



ベル実験の最新の成果： チャームとタウ・二光子衝突の物理

**Recent Results from Belle on
Charm, Tau and Two-photon Physics**

**The Belle Collaboration
Sadaharu UEHARA (KEK)**

日本物理学会年会、東京理科大、野田市 2005.03.24



JPS Meeting, Mar. 24, 2005, S.Uehara, for Belle

KEKB/Belle 実験

KEKB 加速器

e^+e^- 衝突 -- $\sqrt{s} \approx 10.6 \text{ GeV}$

世界最高のルミノシティ $1.53 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

積分ルミノシティ 388 fb^{-1} (2005.03.23)

Belle 検出器

優れたエネルギー／運動量 分解能
と 粒子識別性能

生成事象の断面積

$e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B\bar{B}$ --- 1.1 nb (ほとんどの b は c に崩壊)

$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \text{ (uds)}$ --- 2.1 nb

$e^+e^- \rightarrow c\bar{c}$ --- 1.2 nb

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ --- 0.9 nb

$\gamma\gamma \rightarrow \text{hadrons (} W_\gamma > 0.8 \text{ GeV)}$ --- $\sim 1 \text{ nb}$ (within the acceptance)



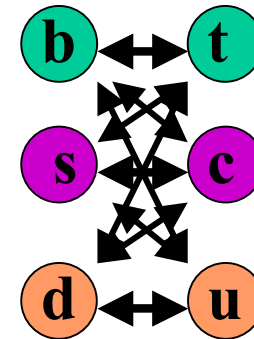
B の物理 と Tau の物理

“Belle実験のメインテーマ”

B中間子の CP violation の測定

希な崩壊の測定

→ New Physics の探索



これは、レプトン側でも同じこと.....

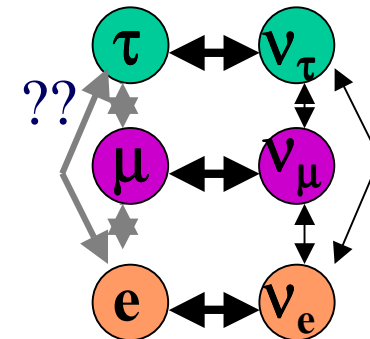
Tau -- the third-generation lepton

CP/T violationの探索

希な崩壊の測定

Lepton-flavor violationの探索

(or neutrino-less decays)



Charm Physics/Hadron Physics

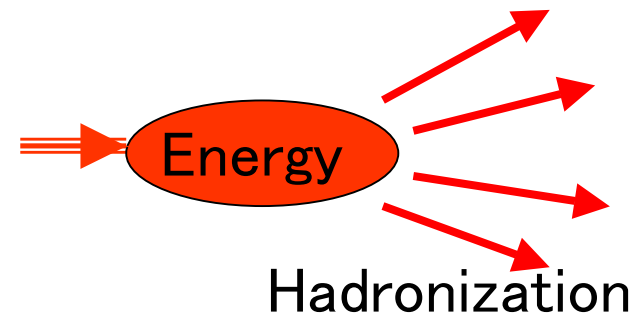
Energy available for hadron production

in B decays ($\sim 5\text{GeV}$)

in e^+e^- annihilation ($\sim 10\text{GeV}$)

in τ decays ($\sim 1.7\text{GeV}$)

in two-photon collisions ($\sim 4.5\text{GeV}$)



QCD の検証

非摂動的 QCD

meson と baryon の構造のモデル

New resonances

Hadron properties



Tau Physics

New Physicsの探索

CP/T violation, EDM of τ

Lepton-flavor violations

motivated by SUSY, GUT, etc.

$\tau \rightarrow e\gamma, \mu\gamma$

$\tau \rightarrow 3$ charged leptons

$\tau \rightarrow e/\mu + \pi^0/\eta/\eta'$

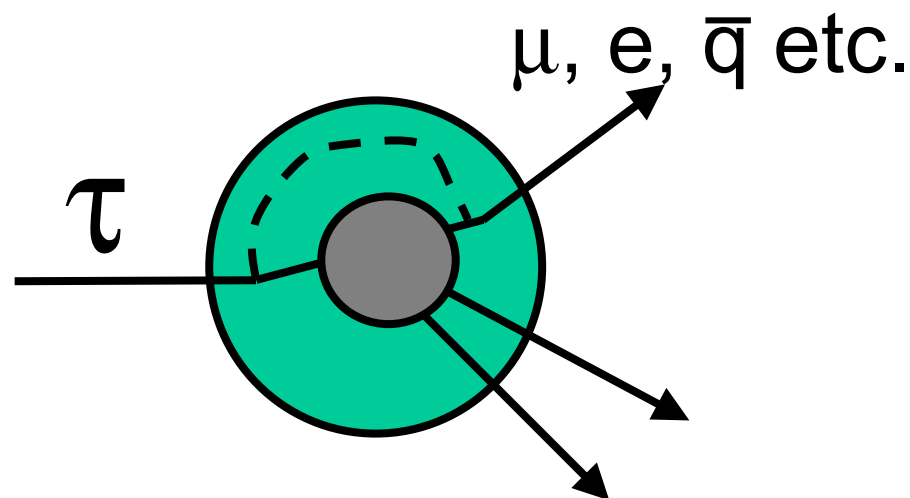
$\tau \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^-, \Lambda\pi^-$

.....

ハドロン崩壊モード

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

.....



Neutrinoless decay



$\tau \rightarrow e\gamma, \mu\gamma$ の探索

Belle hep-ex/0501068

(to appear in PLB)

Belle PRL92(2004)171802

Belle and Babar以前の
実験による上限値

: $\text{BR} < 10^{-5} \sim 10^{-6}$

いくつかの理論予想

SUSY, LR-symmetry – $10^{-7} \sim 10^{-9}$

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ における選別条件

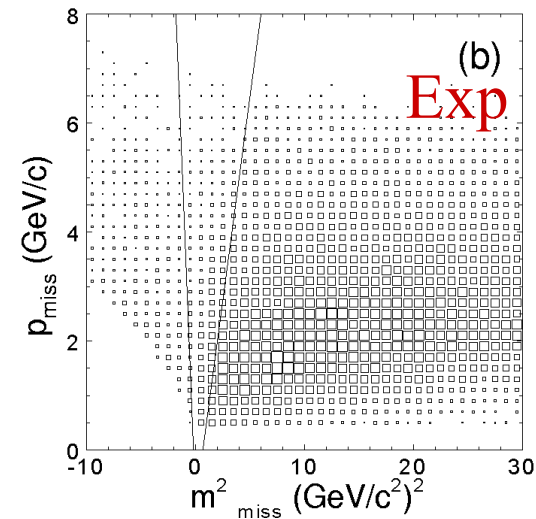
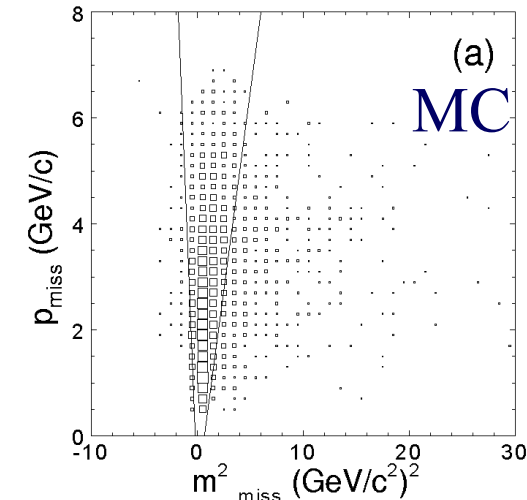
Topology: Signal side: $e(\mu) + \gamma$

The other side: not e (not μ) + neutral(s)

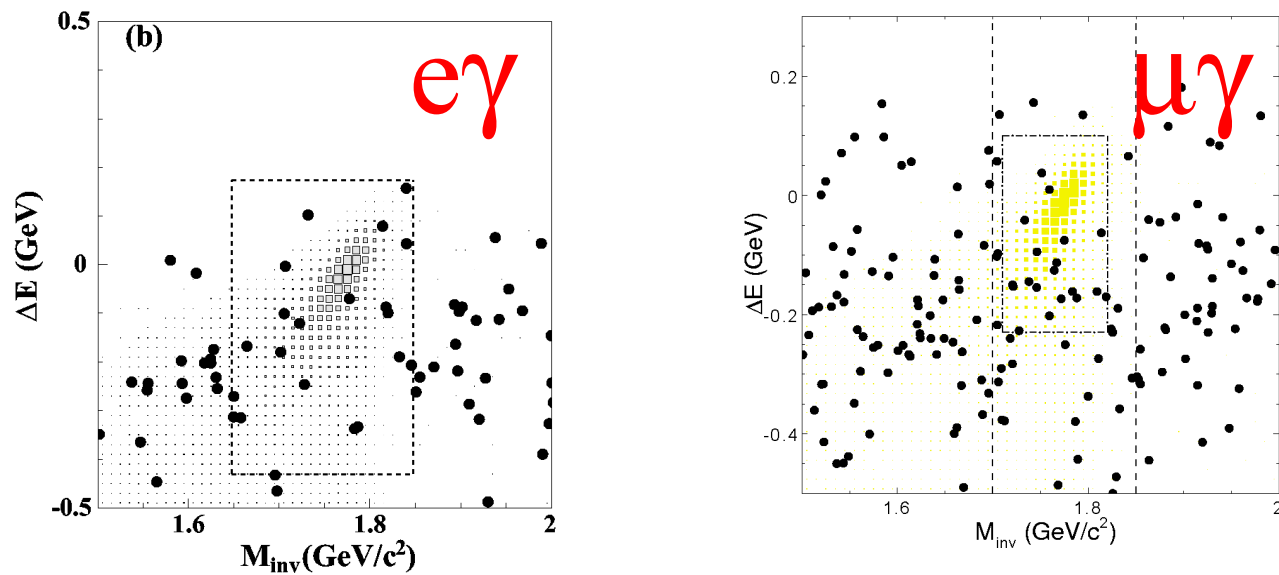
QED backgrounds を排除

Missing p_t to large angles
(two-photon events を排除)

Missing mass cut



m_τ - ΔE plane cut



Background-level の見積もり

$l\gamma$ backgrounds が支配的 ($l = e, \mu, \tau$)

検出されたイベント数(バックグラウンドとして説明可能)

	expected as background	observed
$e\gamma$ (86.7 fb ⁻¹)	25.7±0.3	20
$\mu\gamma$ (86.3 fb ⁻¹)	20.2±2.1	19



Systematic error と 結果

Photon reconstruction efficiency	3.0% (2.8%)
Selection criteria	2.5% (2.2%)
Trigger efficiency	2.0% (1.6%)
Track reconstruction efficiency	2.0%
Integrated luminosity	1.4%
MC statistics	0.3%
Possible spin-dependent interaction effects	negligible for $V\pm A$

Total 5.0% (4.8%) for $e\gamma$ ($\mu\gamma$)

Results

	Present (Belle)	BaBar
$e\gamma$	$< 3.1 \times 10^{-7}$	
$\mu\gamma$	$< 3.9 \times 10^{-7}$ (90%CL)	$< 6.8 \times 10^{-8}$ (232 fb $^{-1}$)



$\tau^- \rightarrow \bar{\Lambda} \pi^-, \Lambda \pi^-$ の探索

Baryon number(B) と Lepton number(L)

