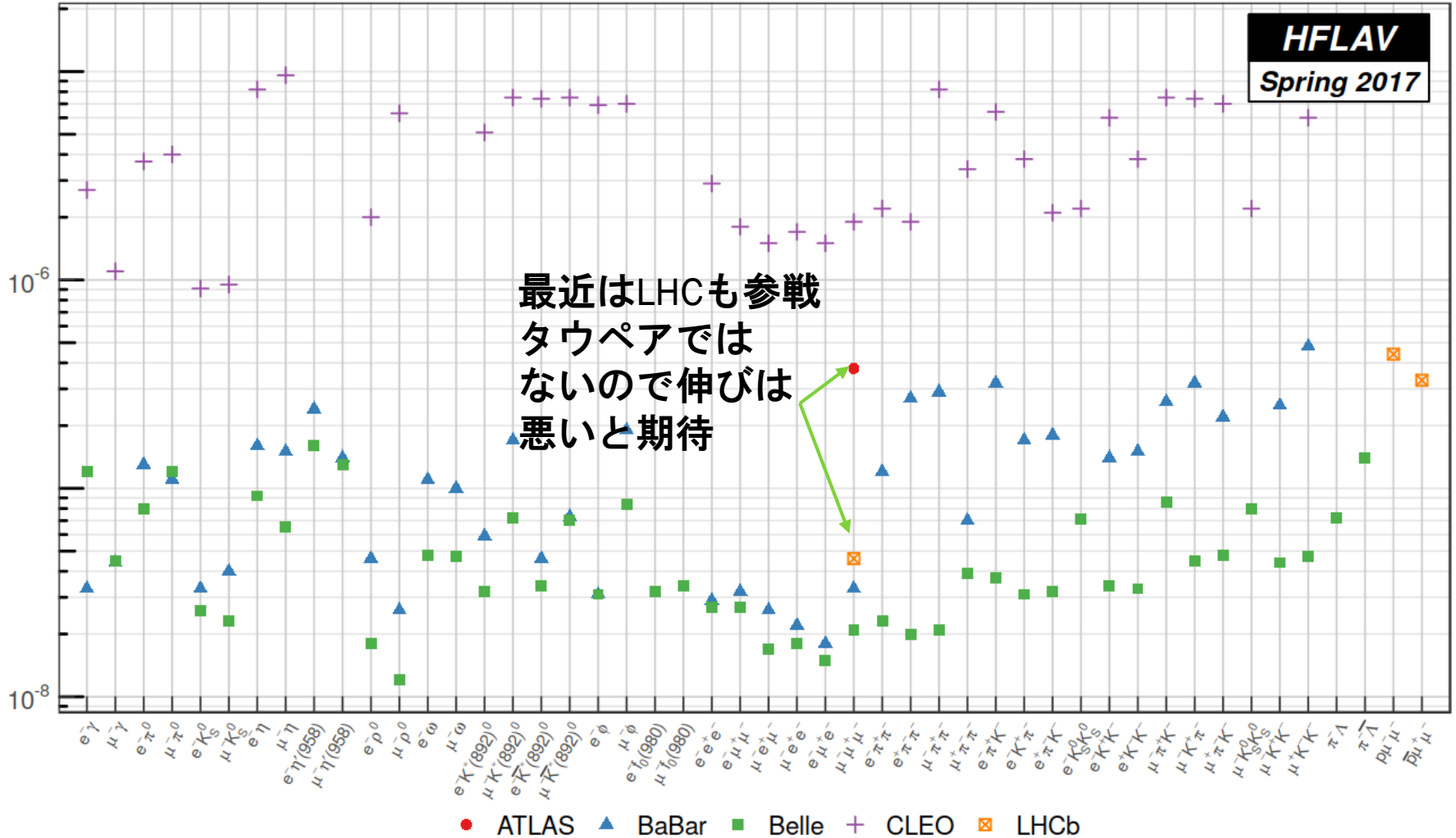
# 今までの結果

90% CL upper limits on  $\tau$  LFV decays



# 今までの結果

90% CL upper limits on  $\tau$  LFV decays



# $\tau \rightarrow \mu\gamma, \mu\eta, \mu\mu\mu$ 解析の特徴

## × 一般論として

信号終状態に $\gamma$ がある時 : ISR や fake  $\gamma$ と区別が付けにくい。そもそも $\gamma$ のエネルギー分解能は荷電粒子の運動量分解能よりも悪い。

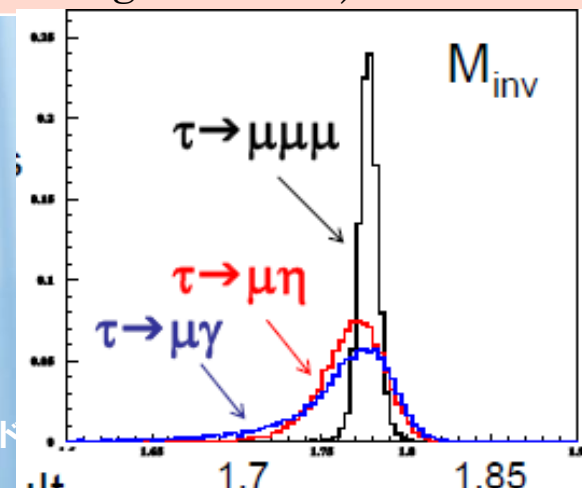
信号終状態にleptonがある時 : 効率高く識別可、fake少、分解能よし

	BG rejection	Mass resolution
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	very hard	bad ( $\gamma$ )
$\tau \rightarrow \mu\eta$	hard (but $\eta$ mass window helps)	bad ( $2\gamma$ , but $\eta$ mass window helps)
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$	easy( $\mu$ ID x3)	good (only charged tracks)

しかも、 $\tau \rightarrow \mu\gamma$  は登場粒子2つなので、力学的な情報もとぼしい

	Main BG
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$ee \rightarrow \mu\mu + \gamma, \tau \rightarrow \mu\nu\nu + \gamma, \tau \rightarrow \pi\nu + \gamma$
$\tau \rightarrow \mu\eta$	$ee \rightarrow \mu\mu + \gamma\gamma, \tau \rightarrow \mu\nu\nu + \gamma\gamma, \tau \rightarrow \pi\nu + \gamma\gamma$
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$	$ee \rightarrow \mu\mu\mu\mu, ee\mu\mu$

タウ・チャーム・ハド



# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

- × 上限値 = 
$$\frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}}$$

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数  
生成断面積 × 積分ルミノシティ

$S_{90}$ : 信号数の上限値

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

- × 上限値 = 
$$\frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}}$$

BG free

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数  
生成断面積 × 積分ルミノシティ

$S_{90}$ : 信号数の上限値

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

- × 上限値 =  $\frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}}$

BG free

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数  
生成断面積 × 積分ルミノシティ

$\propto L$

$S_{90}$ : 信号数の上限値

一定

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

- × 上限値  $= \frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}} \propto 1/L$

BG free

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数  $\propto L$   
生成断面積  $\times$  積分ルミノシティ

$S_{90}$ : 信号数の上限値 一定

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

- × 上限値  $= \frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}} \propto 1/L$

BG free      BG 多い

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数       $\propto L$   
生成断面積  $\times$  積分ルミノシティ

$S_{90}$ : 信号数の上限値      一定

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

- × 上限値  $= \frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}} \propto 1/L$

BG free      BG 多い

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数       $\propto L$        $\propto L$   
 生成断面積  $\times$  積分ルミノシティ

$S_{90}$ : 信号数の上限値      一定       $\propto \sqrt{L}$

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# Belle IIでは...

