

Belle実験での 4つのクォークを含む新粒子 の発見

上原 貞治

素核研 第一研究系

Belleグループ

2008.1.18 素核研金茶会

クォークがハドロンをかたちづくる

クォーク

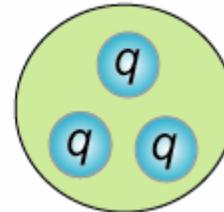
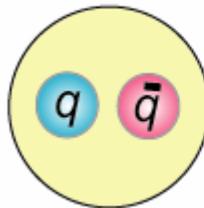
電荷	クォーク 世代		
	I	II	III
$+\frac{2}{3}e$	 u アップ	 c チャーム	 t トップ
$-\frac{1}{3}e$	 d ダウン	 s ストレンジ	 b ボトム

電荷	反クォーク 世代		
	I	II	III
$-\frac{2}{3}e$	 \bar{u} 反アップ	 \bar{c} 反チャーム	 \bar{t} 反トップ
$+\frac{1}{3}e$	 \bar{d} 反ダウン	 \bar{s} 反ストレンジ	 \bar{b} 反ボトム

ふつうの中間子
(メソン)

ふつうのバリオン
(重粒子)

ハドロン



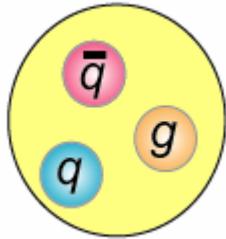
クォークの色
を消す
組み合わせ

エキゾティックハドロン

[$q\bar{q}$], [qqq] 以外の組み合わせのハドロン

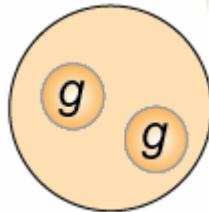
中間子系

(異国風中間子)

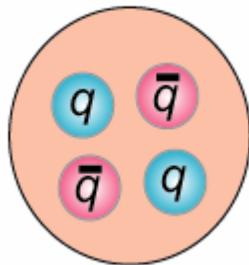


ハイブリッド

g : グルーオン



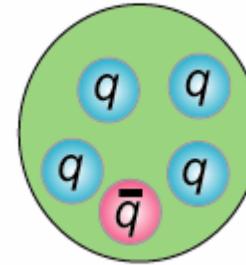
グルーボール



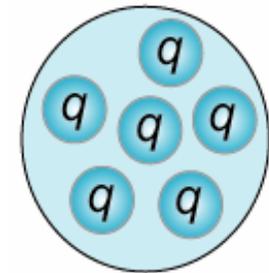
テトラクォーク
(4クォーク)

バリオン系

(異国風バリオン)



ペンタクォーク



ダイバリオン₃

存在しうる。
存在して悪い理由はないが
これまでに確実なものは見つかっていない
なぜ？

エキゾティックハドロンの見分け方

基本的な外見的性質から区別することは一般的には難しい：
異国風中間子 \leftrightarrow 普通の間中子

これまで約30年にわたって多くの候補が見つかりながら、
決定的な証拠はなかった

η (1440)、 f_0 (980)、 f_J (1710)、...

これらは、グルーボール、テトラクォークの候補

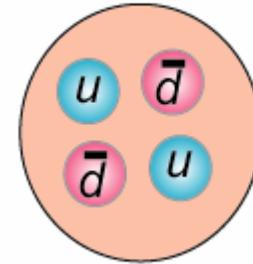
実験で測定された性質を理論と比較する：

↑ でも モデルに依存する

外見で区別可能ないくつかのパターン

- 電荷が2の中間子 → 普通の中間子ではありえない

- J^{PC} (スピン、パリティ、荷電変換) = 1^{-+} などの中間子
(0^{-} 、 2^{+} などもそう)



→ 普通の中間子ではありえない

普通の中間子なら、 $P=(-1)^{L+1}$ 、 $C=(-1)^{L+S}$ 、 $S=0,1$ 、 $J=L\oplus S$

$J=1$ 、 $S=0 \rightarrow L=1 \rightarrow C=-1$

$J=1$ 、 $S=1$ 、 $C=+1 \rightarrow L=1 \rightarrow P=+1$

- $n K^+$ に 強い相互作用で 崩壊する バリオン

→ 普通のバリオンではありえない

[udd $\bar{s}u$] SPring8 での LEPS 実験での ペンタクォーク $\Theta^+(1540)$ の発見

$\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^-$ 、 $\Theta^+ \rightarrow n K^+$,