を同時に破るプロセス

$\leftrightarrow$ Proton decay, **Strange baryon**

選別条件

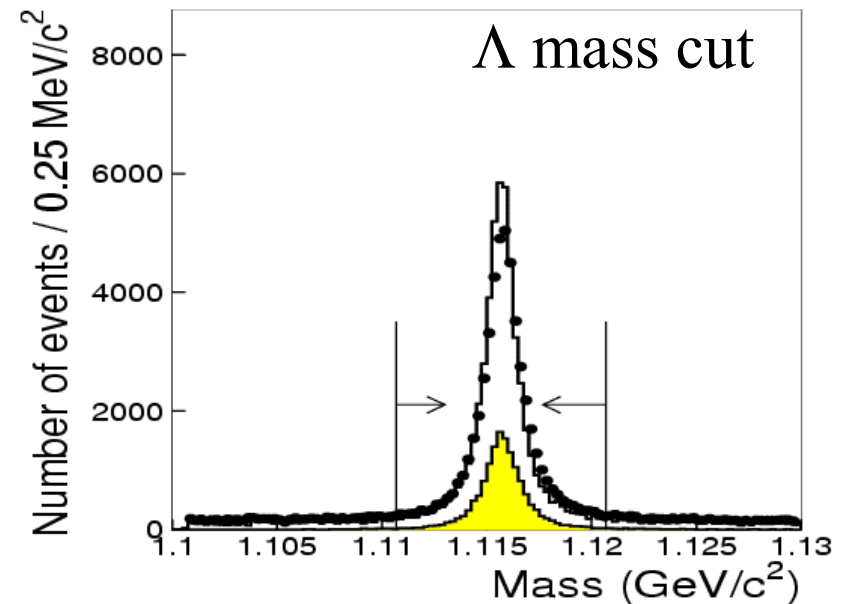
signal side: $\bar{\Lambda} \pi^- \rightarrow \bar{p} \pi^+ \pi^-$
/ $\Lambda \pi^- \rightarrow p \pi^- \pi^-$

the other side: one prong
+ neutral(s)

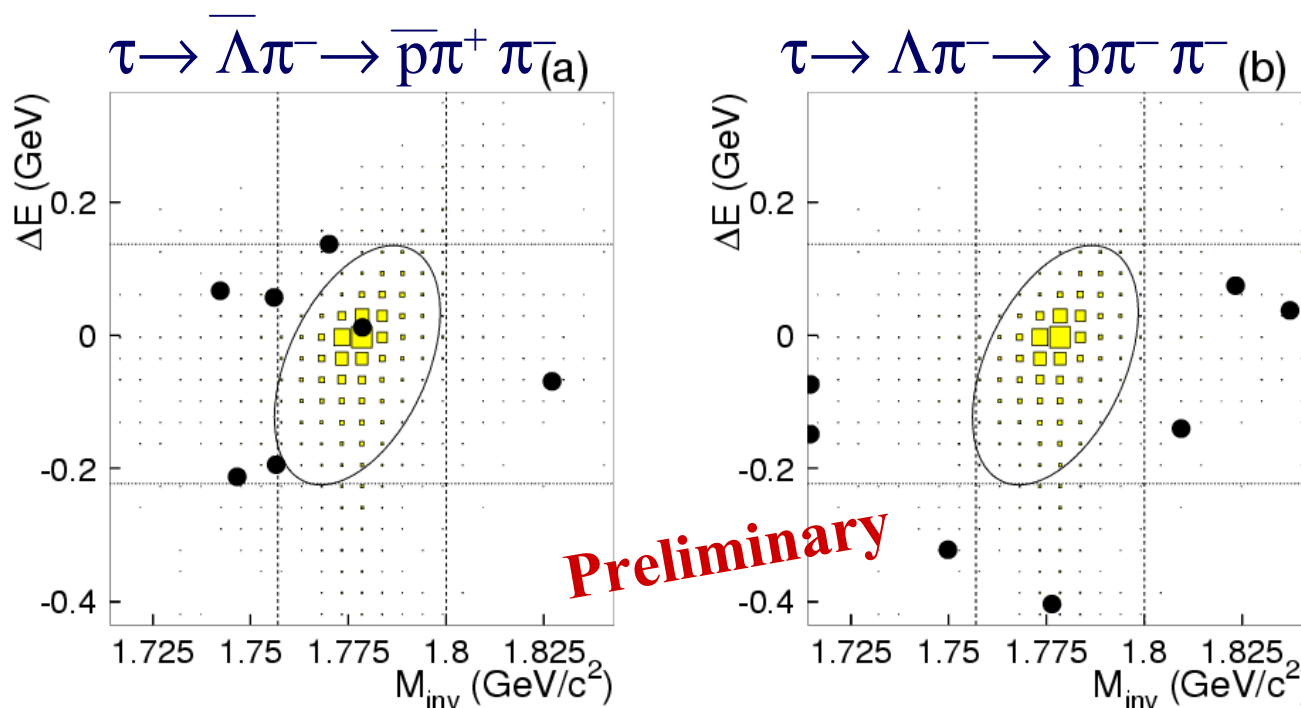
B-L 保存/非保存プロセスの区別
opposite/same charged pions

Λ mass cut

missing-mass-squared cut



m_τ - ΔE plane cut



Backgrounds: $\tau \rightarrow a_1(1260) \nu \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- \nu$, (1つの π を p と間違ふ)
 Λ -inclusive $q\bar{q}$ events

Results

$$B(\tau \rightarrow \bar{\Lambda} \pi^-) < 1.6 \times 10^{-7} \quad (90\% \text{ C.L.})$$

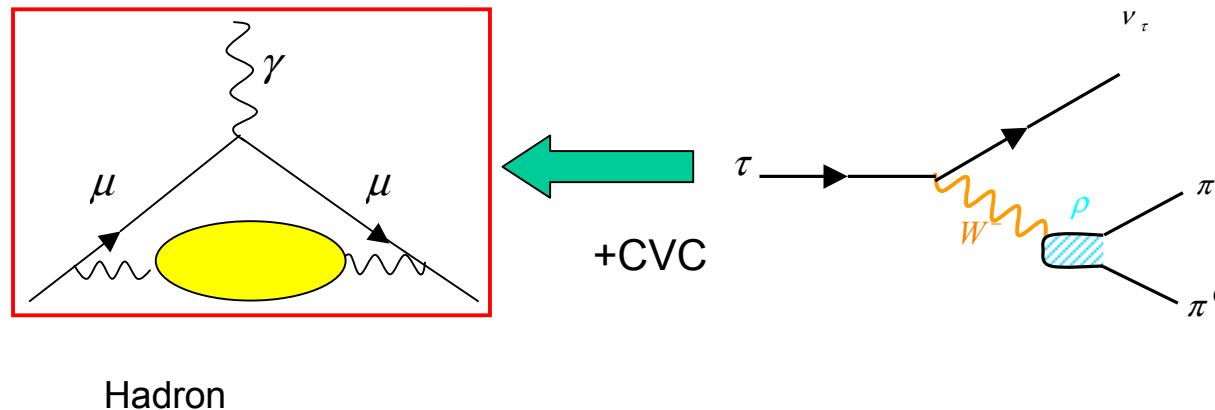
153.8 fb⁻¹

$$B(\tau \rightarrow \Lambda \pi^-) < 1.2 \times 10^{-7} \quad (90\% \text{ C.L.})$$



$\tau \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu$ と $g-2(\mu)$

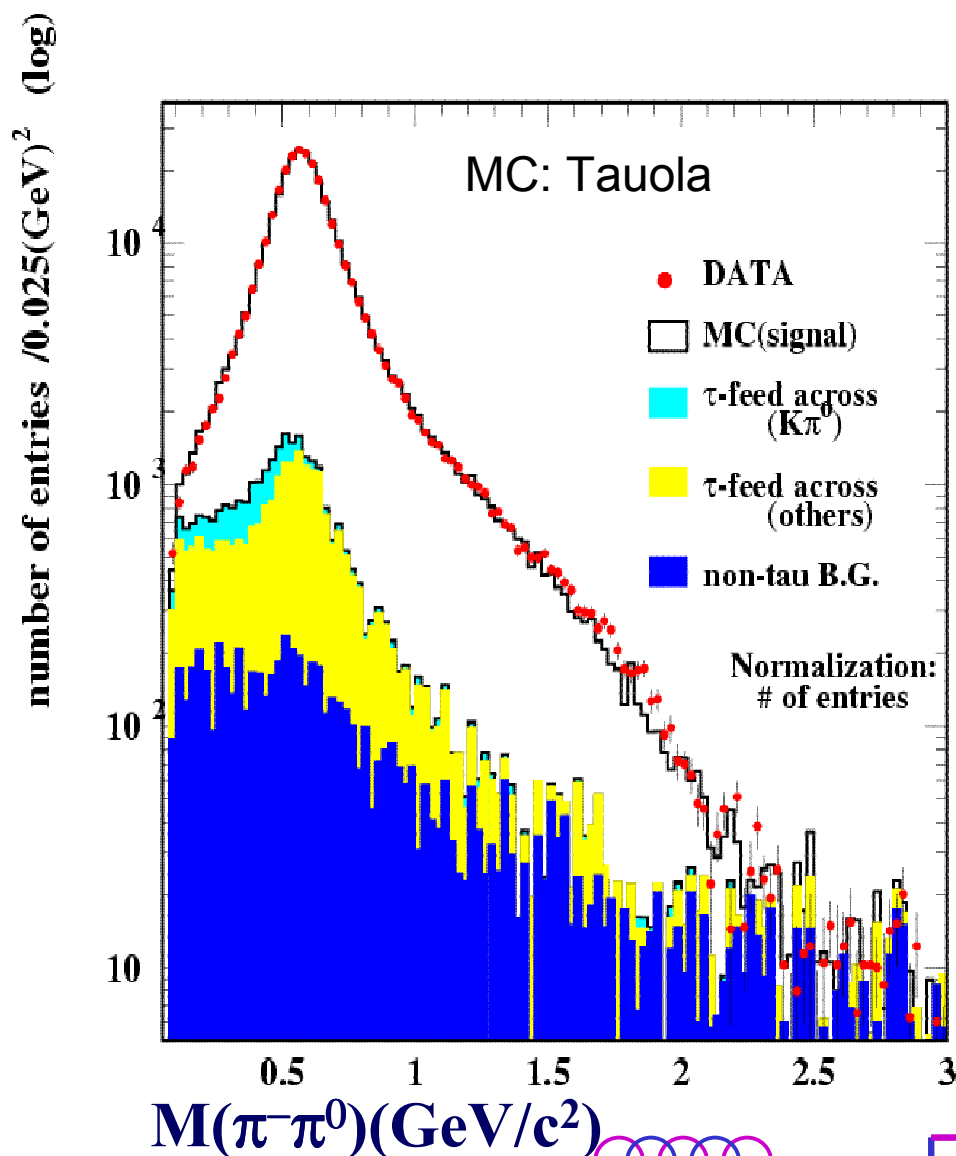
目的: 2π spectral function を測り, $a_\mu^{had, 2\pi}$
muon anomalous magnetic moment (異常磁気能率)
に対する 2π contribution を得る.