- × Belle IIではSuperKEKBの性能があがり輝度があがったためにfake  $\gamma$ が増えると考えられている (fake  $\gamma$ の起源は衝突に参加しなかった電子や1回前のBhabha過程)

× 上限値 =  $\frac{S_{90}}{2\varepsilon N_{\tau\tau}}$   $\propto 1/L$     $\propto 1/\sqrt{L}$

BG free      BG 多い

$N_{\tau\tau} = \sigma L$ : 解析に使ったタウペア事象数  $\propto L$        $\propto L$   
 生成断面積 × 積分ルミノシティ

$S_{90}$ : 信号数の上限値 一定       $\propto \sqrt{L}$

$\varepsilon$ : 信号検出効率

# CPV IN TAU DECAYS

- × LFV同様荷電レプトンセクターにCPVは見えていません。ニュートリノは見つかりそう  
→発見 = BSMの存在

一つの予言としてWの代わりにスカラー粒子が飛んだときにCPVが起きる

- × どんなモードで？

→  $\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm K_S^0 \nu$  (Phys. Rev. Lett. 107, 131801 (2011))

- × どういう形でCPVを見るのか？

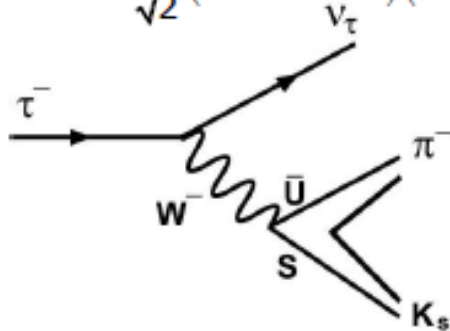
→  $\tau^+$  と  $\tau^-$  の崩壊で角度分布の違いを見る

# CPV SEARCH IN $\tau \rightarrow \pi K_S^0 \nu$

## -Effective Hamiltonian

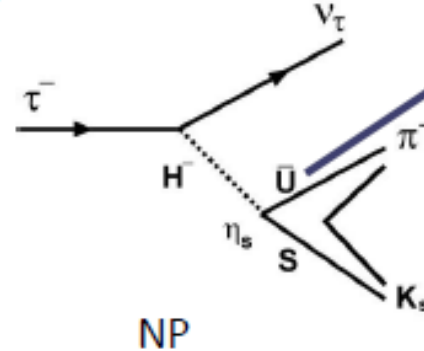
SM

$$H_{SM} = \sin \theta_c \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\nu} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) \tau) (\bar{s} \gamma_\mu (1 - \gamma_5) u)$$



Scalar Boson

$$H_{NP} = \sin \theta_c \frac{G}{\sqrt{2}} (\bar{\nu} (1 + \gamma_5) \tau) (\bar{s} (\eta_s + \eta_p \gamma_5) u)$$



複素結合定数

$$J_\mu^{K\pi} = \langle K(p_1) \pi(p_2) | \bar{s} \gamma_\mu u | 0 \rangle$$

$$= (p_1 - p_2)^\nu T_{\nu\mu} F(Q^2) + Q_\mu F_s(Q^2)$$

$$T_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - \frac{Q_\mu Q_\nu}{Q^2}$$

形状因子：F (ベクター)  
F<sub>s</sub> (スカラー)

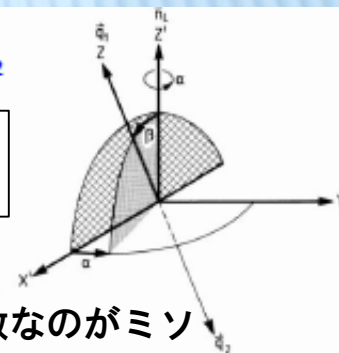
$$F_s(Q^2) \rightarrow F_s(Q^2) = F_s(Q^2) + \frac{\eta_s}{m_\tau} F_H(Q^2)$$

$$F_H(Q^2) \equiv \langle K(p_1) \pi(p_2) | \bar{s} u | 0 \rangle$$

# 微分崩壊率とCPV

$$\frac{d\Gamma(\tau^-)}{dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta} = [A(Q^2) - B(Q^2)(3\cos^2\Psi - 1)(3\cos^2\beta - 1)] \cdot |F|^2 + m_\tau^2 |F_s|^2 - C(Q^2) \cos\beta \cos\psi \cdot \text{Re}(FF_s^*(\eta_s))$$

CPVがここに現れる



※ $\eta$ が複素数なのがミソ

$Q^2 = M_{K\pi}^2$ ,  $A(Q^2), B(Q^2), C(Q^2)$ : known function.

$\beta$ : direction of  $K_S$  in  $K_S\pi$  rest frame

$\Psi$ : direction of  $\tau$  in the  $K_S\pi$  rest frame.

( $\theta$ : direction of  $K_S\pi$  system in the  $\tau$  rest frame. Correlated with  $\Psi$ )

$$A_i^{\text{CP}} = \frac{\iiint_{Q_{1,i}^2}^{Q_{2,i}^2} \cos\beta \cos\psi \left( \frac{d\Gamma_{\tau^-}}{d\omega} - \frac{d\Gamma_{\tau^+}}{d\omega} \right) d\omega}{\frac{1}{2} \iiint_{Q_{1,i}^2}^{Q_{2,i}^2} \left( \frac{d\Gamma_{\tau^-}}{d\omega} + \frac{d\Gamma_{\tau^+}}{d\omega} \right) d\omega}$$

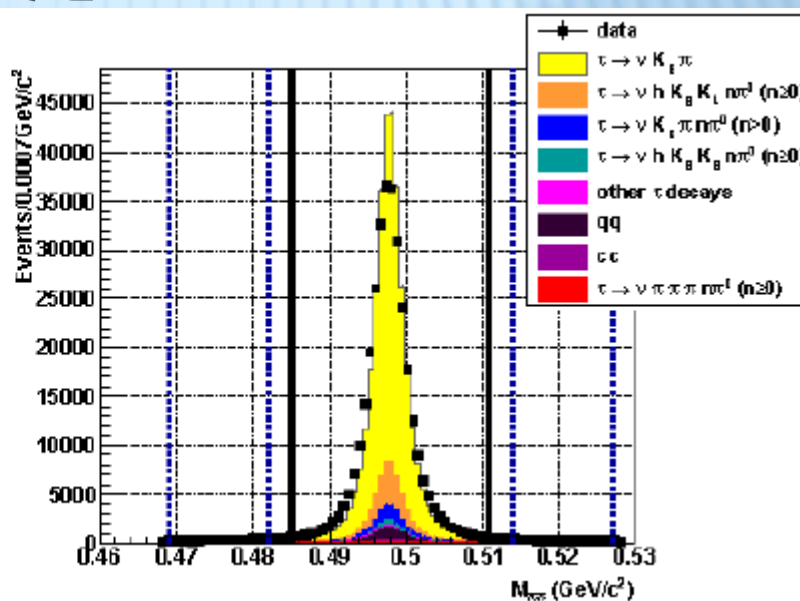
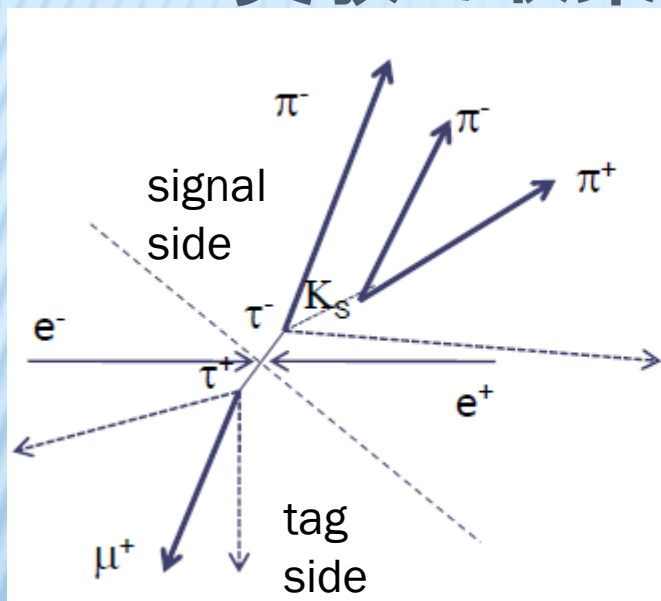
$$\simeq \langle \cos\beta \cos\psi \rangle_{\tau^-}^i - \langle \cos\beta \cos\psi \rangle_{\tau^+}^i$$

with  $d\omega = dQ^2 d\cos\theta d\cos\beta$ .

実験的に測るのはこっち

# 使ったデータと選別条件

✖ Belle実験で収集された  $700 \text{ fb}^{-1}$



荷電粒子 4 本 (3 - 1)  
 $K_s^0$ がある。(質量、飛距離)、 $\pi$  ID  
 tag sideはレプトニック崩壊

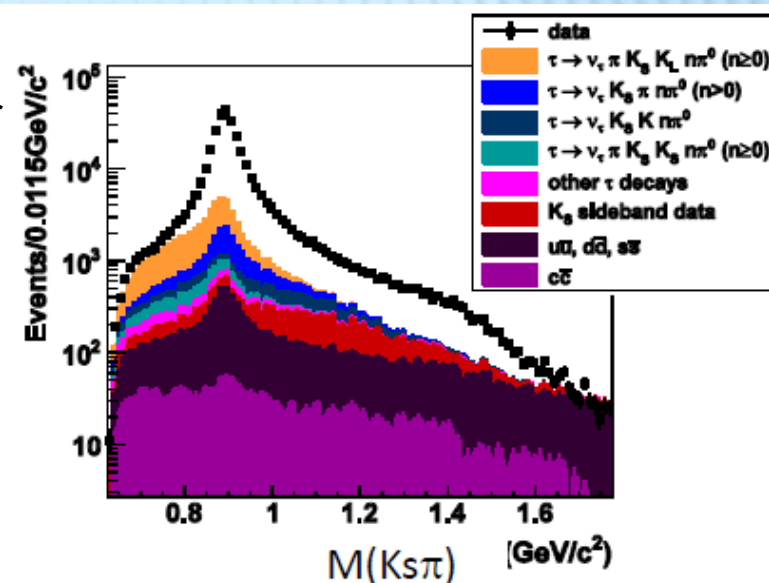
$K_s^0$ 候補の質量分布  
 $\rightarrow K_s^0$ じゃないBGはほとんどない