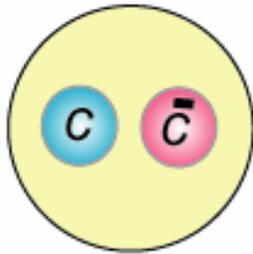
(十分な統計的有意性では確立されていない)

- 電荷を持つ「隠れたチャーム」

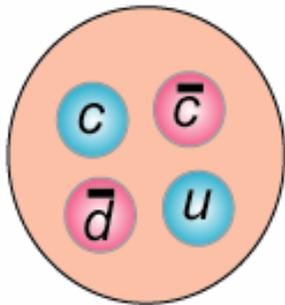
→ 普通の中間子ではありえない

「隠れたチャーム」とは？

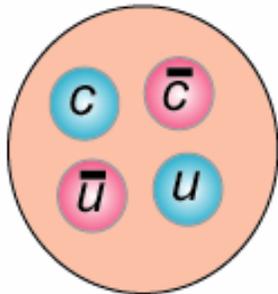
$c\bar{c}$ を含む ハドロン（中間子系）



チャーモニウム： **必ず電荷がゼロ**



電荷のある テトラクォークの隠れたチャーム



電荷のない テトラクォークの隠れたチャーム

「隠れたチャーム」発見の歴史 SINCE1974

スピン パリティ・荷電変換

「隠れたチャーム」をもつおもな中間子

チャーモニウムは、左のような表に収まるはず

$J^{PC} = 0^{-+}$	1^{-}	0^{++}	1^{+-}	1^{++}	2^{++}
η_c 2980 1980年	J/ψ 3097 1974年	χ_{c0} 3415 1975年	h_c 3525 1992年 2005年確認	χ_{c1} 3511 1975年 1977年確認	χ_{c2} 3556 1976年
$\eta_c(2S)$ 3638 2002年	$\psi(2S)$ 3686 1974年	未発見	未発見	未発見	$\chi_{c2}(2P)=Z(3930)$ 3929 2005年
$\eta_c(3S) (=X(3940)??)$ (3943) (2005年)	$\psi(3770)$ 3770 1977年	未発見	未発見	未発見	未発見

D中間子対
閾質量より
重い

ψ を含む状態への崩壊

X(3872)
3872
2003年

Y(3940)
3943
2004年

Y(4260) Y(4008) Y(4360) Y(4660)
4247 4008 4361 4664
2005年 2007年 2006年 2007年

1970年代~1980年
最初の発見の時代

2003年以降
Bファクトリーによる
爆発的なルネサンス
(open charm も同様)

2チャーモニウム生成での発見

X(3940) X(4160)
3943 4156
2005年 2007年

Z(4430) 電荷を持っている
4433
2007年

ハドロンの命名について

- 量子数が決まれば名称が決まる

チャーモニウムなら、 η_c 、 ψ 、 h_c 、 χ_c のいずれかを含む名称

- カッコ内の数値はMeV/c² 単位での質量、

(測定がアップデートされると変わることもある。明らかに不正確な値でも変わらないこともある。)

チャーモニウム、ボトモニウム: 主量子数と軌道角運動量で表現することもある($\psi(2S)$ 、 $Y(4S)$ など)

- シンボルの右下の数値はスピンを表す

- 中間子は、natural-parity = + のものは、* をつけても良い

' (プライム) は同じJ^{PC}のハドロンを区別するため(重いほうにつけるが多義的)

- X(), Y(), Z() などというのは量子数が決まるまでの**暫定的な名前**。

文字の選択には(人に説明できるほどの)意味は無し

(質量が近い別種のを区別する意味はある)

いずれは、正式名に改名されることが目標とされている

電荷のある「隠れたチャーム」は、チャーモニウムとは違うシンボルの名称になるだろう

(アイソスピン=0 でないから)