これまでに ALEPH, CLEO、OPAL での測定あり
KEKB/Belle 実験: 1~2桁多い統計のデータ



$\pi^-\pi^0$ mass spectrum



- one charged track in hemisphere.
- one π^0 in the hemisphere.

gamma condition : gamma-like

shower shape : $E_\gamma > 0.08\text{GeV}$

- veto the additional gamma
 $E_\gamma \geq 200\text{MeV}$

バックグラウンドの割合

$ee \rightarrow q\bar{q}$ $2.1 \pm 1.6\%$

$h \geq 2\pi^0 \nu$ 5.4%

$K\pi^0 \nu$ 1.7%

4.4 fb⁻¹ data

Unfolding this distribution

Preliminary result

$$a_{\mu}^{\pi\pi} = \frac{\alpha_{em}^2(0)}{\pi} \int_{4M_{\pi}^2}^{\infty} ds \frac{K(s)}{s} v^{\pi\pi^0}(s)$$

$$v^{\pi\pi^0}(s) = \frac{M_{\tau}^2}{6\pi |V_{ud}|^2 S_{EW}} \left[\left(1 - \frac{s}{M_{\tau}^2}\right)^2 \left(1 + \frac{2s}{M_{\tau}^2}\right) \right]^{-1} \frac{B_{\pi\pi^0}}{B_{\pi}} \frac{1}{N_{\pi\pi^0}} \frac{dN_{\pi\pi^0}}{ds}$$

Preliminary

$$a_{\mu}^{\pi\pi} = [528.2 \pm 2.1(stat.) \pm 3.8(syst.) \pm 2.4(isospin)] \times 10^{-10}$$

Integrated mass sqr. region : $4m_{\pi}^2$ to $(1.8)^2 GeV^2$

Previous experiments (τ -base)

$$a_{\mu}^{\pi\pi} = (520.1 \pm 3.5(stat.) \pm 2.4(syst.) \pm 2.4(isospin)) \times 10^{-10}$$

Exp.-Theo. $\sim (22.1 \pm 11.6) \times 10^{-10}$ (only for e^+e^- data)

Theory's error $\sim 8 \times 10^{-10}$

今回の測定のエラーはこれらと比べても十分小さい



Charm Physics

研究課題: QCD、hadron Physics, flavor physics

生成断面積

c-quark fragmentation function

D^0 - $\bar{D}^0$ mixing、D-mesonの崩壊の性質

Ξ_c -baryon の質量、幅

チャーモニウム と Charmed Hadrons

最近発見されたもの

$\eta_c(2S)$ --質量がずっと以前のものと少し違う

$X(3872)$

$X(3940)$, $Y(3940)$

$D^*_0(2308)$, $D_1'(2427)$

$D_{sJ}(2317)$, $D_{sJ}(2460)$

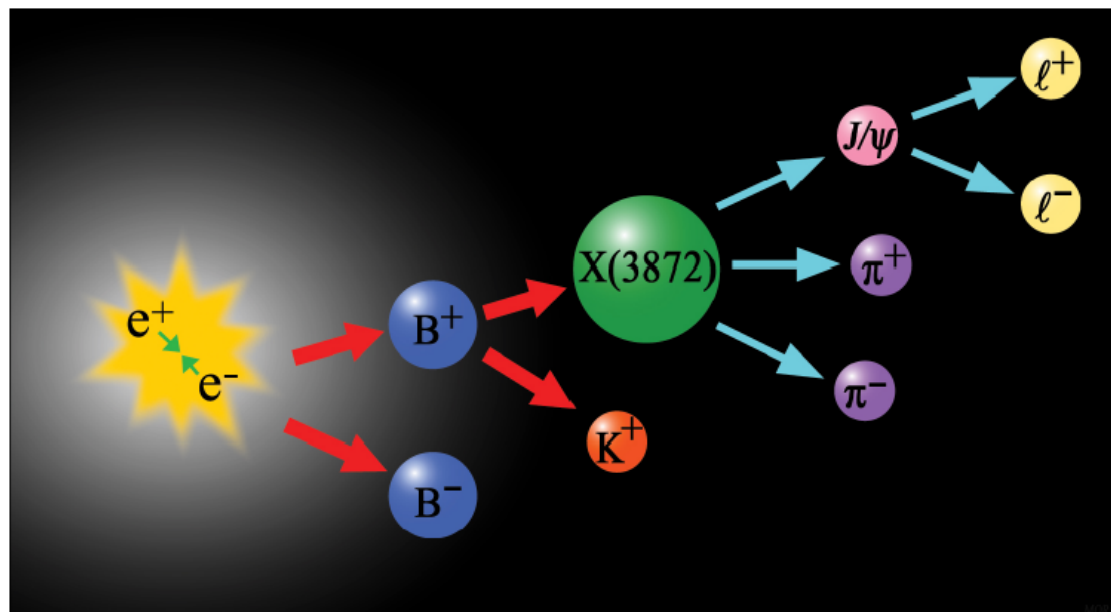
$\Sigma_c(2800)$

.....



X(3872) と その性質

Belle PRL91(2003)262001
Belle hep-ex/0408116

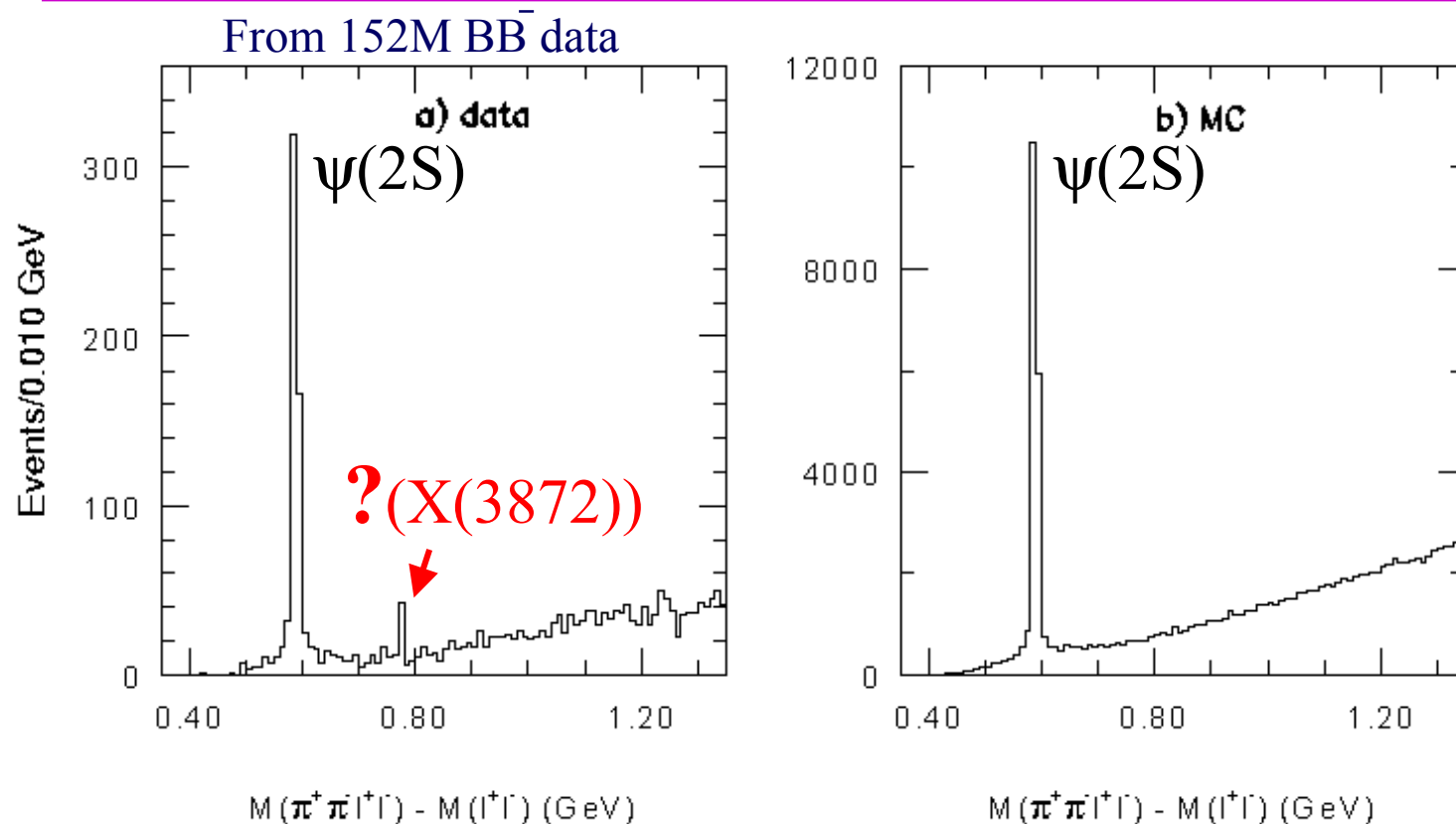


発見: $B^+ \rightarrow X(3872) K^+$, $X(3872) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$, $J/\psi \rightarrow \ell^+\ell^-$
まったく新しい種類の間接子か？

$M = 3872.4 \pm 0.7 \text{ MeV}/c^2$ (from 253 fb^{-1} data)
 $\Gamma < 2.3 \text{ MeV}$ (90% C.L.)



X(3872) の発見: in $B \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi K$



B中間子の崩壊を識別して選別

M_{bc} (beam-constrained mass) and ΔE cuts



X(3872) の量子数

No decay to $D\bar{D}$ found (unnatural parityなら話が合う)

No decay to $\gamma\chi_{cJ}$ (unlikely ψ_2, ψ_3)

J/ ψ decay angle (unlikely h_c) $\Longrightarrow$

$\pi^0\pi^0$ J/ ψ not found

($\pi\pi \rightarrow (I)J^{PC} = (1)1^-$ like)

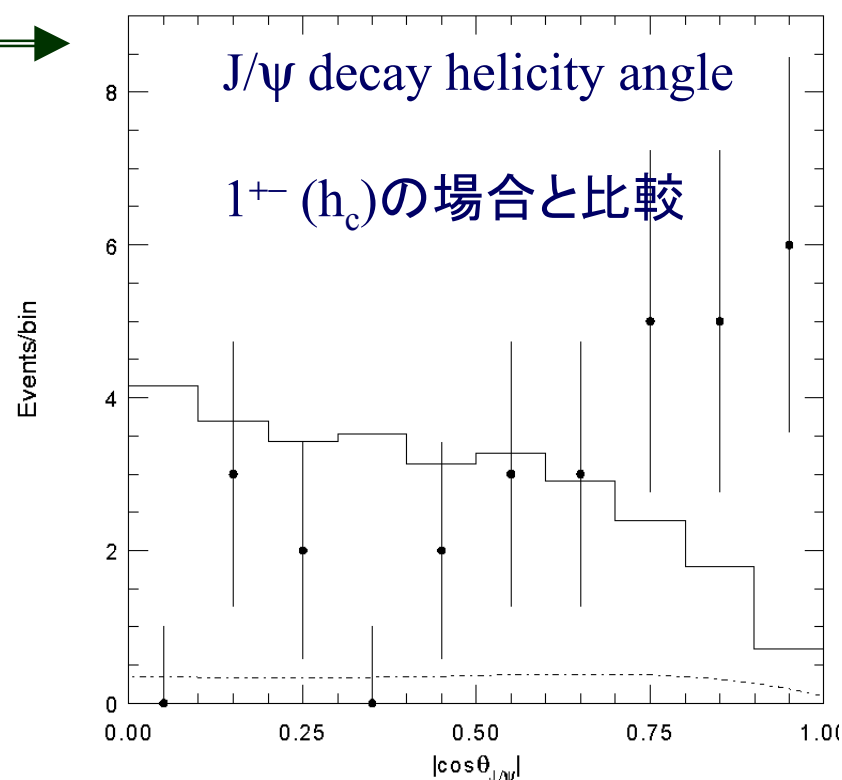
$\pi^+\pi^-\pi^0$ J/ ψ found (virtual ω like)
(isospin/G-parity violation?)