# CPV評価に使ったイベント

- $\tau^+ \rightarrow K_S \pi^+ \nu_\tau$  :  $(162,168 \pm 403)$  イベント
- $\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau$  :  $(161,982 \pm 403)$  イベント
- **Background:** total  $(22.1 \pm 3.6)\%$ 
  - ✓  $\tau^- \rightarrow K_S K_L \pi \nu_\tau$ :  $(9.5 \pm 3.2)\%$
  - ✓  $\tau^- \rightarrow K_S \pi \pi^0 \nu_\tau$ :  $(3.7 \pm 1.2)\%$
  - ✓  $e^+e^- \rightarrow qq$ :  $(3.4 \pm 1.0)\%$

## ■ CP rate-asymmetry (Observed level)

$$A_{CP} = \frac{N(\tau^+ \rightarrow K_S \pi^+ \nu_\tau) - N(\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau)}{N(\tau^+ \rightarrow K_S \pi^+ \nu_\tau) + N(\tau^- \rightarrow K_S \pi^- \nu_\tau)} = (0.07 \pm 0.25)\%$$

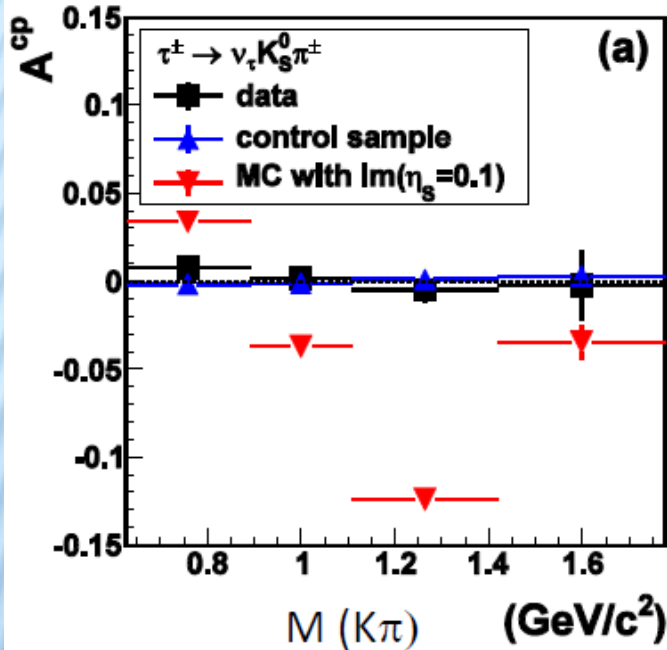


✕ ちゃんとした評価をするには補正が必要

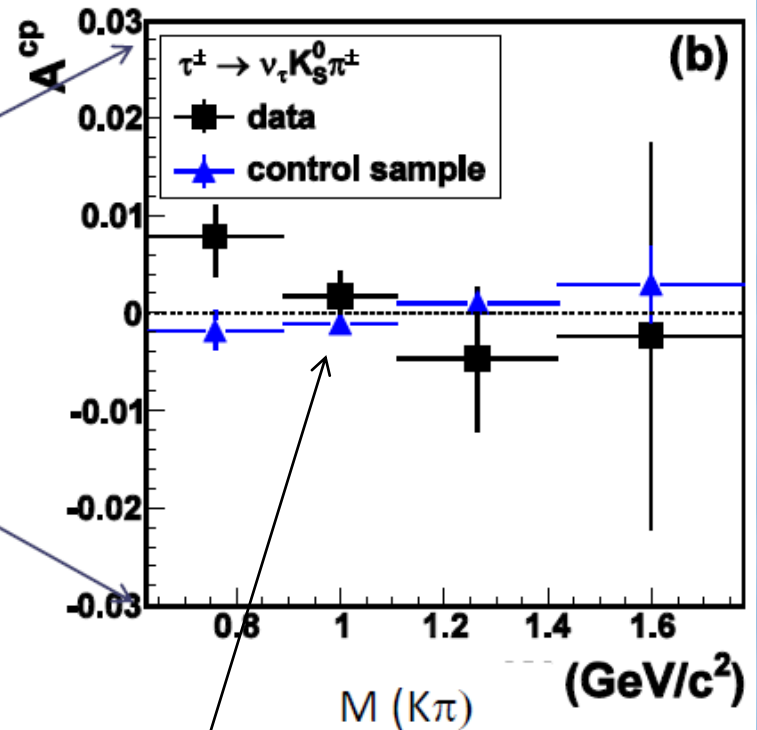
# 補正？

- × 検出器  $\rightarrow 0(10^{-3})$ 
  - +  $4\pi$  覆ってないことの補正
  - + 全ての方向で感度が均一ではないことの補正
- × F-B asymmetry ( $\gamma$ -Zの干渉)  $\rightarrow 0(10^{-4})$ 
  - + Lab系 (測定) と CM系 (評価) の違い
- ×  $\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$  が役立つ
  - +  $K_S^0$  はない ( $\Delta S=0$ ) が終状態は信号と同じ
  - $\Rightarrow \tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$  の  $A_{CP}$  を測定して補正

# 結果



## Expanded view



- 黒：実験データ
- 青：サイドバンドのデータ
- 赤：CPVを入れたMCイベント

$$A_{cp} = (1.8 \pm 2.1(stat) \pm 1.4(sys)) \times 10^{-3}$$

# $\eta$ に焼きなおす

- ✕  $|\text{Im}(\eta_s)| < (0.012-0.026)$  at 90 %C.L.
- + 範囲があるのは形状因子の強い相互作用由来の相対位相がわからないから。（角度を動かして評価）

## ■ Application: In the 3HDM

$$\eta_s \equiv \frac{m_\tau m_s}{M_{H^\pm}^2} X^* Z$$

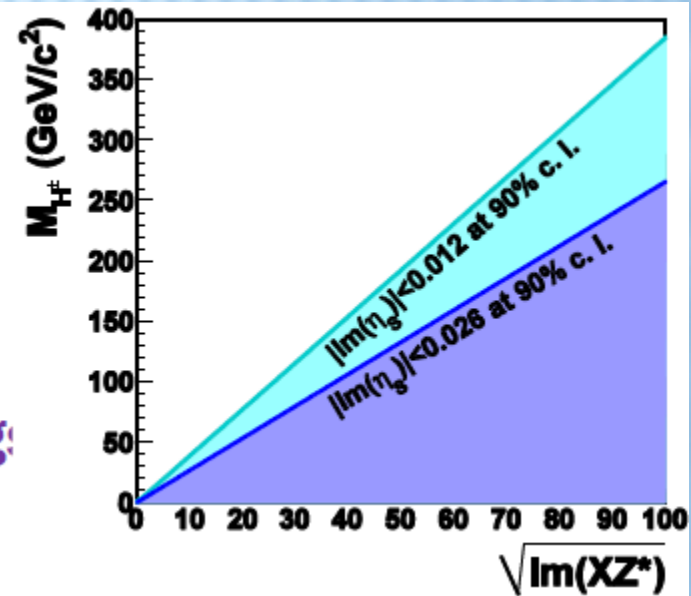
$M_{H^\pm}$  : mass of lightest charged Higgs in MHDM

$Z$  : complex coupling constant btw Higgs and lepton.

$X$  : complex coupling constant btw Higgs and down-type quark

## ■ The result $(\text{Im}(\eta_s) < 0.026)$ limits the coupling:

$$|\text{Im}(XZ^*)| \leq 0.15 \frac{M_H^2}{(1\text{GeV})^2}$$



# Belle IIでのタウCPV測定

- × 系統誤差の最も大きい寄与はControlled sample ( $\tau \rightarrow \pi\pi\pi\nu$ )なので、統計量の向上に従って小さくなると期待できる。
- × 現状 $O(10^{-3})$ で測られている精度は、 $O(10^{-4\sim-5})$ になると期待できる。

# チャームの物理

---

# チャームメソン

✖ チャームはアップタイプ2世代目のクォーク

チャーム量子数1

$$+ \pi^+(u\bar{d}) \rightarrow D^+(c\bar{d}), \pi^0(u\bar{u}) \rightarrow D^0(c\bar{u}): \text{spin } 0$$

$$+ K^+(u\bar{s}) \rightarrow D_s^+(c\bar{s})$$

$$+ \rho^+(u\bar{d}) \rightarrow D^{*+}(c\bar{d}), \rho^0(u\bar{u}) \rightarrow D^{*0}(c\bar{u}): \text{spin } 1$$

$$+ K^{*+}(u\bar{s}) \rightarrow D_s^{*+}(c\bar{s})$$

チャーム量子数0 ( $c\bar{c}$ )

$$\eta_c(I^G(J^{PC}) = 0^+(0^{-+})), \chi_{c0}(0^+(0^{++})), J/\psi(0^-(1^{--})),$$

$$\psi(2S)(0^-(1^{--}))$$

# 8. NAMING SCHEME FOR HADRONS

Revised 2004 by M. Roos (University of Finland) and C.G. Wohl (LBNL).