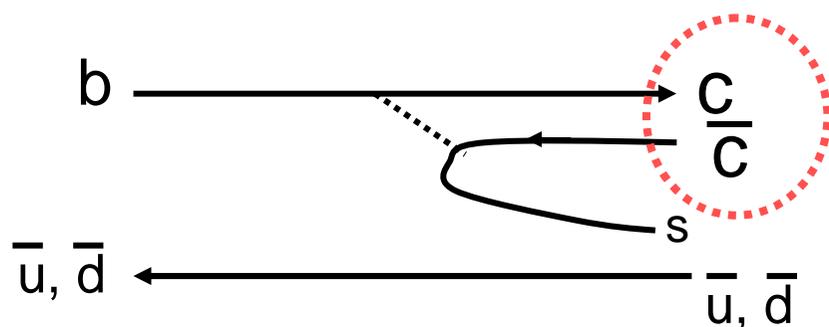
Bファクトリーでの「隠れたチャーム」の生成

B中間子の崩壊:

$$e^+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow B \bar{B},$$

B中間子は、チャームを含む状態に崩壊しやすい (99%くらい)

うち 1~2% は、「隠れたチャーム」を含む状態に崩壊する。



$B \rightarrow J/\psi K_s$ CPV の発見 (2001)
445 event/ 29 fb⁻¹

$B \rightarrow X(3872) K$ の発見 (2003)
36 event/ 140 fb⁻¹

$B \rightarrow Z(4430) K$ の発見 (2007)
121 event/ 605 fb⁻¹

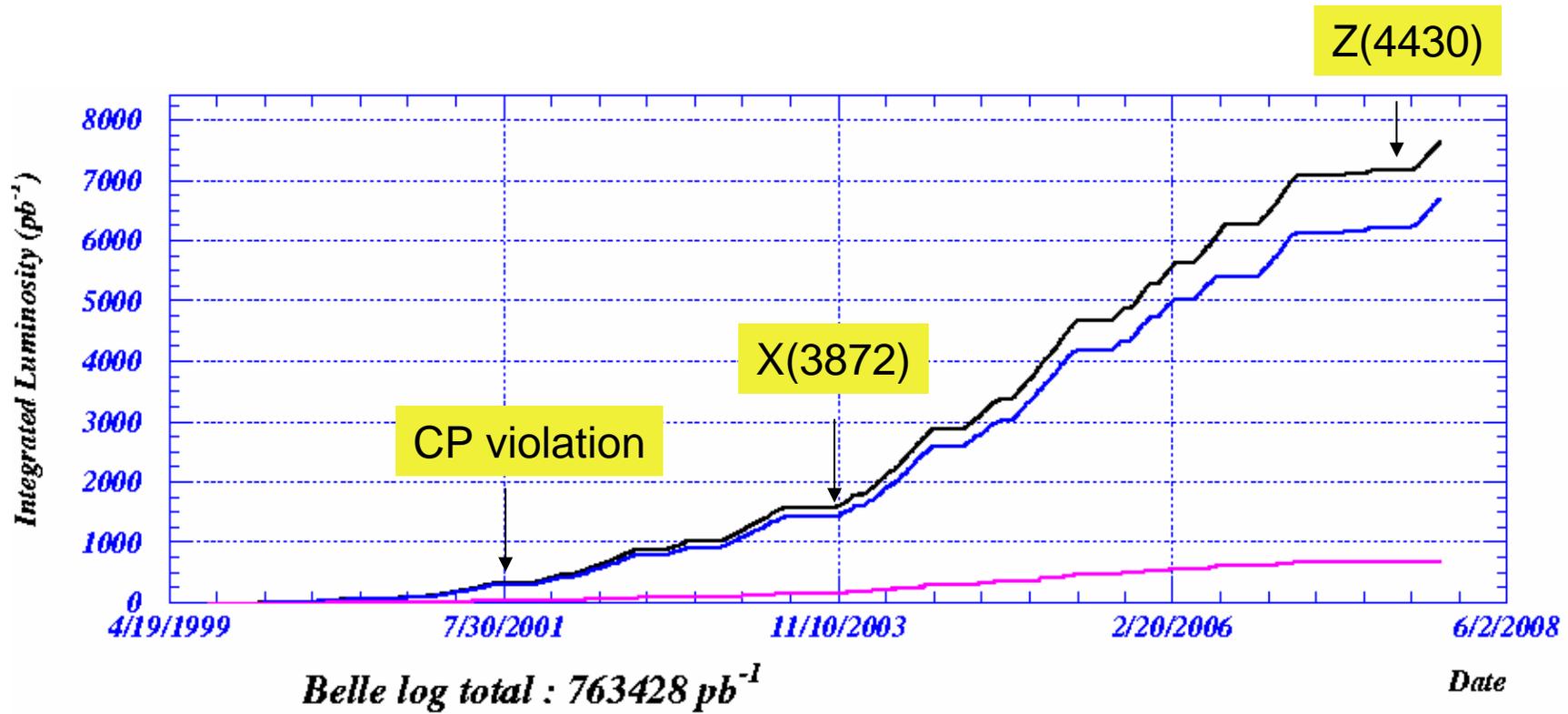
その他:

e^+e^- 消滅からの $c\bar{c}$ 対生成 (2対の場合「ダブルチャーモニウム」もあり)

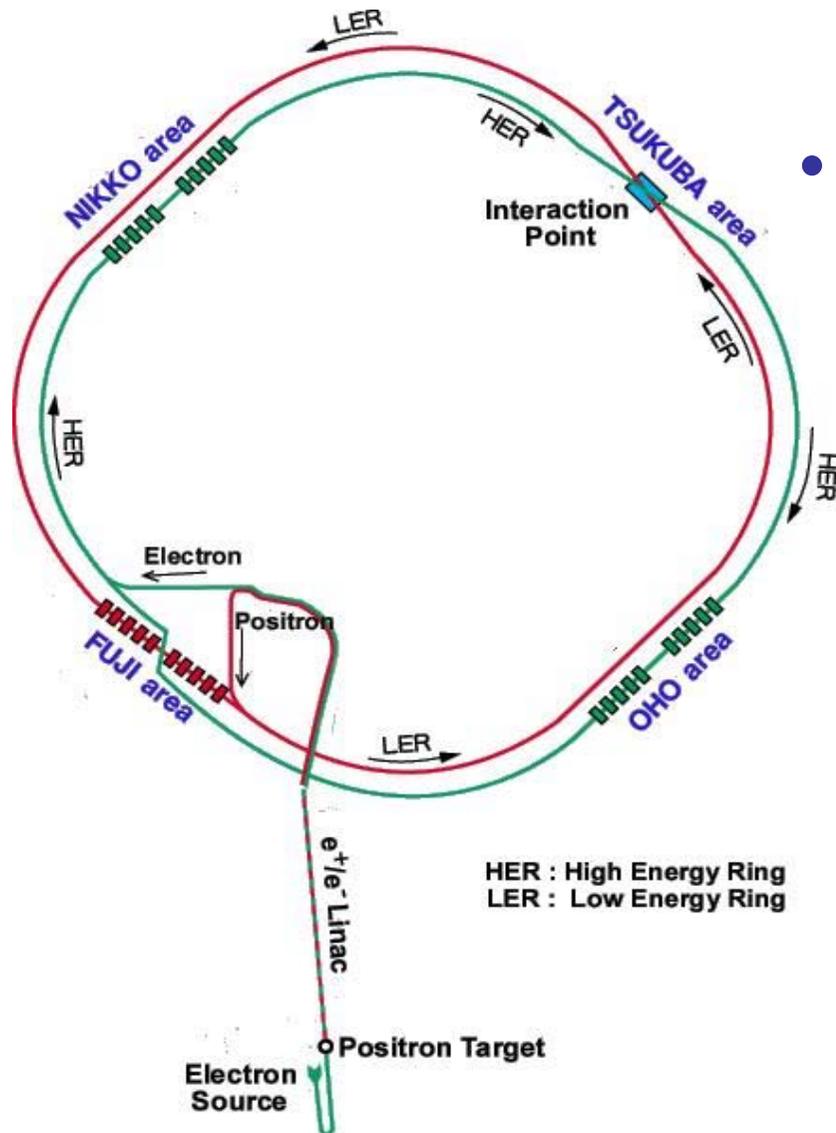
2光子衝突からの $c\bar{c}$ 対生成

(電磁相互作用による生成、パリティ、荷電変換の決定が容易)