C --- + らしい

幅が非常に狭い

$M(X) \approx M(D) + M(D^*)$

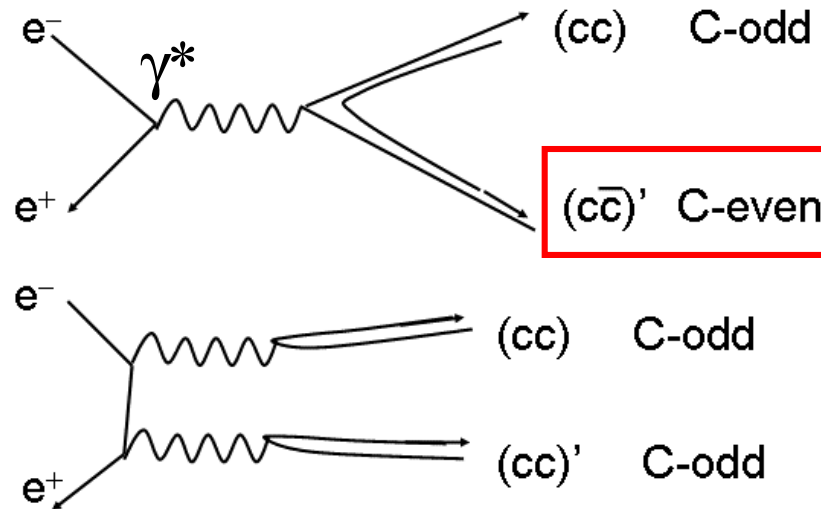
$J^{PC} = 1^{++}$ favorable



Double-Charmonium production

Belle PRD70(2004)071102(R)

$$e^+e^- \rightarrow (c\bar{c}) + (c\bar{c})'$$



選別条件

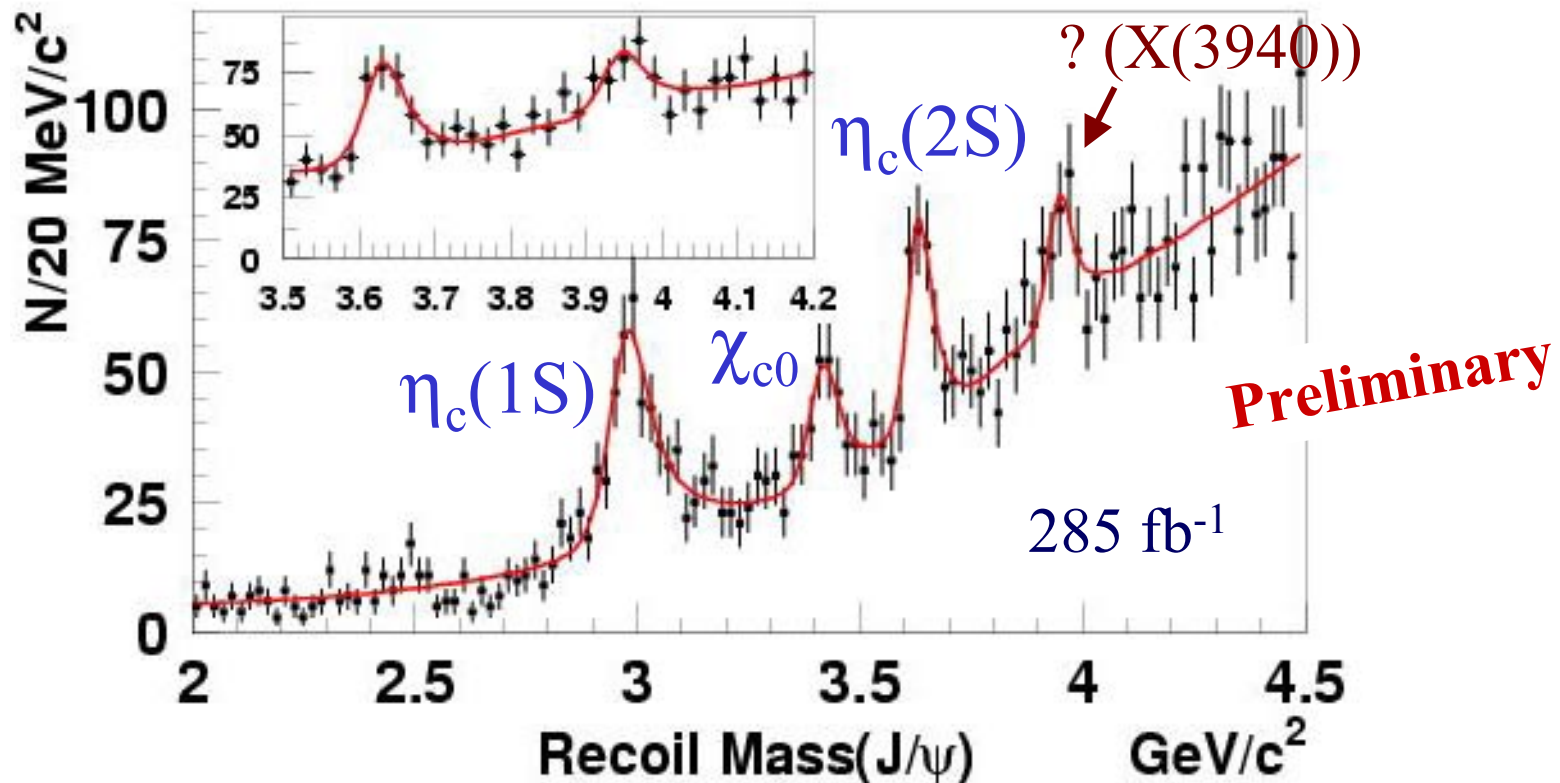
$$(c\bar{c}) \rightarrow J/\psi \rightarrow l^+l^-, \quad \text{or } \psi(2S)$$

$$N_{\text{ch}} > 4$$

$$p_{\text{cm}J/\psi} > 2 \text{ GeV}/c \quad (\text{B中間子の崩壊事象を排除})$$



Spectrum with J/ ψ tagging



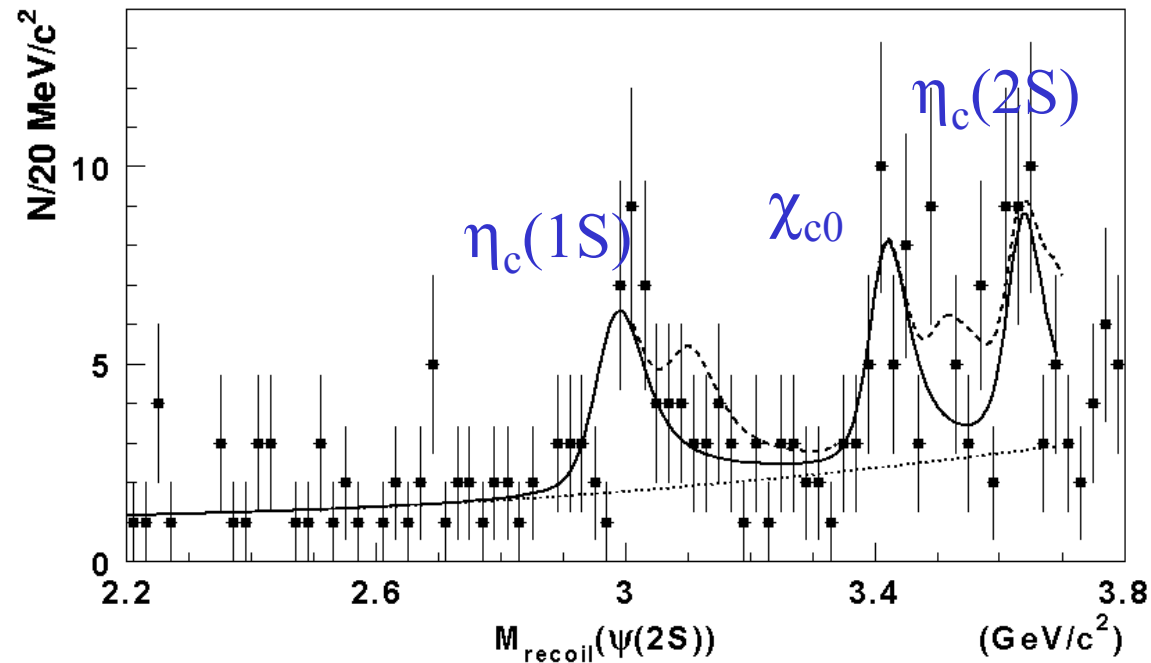
$\eta_c(1S)$, χ_{c0} , $\eta_c(2S)$ are seen --- C-even states

not seen J/ ψ , χ_{c2} , X(3872) (NRQCD計算と比較)

3940MeVにピーク, X(3940) --- ($D\bar{D}^*$ decay seen)



First measurement in $\psi(2S)$ tagging



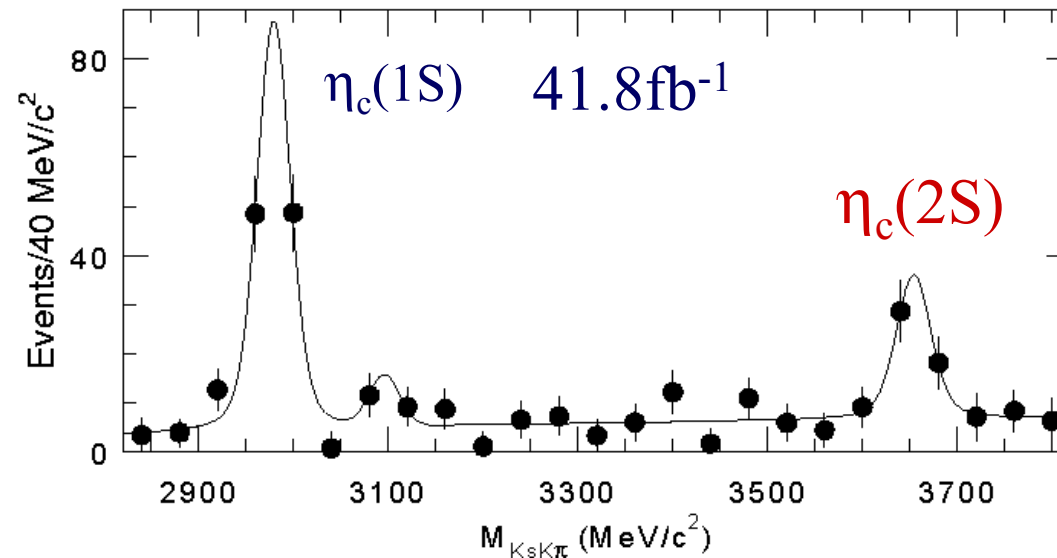
$$\psi(2S) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$$