## 8.1. Introduction

We introduced in the 1986 edition [1] a new naming scheme for the hadrons. Changes from older terminology affected mainly the heavier mesons made of the light ( $u$ ,  $d$ , and  $s$ ) quarks. Old and new names were listed alongside until 1994. Names also change from edition to edition because some characteristic like mass or spin changes. The Summary Tables give both the new and old names whenever a change occurred.

## 8.2. “Neutral-flavor” mesons ( $S = C = B = T = 0$ )

Table 8.1 shows the names for mesons having the strangeness and all heavy-flavor quantum numbers equal to zero. The scheme is designed for all ordinary non-exotic mesons, but it will work for many exotic types too, if needed.

**Table 8.1:** Symbols for mesons with the strangeness and all heavy-flavor quantum numbers equal to zero.

$J^{PC} =$	$\begin{cases} 0^{-+} \\ 2^{-+} \\ \vdots \end{cases}$	$\begin{cases} 1^{+-} \\ 3^{+-} \\ \vdots \end{cases}$	$\begin{cases} 1^{--} \\ 2^{--} \\ \vdots \end{cases}$	$\begin{cases} 0^{++} \\ 1^{++} \\ \vdots \end{cases}$	
$q\bar{q}$ content	${}^{2S+1}L_J =$	${}^1(L \text{ even})_J$	${}^1(L \text{ odd})_J$	${}^3(L \text{ even})_J$	${}^3(L \text{ odd})_J$
$u\bar{d}, u\bar{u} - d\bar{d}, d\bar{u}$	$(I = 1)$	$\pi$	$b$	$\rho$	$a$
$d\bar{d} + u\bar{u}$ and/or $s\bar{s}$	$(I = 0)$	$\eta, \eta'$	$h, h'$	$\omega, \phi$	$f, f'$
$c\bar{c}$		$\eta_c$	$h_c$	$\psi^\dagger$	$\chi_c$
$b\bar{b}$		$\eta_b$	$h_b$	$\Upsilon$	$\chi_b$
$t\bar{t}$		$\eta_t$	$h_t$	$\theta$	$\chi_t$

# チャームメソンの質量

× PDGを見ると...

$D^\pm$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

$$\text{Mass } m = 1869.59 \pm 0.09 \text{ MeV}$$

$D_s^\pm$

$$I(J^P) = 0(0^-)$$

$$\text{Mass } m = 1968.28 \pm 0.10 \text{ MeV}$$

$D^0$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

$$\text{Mass } m = 1864.83 \pm 0.05 \text{ MeV}$$

$D_s^{*\pm}$

$$I(J^P) = 0(?^-)$$

$J^P$  is natural, width and decay modes consistent with  $1^-$

$D^*(2007)^0$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$I, J, P$  need confirmation.

$$\text{Mass } m = 2006.85 \pm 0.05 \text{ MeV} \quad (S = 1.1)$$

$$\text{Mass } m = 2112.1 \pm 0.4 \text{ MeV}$$

$J/\psi(1S)$

$$I^G(J^P)$$

$$\text{Mass } m = 3096.900 \pm 0.006 \text{ MeV}$$

$D^*(2010)^\pm$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$I, J, P$  need confirmation.

$$\text{Mass } m = 2010.26 \pm 0.05 \text{ MeV}$$

$\chi_{c0}(1P)$

$$I^G(J^P)$$

$$\text{Mass } m = 3414.75 \pm 0.31 \text{ MeV}$$

$\psi(2S)$

$$I^G(J^P)$$

$$\text{Mass } m = 3686.097 \pm 0.025 \text{ MeV}$$

Cクォークは  $1.X \text{ GeV}/c^2$  くらいだなと想像がつく

# チャームメソンの質量

× PDGを見ると...

$D^\pm$   $C$

$$m_c = 1.28 \pm 0.03 \text{ GeV}$$

$$m_c/m_s = 11.72 \pm 0.25$$

$$m_b/m_c = 4.53 \pm 0.05$$

$$m_b - m_c = 3.45 \pm 0.05 \text{ GeV}$$

$$I(J^P) = 0(\frac{1}{2}^+)$$

$$\text{Charge} = \frac{2}{3} e \quad \text{Charm} = +1$$

$0(0^-)$

$D^0$

タウに非常に近い  
 $\tau$ -pair  $\sim 3.5 \text{ GeV}/c^2$

with 1-

$D^*(2007)^0$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$I, J, P$  need confirmation.

$$\text{Mass } m = 2006.85 \pm 0.05 \text{ MeV} \quad (S = 1.1)$$

$J/\psi(1S)$

$I^G(J^P)$

$$\text{Mass } m = 3096.900 \pm 0.006 \text{ MeV}$$

$D^*(2010)^\pm$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$I, J, P$  need confirmation.

$$\text{Mass } m = 2010.26 \pm 0.05 \text{ MeV}$$

$\chi_{c0}(1P)$

$I^G(J^P)$

$$\text{Mass } m = 3414.75 \pm 0.31 \text{ MeV}$$

$\psi(2S)$

$I^G(J^P)$

$$\text{Mass } m = 3686.097 \pm 0.025 \text{ MeV}$$

Cクォークは $1.X \text{ GeV}/c^2$ くらいだなと想像がつく

# 歴史の復習

1930~1960  $n, p, \mu, \pi, K, \Lambda, \Sigma, \dots$

- × 1974  $J/\psi$
  - × 1975  $\tau$
  - × 1977  $\Upsilon$
  - × 1983  $W/Z$
  - × 1995 top
  - × 2012 Higgs
- } 1年違い!

# 歴史の復習

---

1930~1960  $n, p, \mu, \pi, K, \Lambda, \Sigma, \dots$

× 1974  $J/\psi$

11月革命：J/ψの発見はなぜ単なる“発見”にとどまらず、“革命”だったのか？

× 1975  $\tau$

× 1977  $\Upsilon$

× 1983  $W/Z$

× 1995 top

× 2012 Higgs

# 歴史の復習

1930~1960  $n, p, \mu, \pi, K, \Lambda, \Sigma, \dots$

× 1974  $J/\psi$

11月革命：  $J/\psi$ の発見はなぜ単なる“発見”にとどまらず、“革命”だったのか？

× 1975  $\tau$

× 1977  $\Upsilon$

× 1983  $W/Z$

× 1995 top

× 2012 Higgs

7月革命： 11月革命に倣ってそう呼ばれている。

# 歴史の復習

1930~1960  $n, p, \mu, \pi, K, \Lambda, \Sigma, \dots$

× 1974  $J/\psi$

11月革命：  $J/\psi$ の発見はなぜ単なる“発見”にとどまらず、“革命”だったのか？

× 1975  $\tau$

× 1977  $Y$

× 1983  $W/Z$

× 1995 top

ちなみに、他のクォークの発見は結合状態 ( $J/\psi, Y$ ) で書かれているのにtopはtopと書かれているのでしょうか？

× 2012 Higgs

7月革命： 11月革命に倣ってそう呼ばれている。

# D<sup>0</sup>の質量と混合とCPV

✖ さて、PDGよく見てみるとD<sup>0</sup>の項に

**D<sup>0</sup>**

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

Mass  $m = 1864.83 \pm 0.05$  MeV

$m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4.75 \pm 0.08$  MeV

Mean life  $\tau = (410.1 \pm 1.5) \times 10^{-15}$  s

$c\tau = 122.9$   $\mu\text{m}$

## Mixing and related parameters

$$|m_{D_1^0} - m_{D_2^0}| = (0.95^{+0.41}_{-0.44}) \times 10^{10} \hbar \text{ s}^{-1}$$

$$(\Gamma_{D_1^0} - \Gamma_{D_2^0})/\Gamma = 2y = (1.29^{+0.14}_{-0.18}) \times 10^{-2}$$

$$|q/p| = 0.92^{+0.12}_{-0.09}$$

$$A_\Gamma = (-0.125 \pm 0.526) \times 10^{-3}$$

# $D^0$ の質量と混合とCPV

✖ さて、PDGよく見てみると $D^0$ の項に

$D^0$

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

Mass  $m = 1864.83 \pm 0.05$  MeV

$m_{D^\pm} - m_{D^0} = 4.75 \pm 0.08$  MeV

Mean life  $\tau = (410.1 \pm 1.5) \times 10^{-15}$  s

$c\tau = 122.9$   $\mu\text{m}$

$D_1^0, D_2^0$ とは  
何なのか？

## Mixing and related parameters

$$|m_{D_1^0} - m_{D_2^0}| = (0.95^{+0.41}_{-0.44}) \times 10^{10} \hbar \text{ s}^{-1}$$

$$(\Gamma_{D_1^0} - \Gamma_{D_2^0})/\Gamma = 2y = (1.29^{+0.14}_{-0.18}) \times 10^{-2}$$