KEKB加速器の快進撃

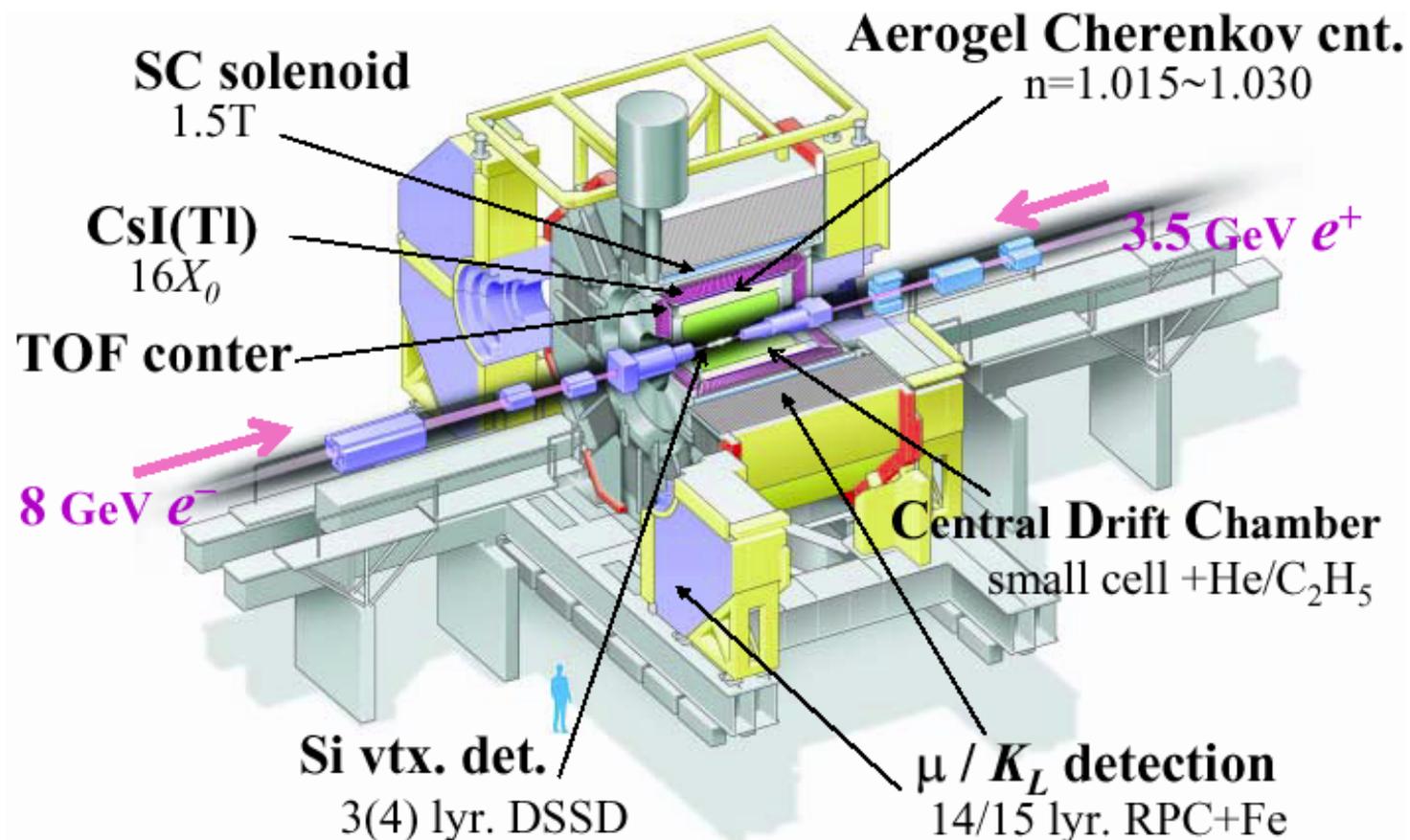


KEKB加速器



- Asymmetric $e^- e^+$ collider
(3 km in circumference)
8 GeV e^- (HER) x 3.5 GeV e^+ (LER)
 $\sqrt{s}=10.58 \text{ GeV} \Leftrightarrow \Upsilon(4S)$
- Beam crossing angle: 22mrad
- Continuous injection
→ $1.2 \text{ fb}^{-1}/\text{day}$
- Luminosity
 $L_{\text{max}}=1.71 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
 $\int L dt \sim 760 \text{ fb}^{-1}$ (by end of 2007)