155 fb⁻¹ data

J/ψ タグの結果と似ている



$\eta_c(2S)$ の性質



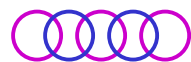
Observed in $B \rightarrow \eta_c(2S)K$, $\eta_c(2S) \rightarrow K_S^0 K \pi$

Belle PRL89(2002)102001

$$M = 3654 \pm 6 \pm 8 \text{ MeV}/c^2, \quad \Gamma < 55 \text{ MeV}$$

Belle: Double charmonium --- $M = 3630 \pm 8 \text{ MeV}/c^2$

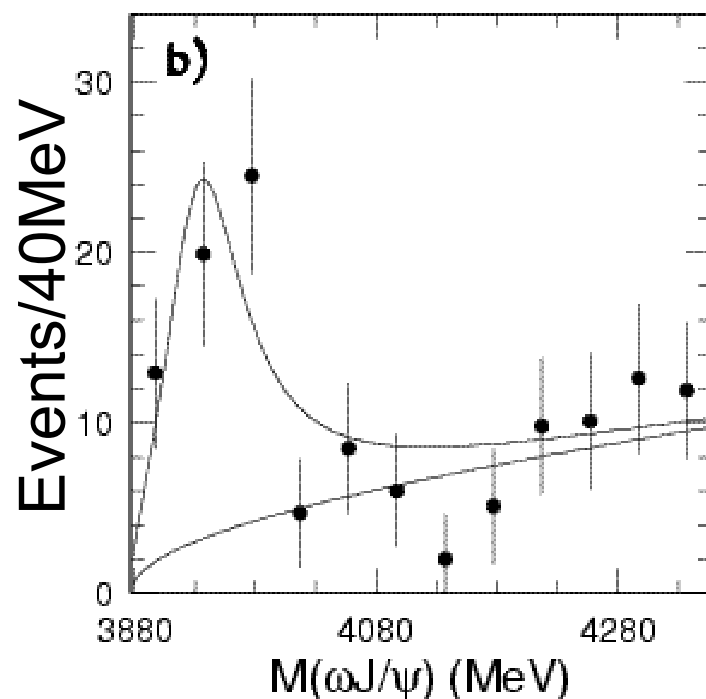
Crystal Ball 1982 : $M = 3594 \pm 5 \text{ MeV}/c^2$



An Enhancement in $\omega J/\psi$

Belle hep-ex/0408126

$B \rightarrow \omega J/\psi K$ 中の $\omega J/\psi$ の不変質量分布
(253fb^{-1})



Near-threshold enhancement

$Y(3940)$

$M = 3943 \pm 11 \pm 13 \text{ MeV}/c$

$\Gamma = 87 \pm 22 \pm 26 \text{ MeV}$

$D\bar{D}^{(*)}$ 崩壊は少ないとしたら
 $c\bar{c}g$ (hybrid) stateの候補
 $X(3940)$ とは別物?



New Isotriplet Charmed Baryon

Belle hep-ex/0412069
(to appear in PRL)

Isotriplet charmed baryon (Σ_c)

$\Sigma_c(2455)$ and $\Sigma_c(2520)$

$J=1/2$

$3/2$

これらは既知の軌道角運動量の基底状態

励起状態の探索

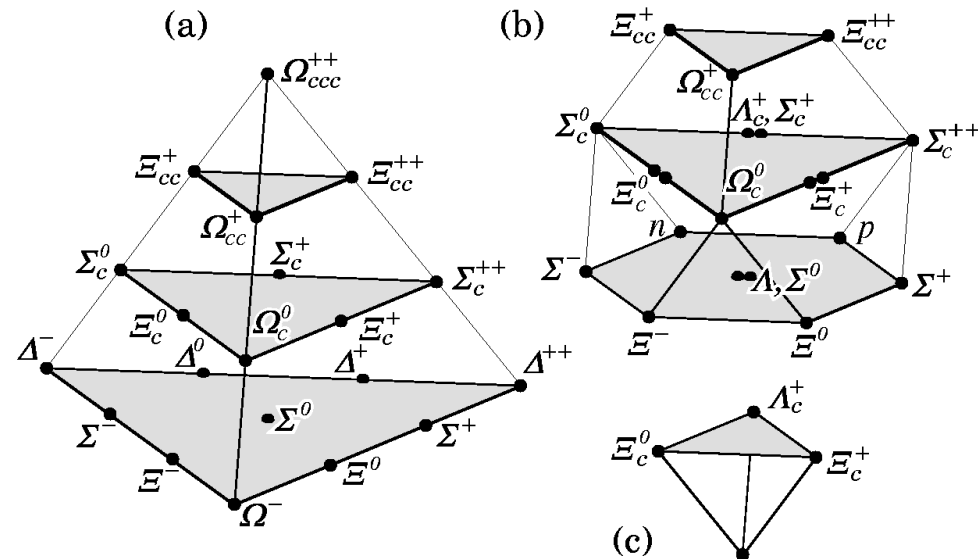
Decaying to $\Lambda_c^+ \pi$

$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$

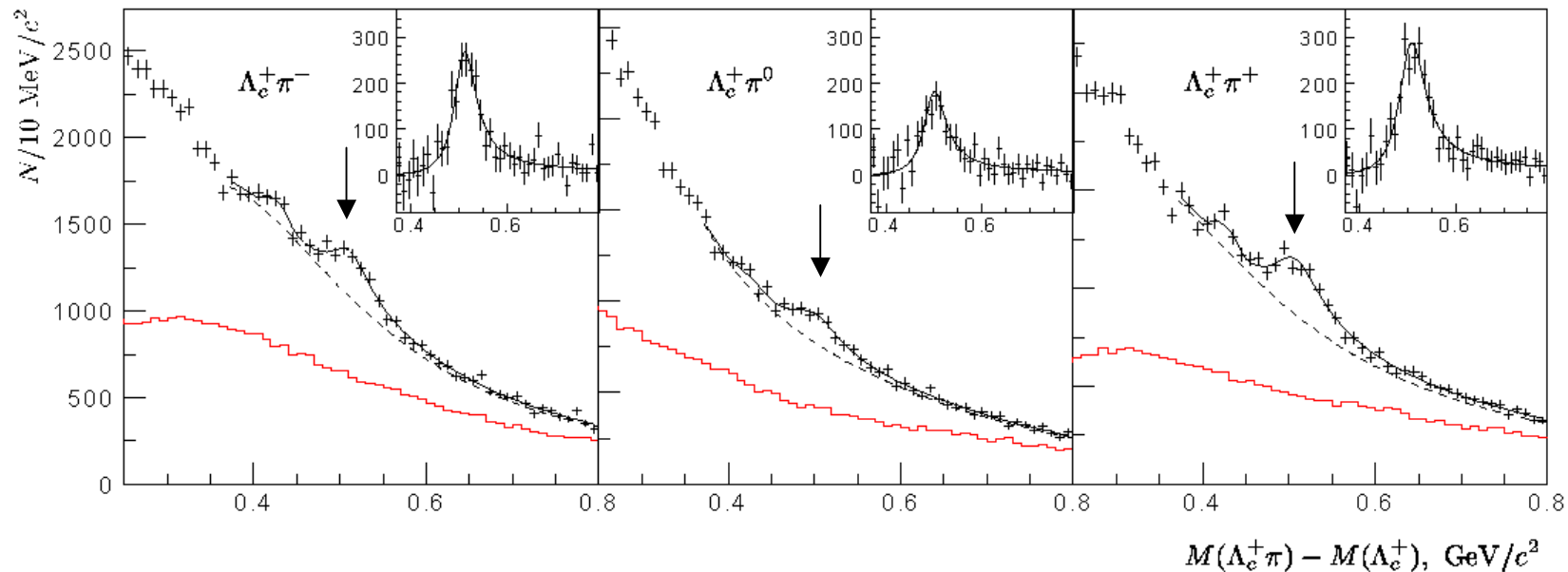
$\Lambda_c^+ \pi, \Lambda_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$

$x_p(\Lambda_c^+ \pi) > 0.7$

(高い運動量での生成)



新しい charmed baryon の発見



Signal: $\Delta M \sim 0.51 \text{ GeV}$, $\longrightarrow \Sigma_c(2800)$

Background peaks: $\Lambda_c(2880)^+ \rightarrow \Sigma_c(2455) \pi \rightarrow \Lambda_c^+ \pi^+ \pi^-$

281 fb^{-1}



新しい charmed baryonの性質

Charge	Mass Diff. from $M(\Lambda_c^+)$ (MeV/c ²) Λ_c^+ との質量差	Total Width (MeV/c ²)
0	$515.4 \pm_{3.1}^{3.2} \pm_{6.0}^{2.1}$	$61 \pm_{13}^{18} \pm_{13}^{22}$
+	$505.4 \pm_{4.6}^{5.8} \pm_{2.0}^{12.4}$	$62 \pm_{23}^{37} \pm_{38}^{52}$
++	$514.5 \pm_{3.1}^{3.4} \pm_{4.9}^{2.8}$	$75 \pm_{13}^{18} \pm_{11}^{12}$

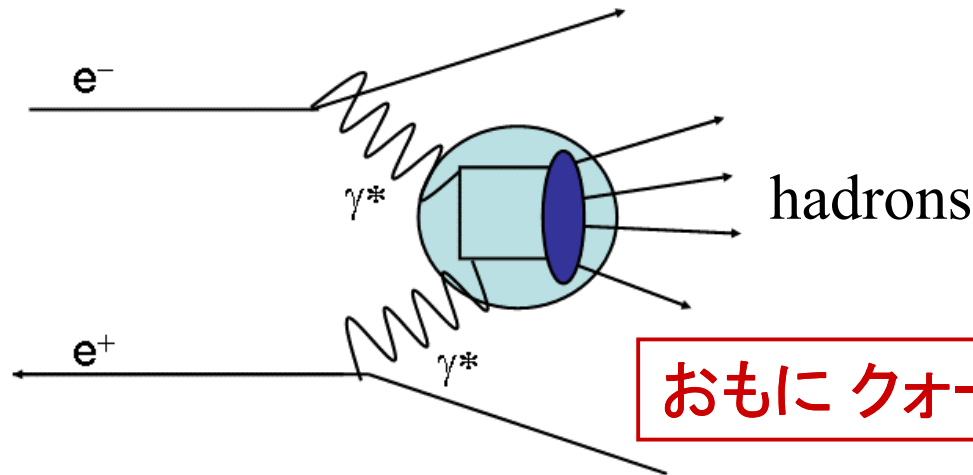
理論予想との比較によれば...

$j(n\bar{n})=2$, D waveで崩壊, $J^P=3/2^-$ (?)