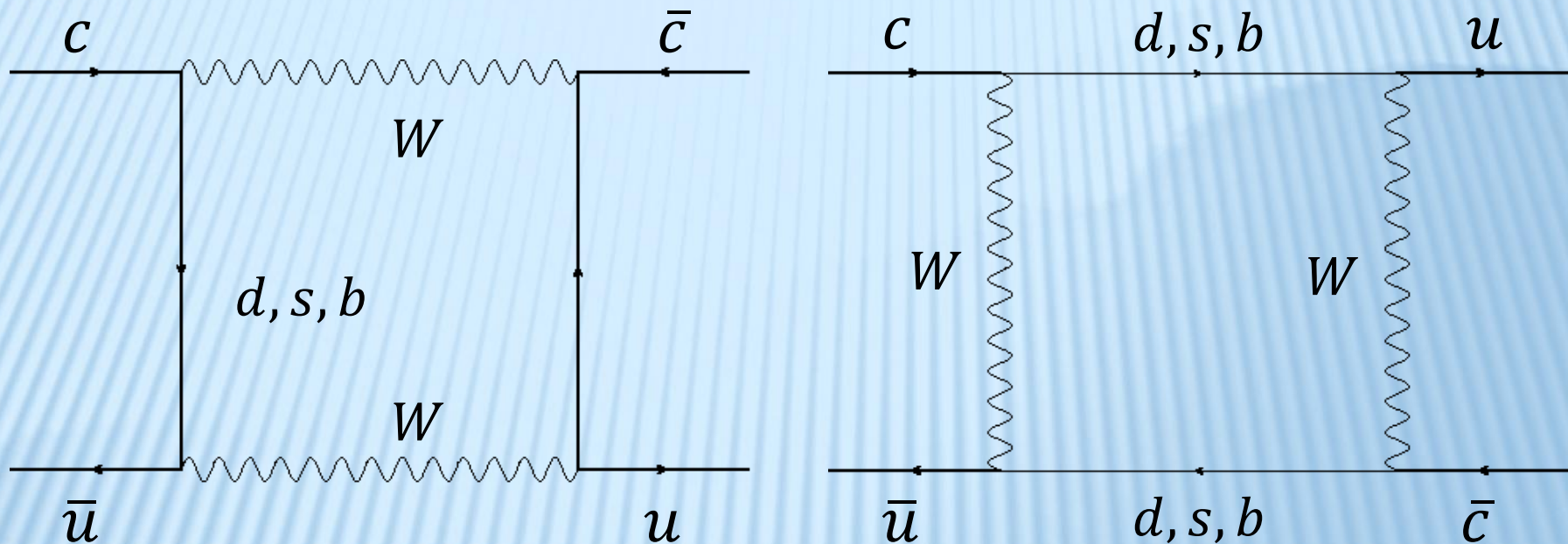
$$|q/p| = 0.92^{+0.12}_{-0.09}$$

$$A_\Gamma = (-0.125 \pm 0.526) \times 10^{-3}$$

# 中性の粒子－反粒子は振動する（といいなあ）

× 中には $n - \bar{n}$ 振動を考えている人も居る

# $D^0 - \bar{D}^0$ 振動



いわゆるBox diagramを介して $D^0 - \bar{D}^0$ は行ったり来たりする

# 中性の粒子－反粒子は振動する

- × 中性中間子の振動論 ( $M^0$ が $\overline{M^0}$ になる確率)

$$P(M^0 \rightarrow \overline{M^0}, t) = \frac{1}{2} \left| \frac{q}{p} \right|^2 e^{-\Gamma t} (\cosh(y\Gamma t) - \cos(x\Gamma t))$$

質量固有状態      フレーバ固有状態 (クォークと1対1対応)

$$|M_{1,2}\rangle = p|M^0\rangle + q|\overline{M^0}\rangle, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$
$$y = \frac{|\Gamma_2 - \Gamma_1|}{2\Gamma}, \quad x = \frac{|M_2 - M_1|}{\Gamma}, \quad \Gamma = \frac{\Gamma_2 + \Gamma_1}{2}$$

# 中性の粒子－反粒子は振動する

## × 中性中間子の振動論 ( $M^0$ が $\overline{M^0}$ になる確率)

$$P(M^0 \rightarrow \overline{M^0}, t) = \frac{1}{2} \left| \frac{q}{p} \right|^2 e^{-\Gamma t} (\cosh(y\Gamma t) - \cos(x\Gamma t))$$

寿命の差  
大きいと極端 $K_S, K_L$

質量固有状態      フレーバ固有状態 (クォークと1対1対応)

$$|M_{1,2}\rangle = p|M^0\rangle + q|\overline{M^0}\rangle, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$

$$y = \frac{|\Gamma_2 - \Gamma_1|}{2\Gamma}, \quad x = \frac{|M_2 - M_1|}{\Gamma}, \quad \Gamma = \frac{\Gamma_2 + \Gamma_1}{2}$$

# 中性の粒子－反粒子は振動する

## × 中性中間子の振動論 ( $M^0$ が $\overline{M^0}$ になる確率)

$$P(M^0 \rightarrow \overline{M^0}, t)$$

$$= \frac{1}{2} \left| \frac{q}{p} \right|^2 e^{-\Gamma t} (\cosh(y\Gamma t) - \cos(x\Gamma t))$$

周期：大きいと素早く  
混じる。小さいと  
ゆっくり

質量固有状態

フレーバ固有状態 (クォークと1対1対応)

$$|M_{1,2}\rangle = p|M^0\rangle + q|\overline{M^0}\rangle, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$

$$y = \frac{|\Gamma_2 - \Gamma_1|}{2\Gamma}, \quad x = \frac{|M_2 - M_1|}{\Gamma}, \quad \Gamma = \frac{\Gamma_2 + \Gamma_1}{2}$$

# 中性の粒子－反粒子は振動する

- × 中性中間子の振動論 ( $M^0$ が $\overline{M^0}$ になる確率)

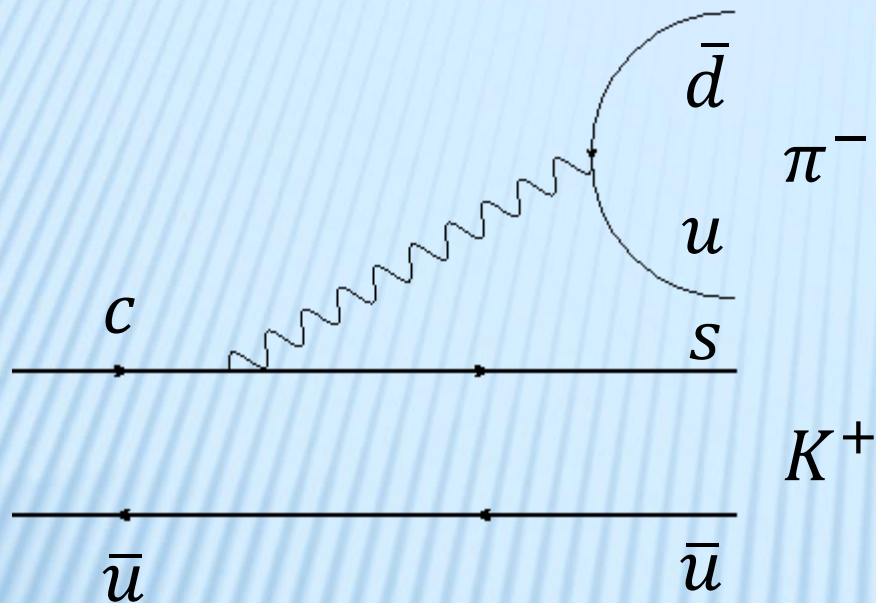
$$P(M^0 \rightarrow \overline{M^0}, t) \\ = \frac{1}{2} \left| \frac{q}{p} \right|^2 e^{-\Gamma t} (\cosh(y\Gamma t) - \cos(x\Gamma t))$$

質量固有状態      フレーバ固有状態 (クォークと1対1対応)