最初の Σ_c の軌道角運動量励起状態の発見



Two-Photon Physics



おもに クォークとのhardな散乱

2つの「準」実光子の衝突によるハドロン生成
($|q^2| < 0.001 \text{ GeV}^2$)

Exclusive processes with $W_\gamma = 0.8 - 4.5 \text{ GeV}$

摂動論的／非摂動論的QCD、ハドロン生成メカニズム

Light-quark resonances、チャームonium

同一の反応を広いエネルギー領域で一挙に測定可能



$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ と $\gamma\gamma \rightarrow K^+K^-$

Belle hep-ex/0412058

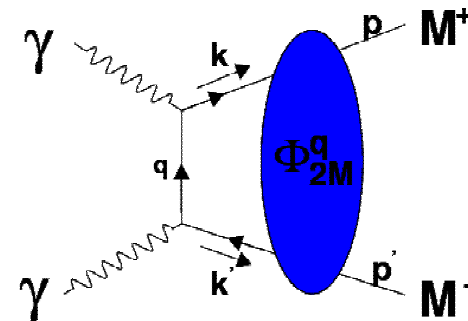
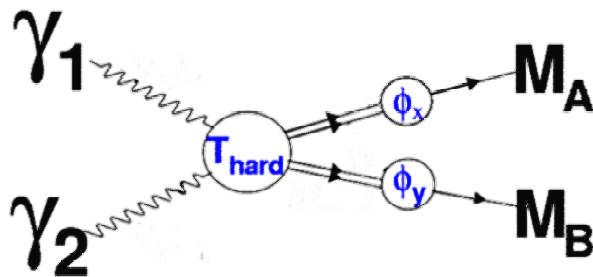
QCDの研究 at $2.4 < W_{\gamma\gamma} < 4.1$ GeV

理論モデル

Hard scatteringによるクォーク生成

(左) 2 quark対の生成と form factor (Brodsky & Lepage, Benauyon&Chernyak)

(右) 1 quark対生成 と soft hadronic contributions (Diehl, Kroll & Vogt)



これらの QCD 理論の予言: $d\sigma/d|\cos \theta^*| \sim \sin^{-4} \theta^*$

Counting rule から予想されるエネルギー依存性: $\propto W_{\gamma\gamma}^{-6}$

高いエネルギーで成り立つと予想される



$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ と $\gamma\gamma \rightarrow K^+K^-$ の解析

選別条件

Two tracks ($p_t > 0.8 \text{ GeV}/c$)

γ -inclusive eventsの排除

p_t -balance (ビーム軸横方向運動量ベクトル和):

50(100) MeV/c 以下 for $\pi\pi$ (KK)

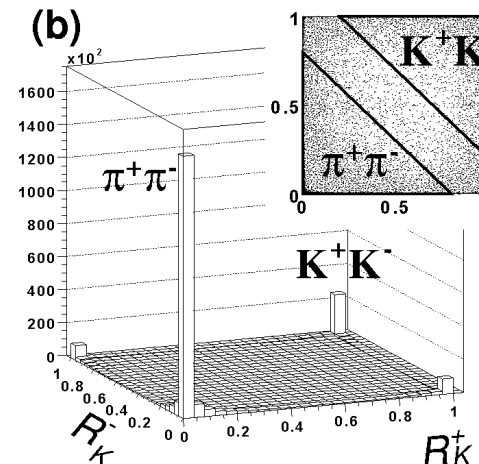
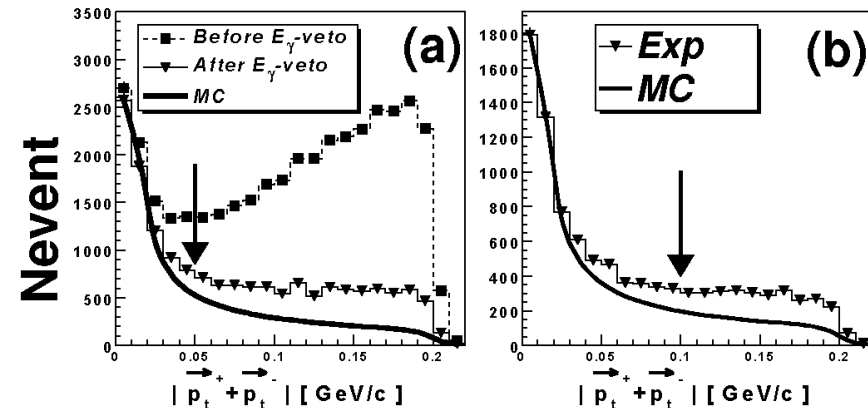
粒子識別

e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $p\bar{p}$ の排除

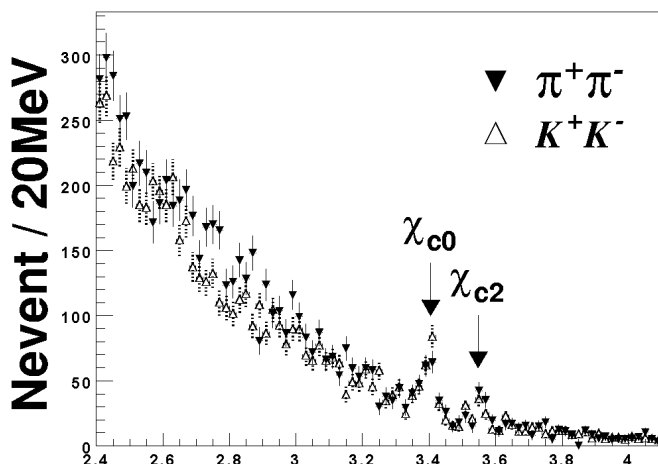
K/ π の分離

さらなる $\mu\mu$ background

QED MC を使用して補正



Cross section のエネルギー依存性



チャーモニウム χ_{c0}, χ_{c2} を観測
(このプロセスでは初めて)

チャーモニウムの寄与は差し引く

断面積比 W [GeV]

$\text{Ratio}(K^+K^-/\pi^+\pi^-)$

$=0.89 \pm 0.04 \pm 0.15$

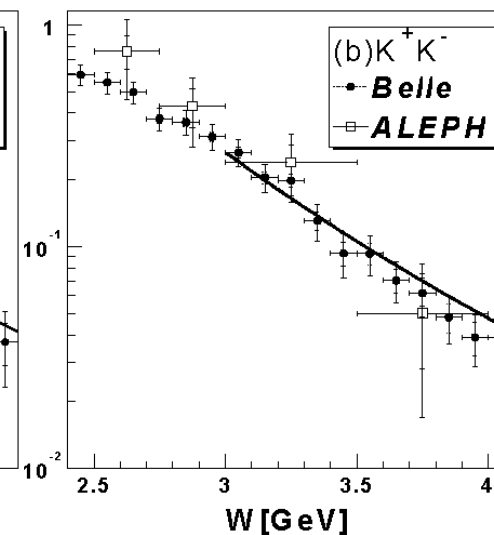
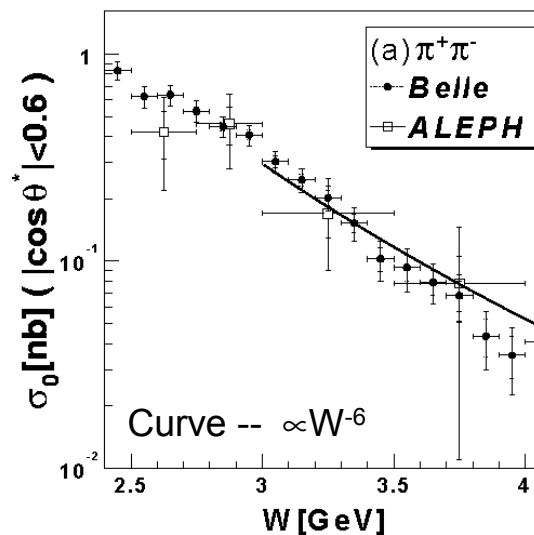
SU(3) (U-spin) invariance hold

W_γ^n dependence

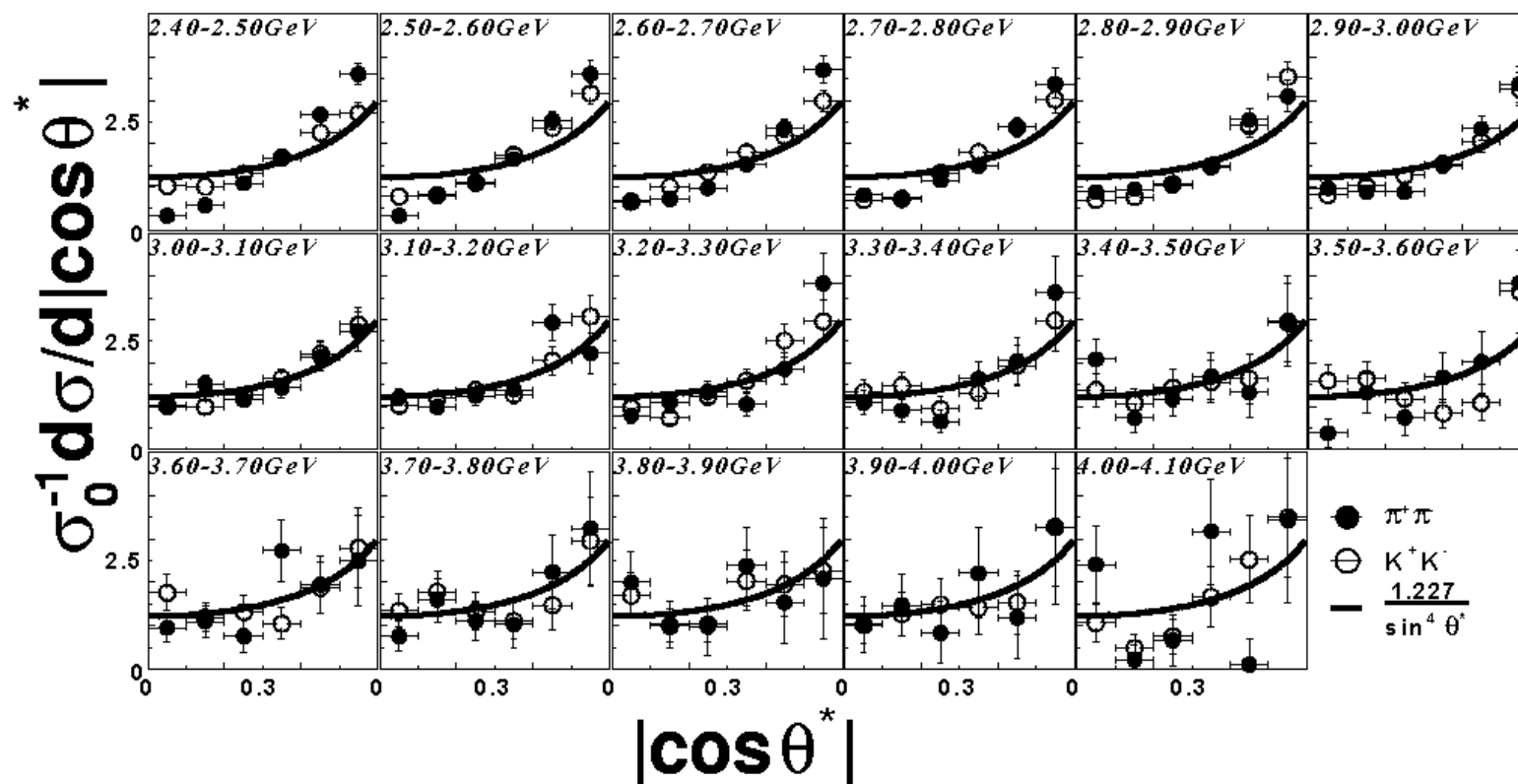
(重心系エネルギー依存性)

$n = -7.9 \pm 0.4 \pm 1.5$ for $\pi^+\pi^-$
 $-7.3 \pm 0.3 \pm 1.5$ for K^+K^-

for $3.0 < W < 4.1 \text{ GeV}$



散乱角分布

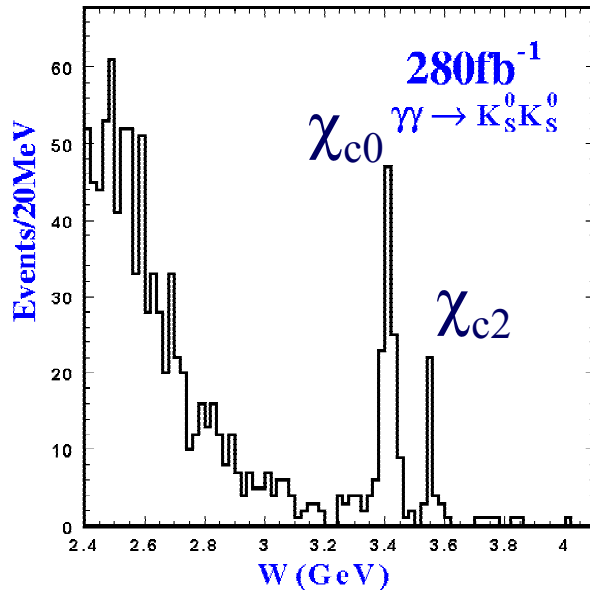


Curves: QCD 理論の予言 : $d\sigma/d|\cos \theta^*| \sim \sin^{-4} \theta^*$

$W_\gamma > 3.0$ GeVで合っている, 低いところでは実験結果がより急峻



$\gamma\gamma \rightarrow K_S^0 K_S^0$: preliminary results



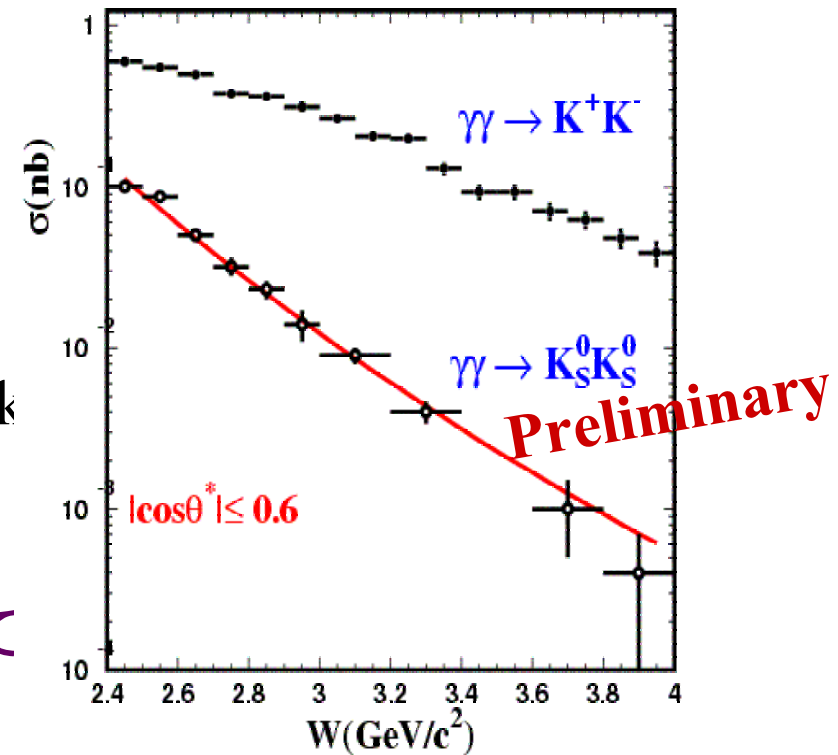
χ_{c0}, χ_{c2} が見える

K^+K^- での測定と合う (isospin不変性 $\rightarrow$ 1:2)

$$\sigma(K_S^0 K_S^0) \ll \sigma(K^+ K^-)$$

電磁相互作用なので hadron/quark
の電荷によって違う

比についてQCD 計算が提唱されて
いる



$$\gamma \rightarrow p\bar{p}$$

Belle hep-ex/0503006

QCDとバリオン生成メカニズムの研究

single quark?.. or a diquark?

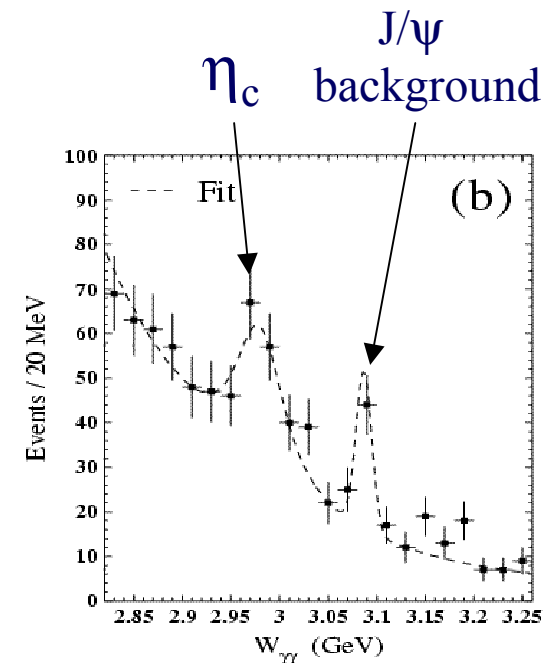
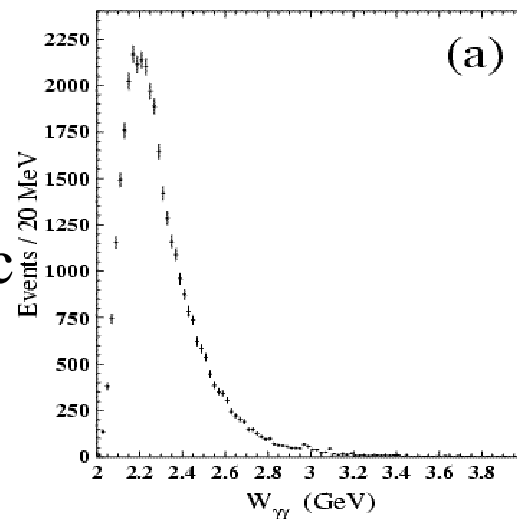
$W_{\gamma\gamma}$ 依存性 と 断面積の大きさ

選別条件

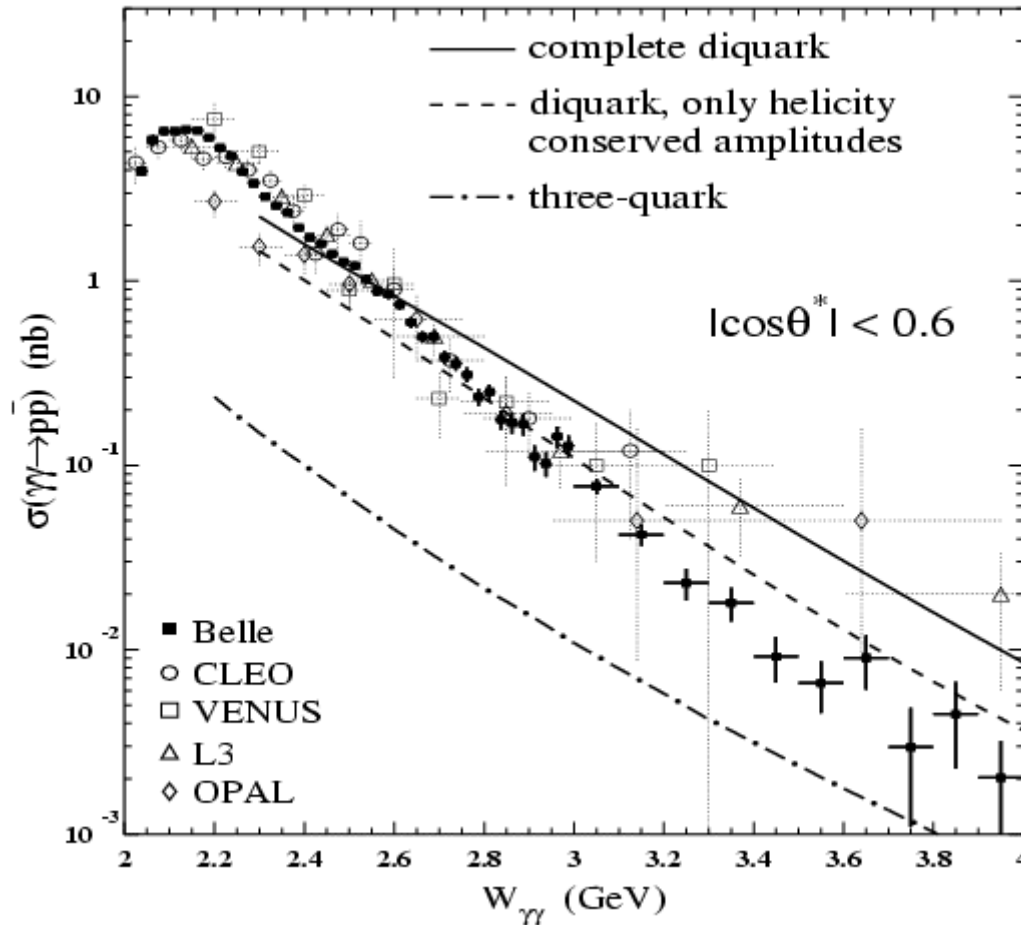
Two tracks:
proton and anti-proton
 $p_t \text{ balance} < 0.2 \text{ GeV}/c$

η_c の生成を観測
(first observation in this process)

J/ψ background を引き算して補正



Cross section



$W_{\gamma\gamma}^n$ dependence

$n = -15.1 \pm_{1.1}^{0.8}$ @ 2.5 – 2.9 GeV

$n = -12.4 \pm_{2.3}^{2.4}$ @ 3.2 – 4.0 GeV

変化がある

3.1 GeV以上で

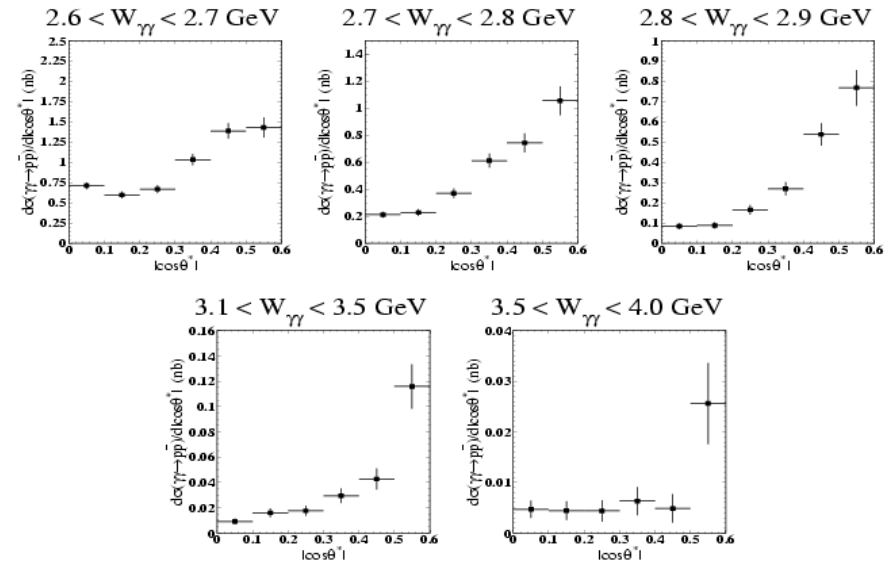
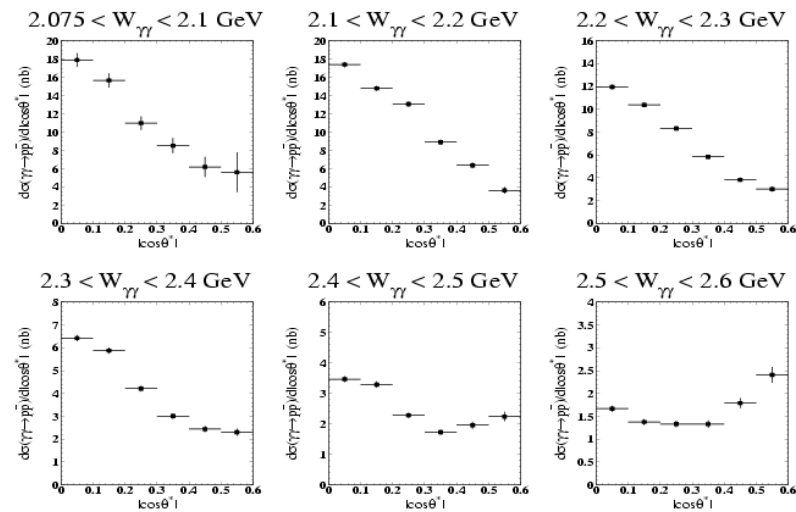
QCD prediction $n = -10$