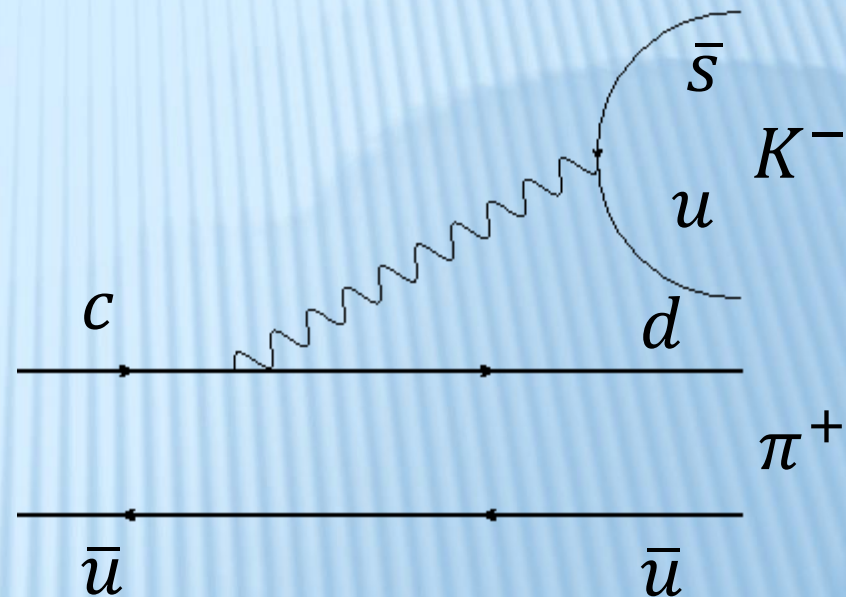
$$|M_{1,2}\rangle = p|M^0\rangle + q|\overline{M^0}\rangle, \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$

理論的な計算によると  $x, y \sim 10^{-3 \sim -2}$  程度

# ややこしい $D^0$ の崩壊



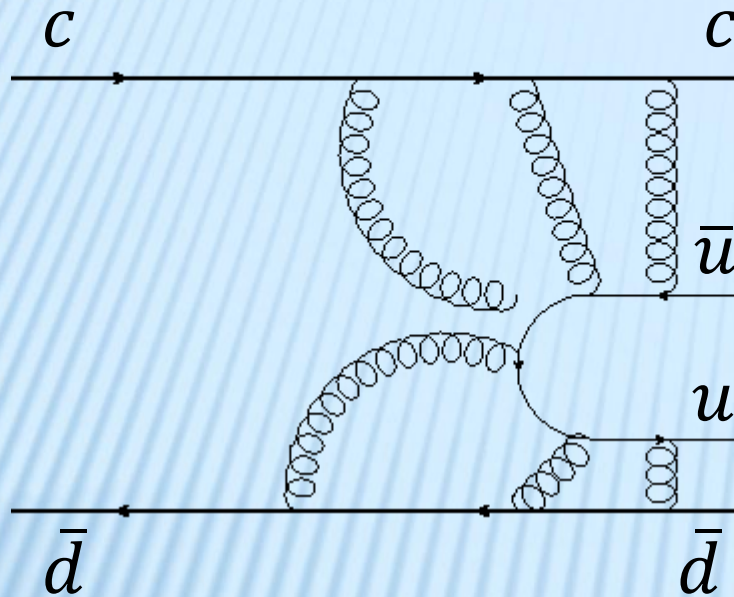
Cabibbo favored (CF)



Doubly Cabibbo suppressed (DCS)

$D^0 \rightarrow \pi^- K^+$  も  $D^0 \rightarrow \pi^+ K^-$  もあり得る崩壊  
 $D^0$  と  $\bar{D}^0$  の区別をどうつける？

# $D^{*+}$ からくる $D^0$



$D^0$   $D^0$ か $\bar{D}^0$ っぽいものと  
 $\pi^+$ を組んで $D^{*+}$ っぽく  
 なれば、それは $D^0$   
 $\pi^-$ なら $\bar{D}^0$   
 $\pi^+$

$D^*$ を使った $D^0, \bar{D}^0$ の判別が一般的  
 (フレーバータグ)

# ちなみに

**$D^*(2010)^\pm$**

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(1^-)$$

$I, J, P$  need confirmation.

Mass  $m = 2010.26 \pm 0.05$  MeV

$$m_{D^*(2010)^+} - m_{D^+} = 140.67 \pm 0.08 \text{ MeV}$$

$$m_{D^*(2010)^+} - m_{D^0} = 145.4257 \pm 0.0017 \text{ MeV}$$

Full width  $\Gamma = 83.4 \pm 1.8$  keV

$D^*(2010)^-$  modes are charge conjugates of the modes below.

**$D^*(2010)^\pm$  DECAY MODES**

Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )

$p$  (MeV/c)

$D^0 \pi^+$

$(67.7 \pm 0.5) \%$

39

$D^+ \pi^0$

$(30.7 \pm 0.5) \%$

38

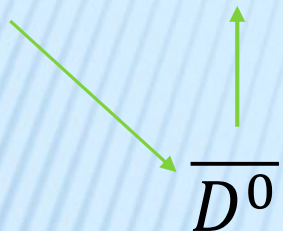
$m_\pi \sim 140$  MeVなので  
かなりへろへろ

実際こんなもん

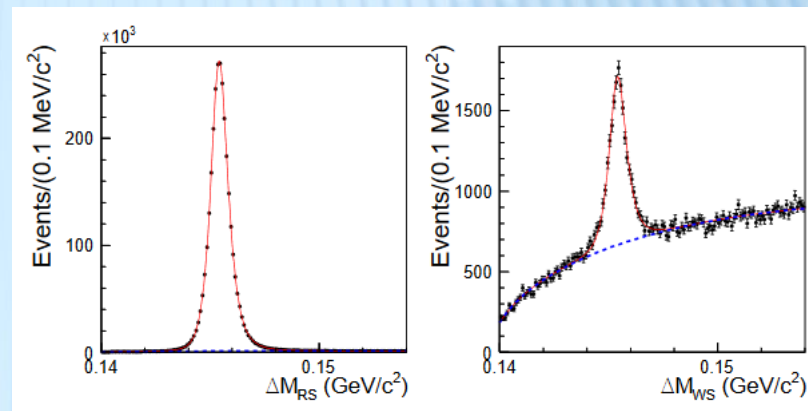
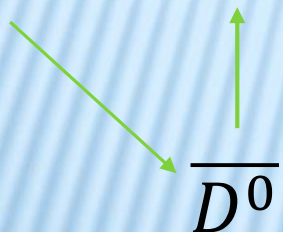
よく、このへろへろの $\pi$ 中間子を $\pi_s$ と表す

# $D \rightarrow K\pi$ を使った混合の測定

✖  $D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$  (Right Sign)



✖  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  (Wrong Sign)



$$\Delta M = M_{D^*} - M_{D^0}$$

$WS$ と $RS$ の崩壊時間依存性の比は

$$R_D + \sqrt{R_D} y' \Gamma t + \frac{x'^2 + y'^2}{4} (\Gamma t)^2$$

$R_D$ はDCSとCFの崩壊振幅の比

$$x' = x \cos \delta + y \sin \delta$$

$$y' = y \cos \delta - x \sin \delta$$

$\delta$ はDCSとCF崩壊振幅の位相差

Belleの $976\text{fb}^{-1}$ のデータを使った解析の結果

$$x'^2 = (0.09 \pm 0.02) \times 10^{-3}, y' = (4.6 \pm 3.4) \times 10^{-3}$$

# CKM行列とCPの破れ

$$\times V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$\times$  位相=CPの破れ

$\times$   $s_{12} = \lambda, s_{23} = \lambda^2 A, s_{13} = \lambda^3 A(\rho - i\eta)$ とおくとWolfenstein表示 Charmに関するCPの破れは非常に小さいことがわかる。

# CKM行列とCPの破れ

$$\begin{aligned} \times V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & \lambda^2 A \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} + o(\lambda^4) \end{aligned}$$

× 位相=CPの破れ

×  $s_{12} = \lambda, s_{23} = \lambda^2 A, s_{13} = \lambda^3 A(\rho - i\eta)$ とおくとWolfenstein表示 Charmに関するCPの破れは非常に小さいことがわかる。

# CKM行列とCPの破れ

$$\begin{aligned} \times V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & \lambda^2 A \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -\lambda^2 A & 1 \end{pmatrix} + o(\lambda^4) \end{aligned}$$

× 位相=CPの破れ

$\lambda^5$ まで計算するとここに虚数項が現れる

× D中間子に関する混合、CPの破れは非常に小さい  
→現在までの測定も支持

# Belle IIでの混合の測定

- ✖  $D^0 \rightarrow K\pi$ の測定では $x'^2$ の測定になってしまい、精度がよくない
- ✖  $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi\pi$ は3体なのでダリツ解析ができて、 $x$ を評価できる

dataset	stat.	syst.		Total	stat.	syst.		Total
		red.	irred.			red.	irred.	
		$\sigma_x(10^{-2})$				$\sigma_y(10^{-2})$		
976 fb <sup>-1</sup>	0.19	0.06	0.11	0.20	0.15	0.06	0.04	0.16
5 ab <sup>-1</sup>	0.08	0.03	0.11	0.14	0.06	0.03	0.04	0.08
50 ab <sup>-1</sup>	0.03	0.01	0.11	0.11	0.02	0.01	0.04	0.05
		$-\arg(q/p)(10^{-2})$				$\arg(q/p)(^\circ)$		
976 fb <sup>-1</sup>	15.5	5.2-5.6	7.0-6.7	17.8	10.7	4.4-4.5	3.8-3.7	12.2
5 ab <sup>-1</sup>	6.9	2.3-2.5	7.0-6.7	9.9-10.1	4.7	1.9-2.0	3.8-3.7	6.3-6.4
50 ab <sup>-1</sup>	2.2	0.7-0.8	7.0-6.7	7.0-7.4	1.5	0.6	3.8-3.7	4.0-4.2