に近づいているかもしれない



散乱角分布

低いエネルギーでは大角度が大きい
エネルギーが増す毎に前方がどんどん急峻に上がる



チャーモニウムの結果のまとめ

in $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-/K^+K^-/K_S^0K_S^0/p\bar{p}$

Process	$\Gamma\gamma\gamma(R)$ B(R→final state) [eV]
$\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c0} \rightarrow \pi^+\pi^-$	$15.1 \pm 2.1 \pm 2.3$
$\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c0} \rightarrow K^+K^-$	$14.3 \pm 1.6 \pm 2.3$
$\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c0} \rightarrow K_S K_S$	$6.05 \pm 0.61 \pm 0.48$ Preliminary
$\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c2} \rightarrow \pi^+\pi^-$	$0.76 \pm 0.14 \pm 0.11$
$\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c2} \rightarrow K^+K^-$	$0.44 \pm 0.11 \pm 0.07$
$\gamma\gamma \rightarrow \chi_{c2} \rightarrow K_S K_S$	$0.26 \pm 0.05 \pm 0.02$ Preliminary
$\gamma\gamma \rightarrow \eta_c \rightarrow p\bar{p}$	$7.20 \pm 1.53 \pm 0.67$

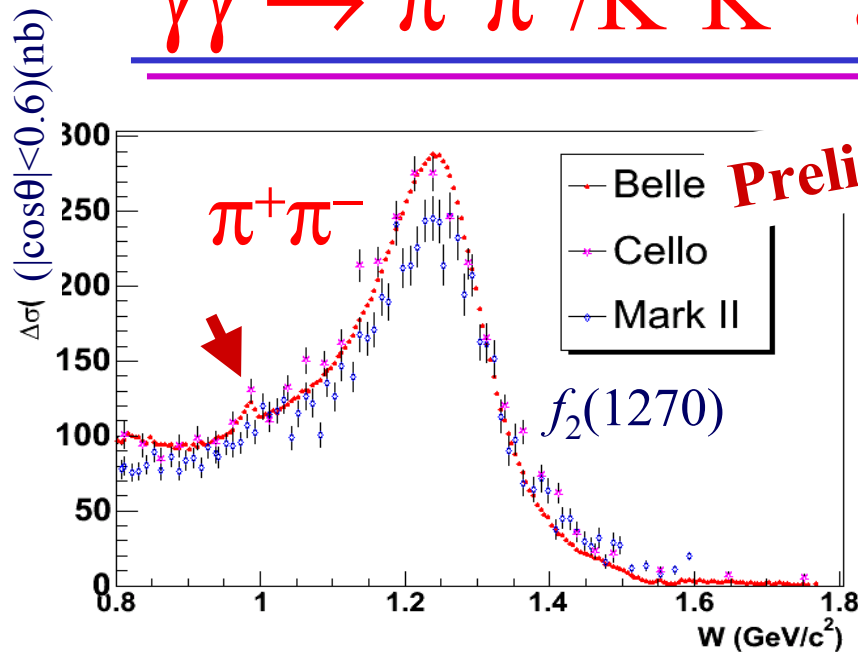
isospin不変性が成り立つ → $K^+K^- : K_S K_S = 2:1$

すべて 2光子衝突過程では初めての測定



$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-/K^+K^-$ at the lower energies

Belle EPJ C32(2003)323



Preliminary

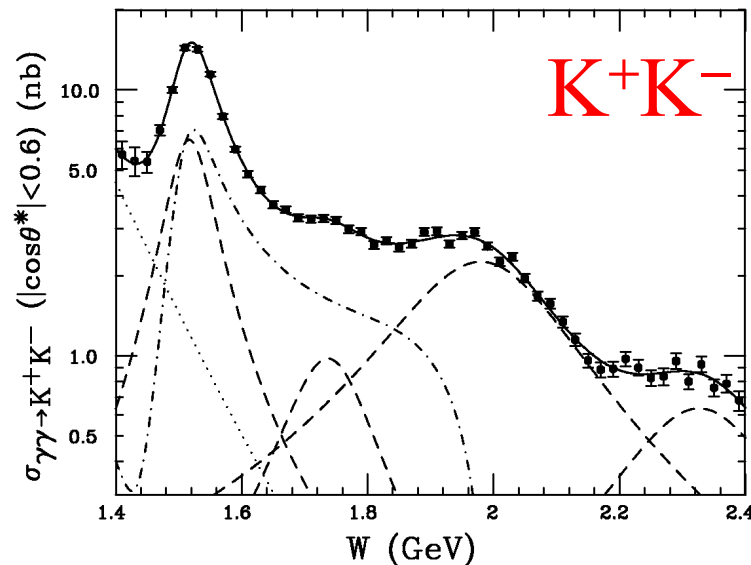
$\gamma\gamma \rightarrow f_0(980)$ をピークとして観測

$f_0(980)$ は正体不明の中間子

普通の $q\bar{q}$ (1^3P_0) state?

KK molecule

相対論的クォークモデルで説明される?



New resonance structures observed

$J^P=(\text{even})^+$ の f_J or a_J 中間子

	Resonance components	Mass (MeV/ c^2)	Total width (MeV)
(A)	$(f'_2(1525))$	$1518 \pm 1 \pm 3$	$82 \pm 2 \pm 3$
(B)	(1.75 GeV)	$1737 \pm 5 \pm 7$	$151 \pm 22 \pm 24$
(C)	(2.0 GeV)	$1980 \pm 2 \pm 14$	$297 \pm 12 \pm 6$
(D)	(2.3 GeV)	$2327 \pm 9 \pm 6$	$275 \pm 36 \pm 20$



まとめ

KEKB/Belle 実験は Bの物理以外の分野でも
豊富な成果を提供している

Tau: New Physicsの探索の大幅な改善
hadronic coupling の精密測定

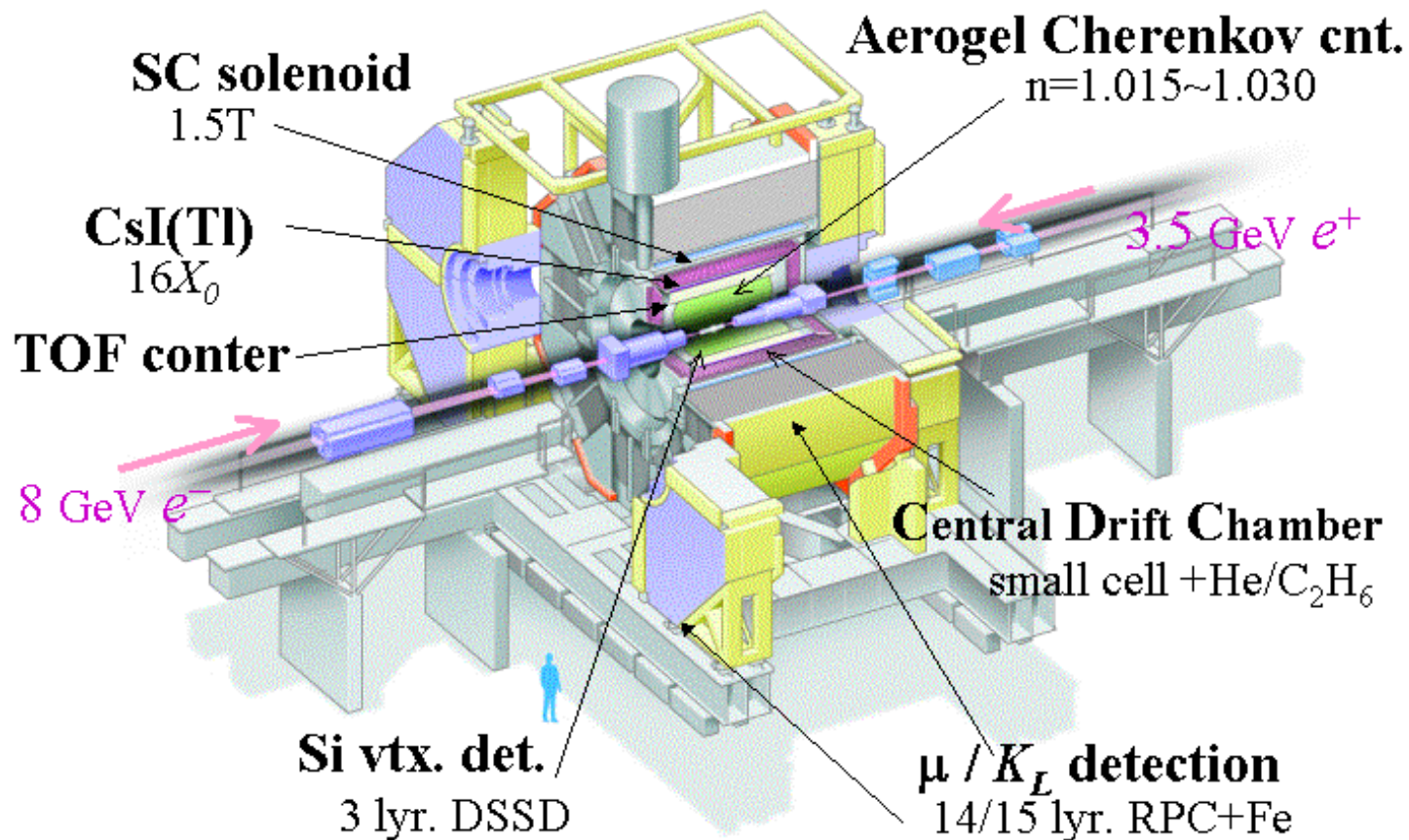
Charm: 新しいハドロンの発見
QCD/hadron 物理への寄与
flavor physicsへの寄与

Two-Photon: QCD の検証
種々のハドロンの性質、内部構造の研究、探索

More Results Coming soon



Belle Detector





International Collaboration: Belle



13 countries, 57 institutes, ~400 collaborators