# ハドロンの物理

---

# ハドロンの物理？

- × 新物理ではない→でも面白くないわけじゃない
- × QCDの本質的な理解に必要
  - + クォーク模型の強力な成功の一方クォークを本質的な自由度とみてもQCDは理解できない
  - + 強結合の場の理論の理解 → 人類が理解できているのは摂動論の効く場の理論だけ
  - + 強結合の現象が身近で見られるのはハドロン現象だけ。（後はブラックホール周辺くらい）

# 反クォークとダイクォーク

- ✖ 通常バリオン( $qqq$ )とメソン( $q\bar{q}$ )がクォークの存在形態
- ✖  $qq = \bar{q}$ と考えるとバリオンとメソンの在り方は共通
- ✖ 群論の表現的には

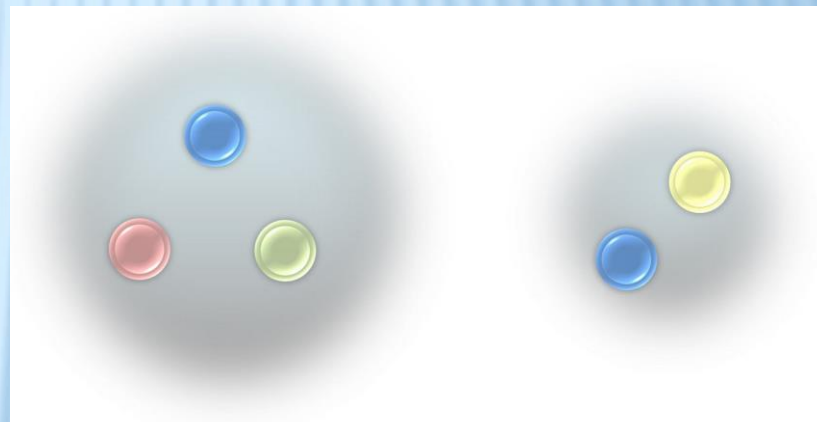
$$3^* = 3 \times 3$$

これはSU(3)ならではの

3次元ではベクトルと

ベクトルの外積がまたベクトルになるのに似てる？

クォーク2つで一塊とみる見方をダイクォークと呼ぶ



# エキゾチックハドロン

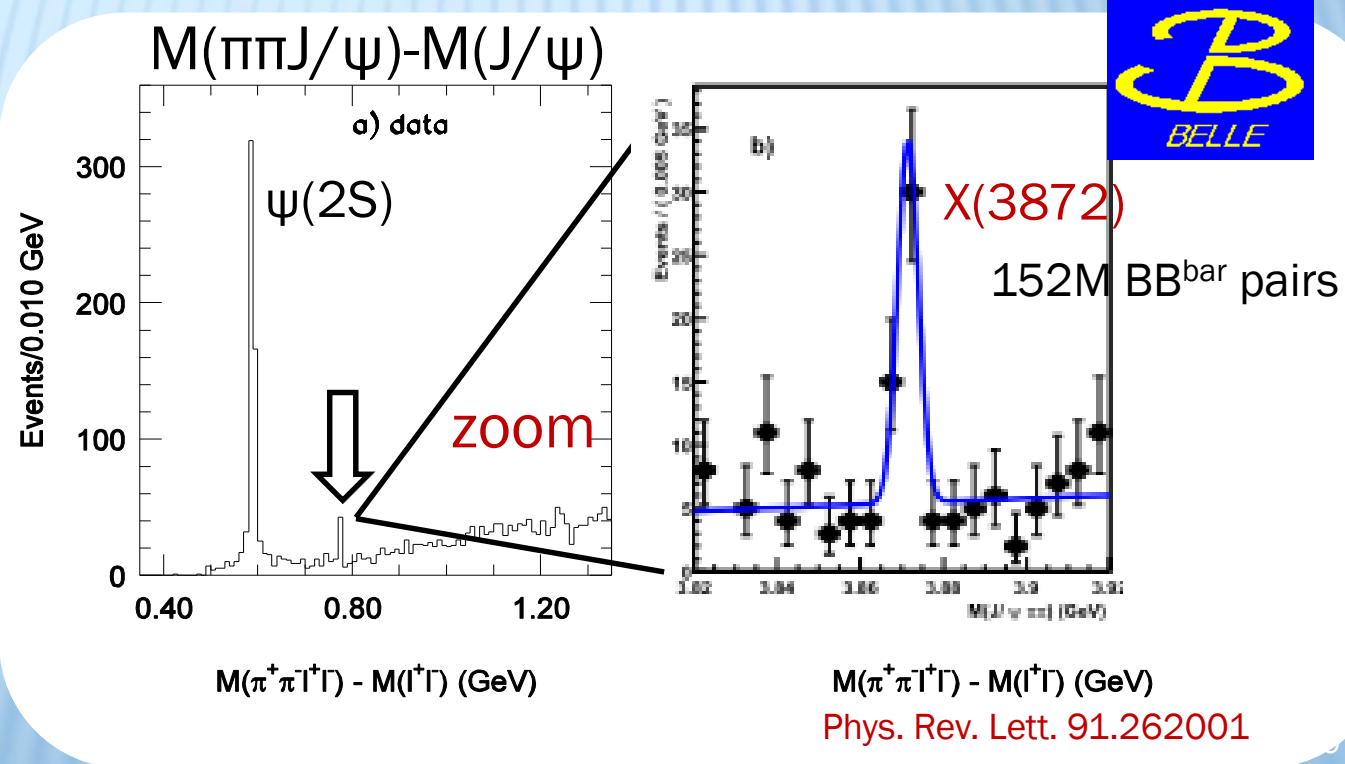
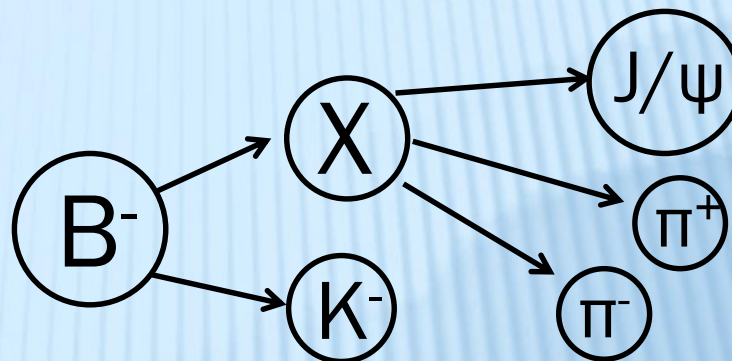
- × 昨日の講義でもあったが、既存のメソン、バリオン中の反クォークの役割をダイクォークに置き換えると...
- ×  $(q\bar{q}) \rightarrow (qqq) \rightarrow (qqq\bar{q}) \rightarrow (q\bar{q}\bar{q}\bar{q}) \rightarrow (\bar{q}\bar{q}\bar{q}\bar{q}\bar{q})$   
メソン                  バリオン                  テトラクォーク                  ペンタクォーク                  ダイバリオン  
中間子

昔からあってもいいよね、という話はあったが、ここ数年でBファクトリー/LHCbで続々と見つかり始めたB中間子ペアを作るのがギリギリのBファクトリーではチャームを含むエキゾチックハドロンがメイン

# 最近見つかったチャームを持つ中間子

	Charmonium (like)	D(s)	Charmed baryon	Bottomonium (like)
B-decay	$\eta_c(2S)$ $X(3872)$ $Z_c(4050)$ $Z_c(4250)$ $Z_c(4430)$ $Z_c(4200)$	$D_1(2430)$ $D_s(2700)$		<b>Belle</b> <b>BaBar</b>
ISR	$Y(4260)$ $Z(3900)$ $Y(4008)$ $Y(4660)$			
Double charmonium	$X(3940)$ $X(4160)$			
Two photon	$\chi_{c2}(2P)$			
Continuum		$Ds_0(2317)$	$\Sigma_c(2800)$ $\Lambda_c(2940)^+$ $\Xi_c(2980)$ $\Xi_c(3080)$ $\Omega_c(2770)$ $\Xi_c(3055)$	
Y(5S) decay				$Z_b(10610)$ $Z_b(10650)$ $h_b(1P)$ $h_b(2P)$ $\eta_b(2S)$

# X(3872):最初の報告



# X(3872)の特徴

✖ 一見ただの $c\bar{c}$ 束縛状態にも思えるのだが...

+ クォーク模型の予言からはずれる

+  $D\bar{D}$ より重いのに $D\bar{D}$ に崩壊しない

+ Isospinを破る

✖  $X(3872) \rightarrow J/\psi\rho(\rightarrow \pi\pi) : c\bar{c}$  は Isospin = 0,  
 $\rho$  は Isospin = 1

● 質量は $D^0\bar{D}^{*0}$ に近い

$$3871.69 \pm 0.17 \text{ MeV}/c^2 \Leftrightarrow 3871.8 \pm 0.12 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_{X(3872)} \quad M_{D\bar{D}^*}$$

# X(3872)の特徴

$c\bar{c}$ 束縛状態では  
なさそう

× 一見ただの $c\bar{c}$ 束縛状態にも思えるのだが...

+ クォーク模型の予言からはずれる

+  $D\bar{D}$ より重いのに $D\bar{D}$ に崩壊しない

+ Isospinを破る

×  $X(3872) \rightarrow J/\psi\rho(\rightarrow \pi\pi) : c\bar{c}$  は Isospin = 0,  
 $\rho$  は Isospin = 1

● 質量は $D^0\bar{D}^{*0}$ に近い

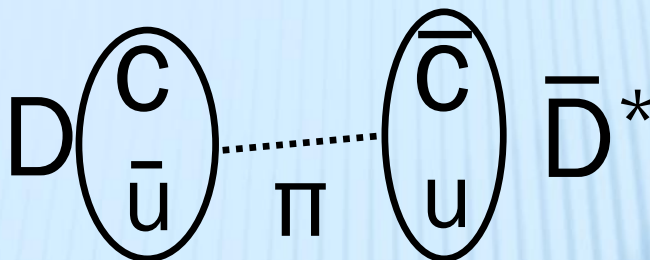
$$3871.69 \pm 0.17 \text{ MeV}/c^2 \Leftrightarrow 3871.8 \pm 0.12 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_{X(3872)} \quad M_{D\bar{D}^*}$$

# 分子的状態

$D^* : J^P = 1^-$

$D : J^P = 0^-$

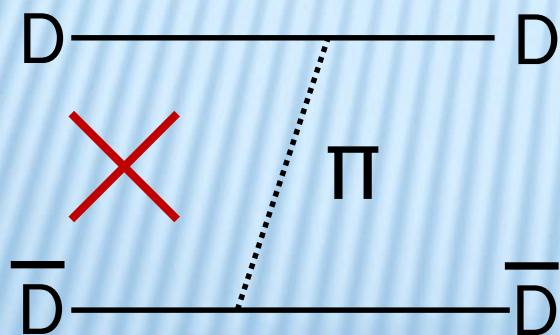


X(3872)の中は  
こんなかんじ?

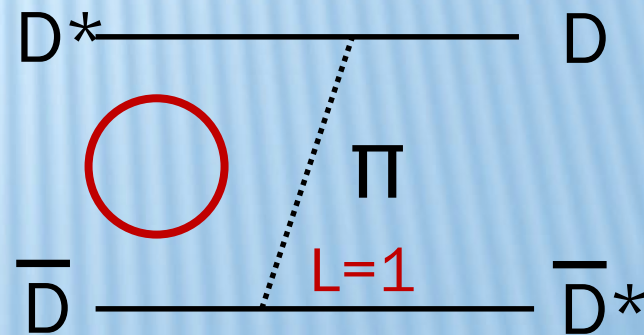
・幅が狭い

→S波の $DD^*$ は  $J^P = 1^+$ , 一方  $DD$ は  $J^P = 0^+$ で、崩壊は禁止される

DDだと $\pi$ 交換=引力の源ができない。



$\pi$ は $J^P = 0^-$ なのでParityが保存しない



これ以上の状況証拠は?

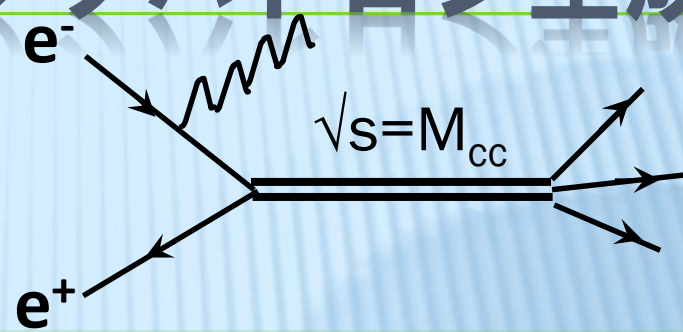
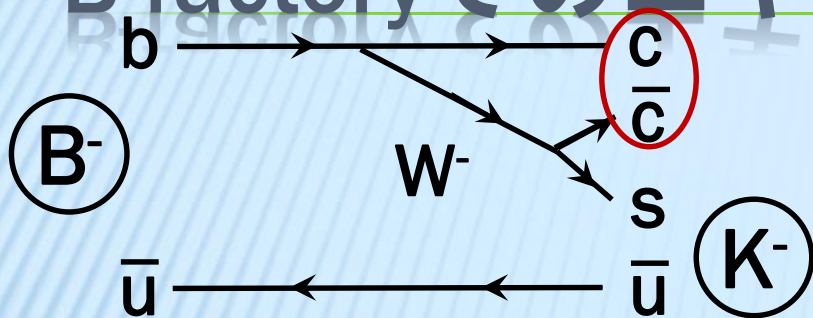
# X(3872)の性質

- × スピン・パリティ： $J^{PC} = 1^{++}$ 
  - + LHCbで測定 $2^{-+}$ とのどちらが好まれるかの最尤法
  - + S波の分子状態を支持
- × 崩壊過程： $Br(X \rightarrow D^* \overline{D}^0) \sim 10 Br(X \rightarrow J/\psi \pi \pi)$ 
  - + Belleで測定分子状態を裏付ける
- × 生成過程： $(3.7 \pm 0.7) \text{ nb}$ 
  - + CDFで測定：プロンプトの生成
  - + 理論予想 ( $\sim 0.1 \text{ nb}$ ) よりはるかに高い
- × 崩壊過程： $Br(X \rightarrow \psi' \gamma) \sim R \times Br(X \rightarrow J/\psi \pi \pi)$ 
  - + 分子状態だと $R \sim 0$ ,  $c\bar{c}$ だと $R > 1$ .
  - +  $R = 2.46 \pm 0.64 \pm 0.29$

# Belle IIでのハドロン物理

- × ハドロン物理のための解析は基本的にピーク探し。
  - +  $Br(X \rightarrow \psi' \gamma) \sim R \times Br(X \rightarrow J/\psi \pi \pi)$ 
    - ×  $(\psi' \gamma)$ を組んでみてX(3872)になるか見る。
    - × 例でみたようにXの性質を知るためにいろいろな崩壊過程を仮定してXが現れるか、どれくらいなのか、を見る
- × ダブルチャームバリオン、ダブルチャームエキゾチックハドロン、ペンタクォーク、ダイバリオン、まだまだ見つかってない・よくわからない粒子がたくさんある。見つかっていても多様な崩壊様式同士の関係を明らかにして粒子の性質を調べるべきものも多数存在している。

# B-factoryでのエキゾチックハドロン生成

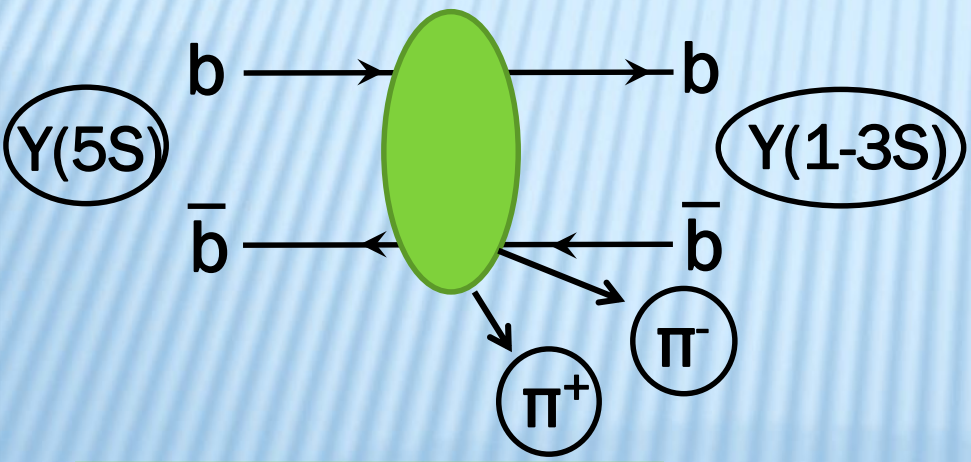


**B中間子の崩壊**

- ・ きれいな”チャーモニウム工場”
- ・ X(3872), Z(4430)....

**Initial state radiation**

- ・ 光子と同じ量子数のチャーモニウム
- ・ Y(4260), Y(4260) → Z(3900)π<sup>+</sup>



他にも

- ・ Two-photon
- ・ Continuum

過程などでも生成される。

**Y(5S)の崩壊**

- ・ Z<sub>b</sub>(10610) Z<sub>b</sub>(10650)