Belle検出器



エネルギー・運動量の高精度測定

崩壊点位置決定

粒子識別 TOF, Si-aerogel, CDC-dE/dx, RPC for K_L /muon

CDC+Solenid, CsI

Si strips

X(3872)の復習と近況

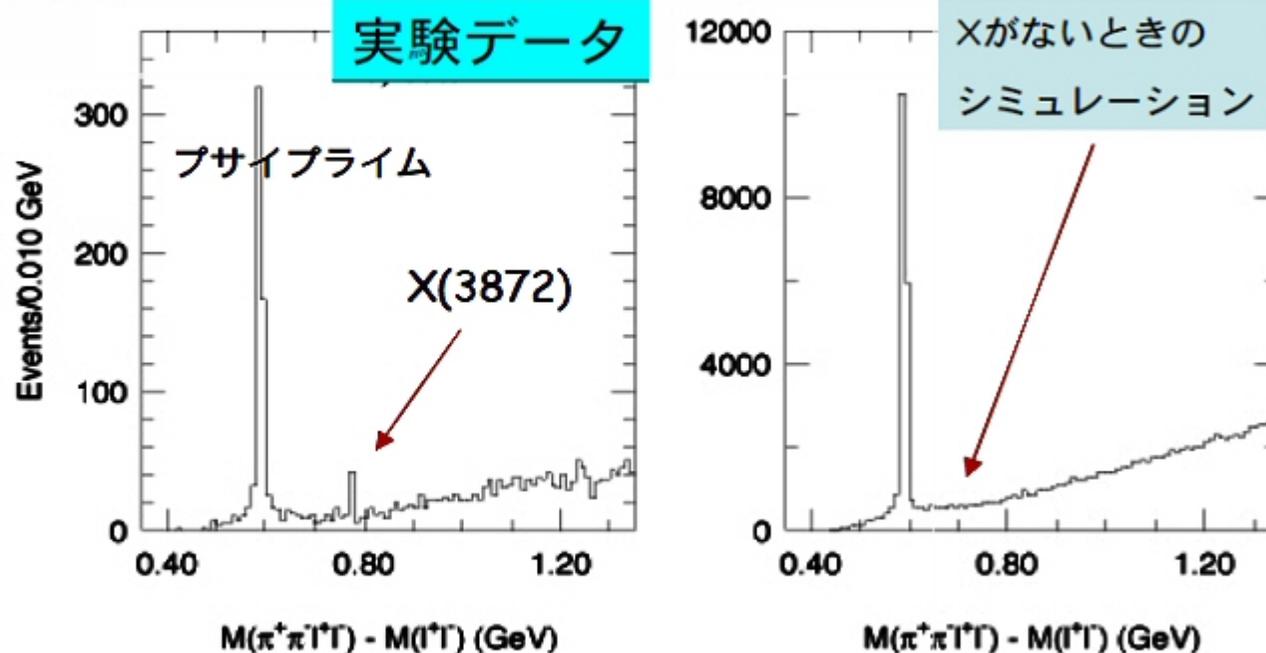
(相原氏のプレスリリース
資料 2003.11 より)

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

質量の正確な決定方法

これまでに、きわめて高い精度で測定されているJ/ψ粒子の質量との差を測る

J/ψ粒子との
質量差の分布
=>



決定された質量の値

$$M_X = 3872.0 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 0.5(\text{syst}) \text{ MeV}/c^2$$

ヘリウム原子と同じくらいの重さ：重い中間子

X(3872)の特徴

- ・電荷無し「隠れたチャーム」である
(質量、Bからの崩壊、崩壊先にJ/ψがある)
- ・崩壊幅が非常に小さい ($\Gamma < 2.3 \text{ MeV}$)
- ・ $D\bar{D}$ を含む状態への崩壊幅が比較的小さい
- ・J/ψγへの分岐比がJ/ψπ⁺π⁻のそれよりもかなり小さい
- ・崩壊でアイソスピン対称性を破っているらしい(π⁺π⁻がρ的(l=1))

あまりチャーモニウムらしくない

- ・D⁰と \bar{D}^{*0} の質量和に極めて近い(実験誤差の範囲内で一致)

PDG2007 (X(3872): $M = 3871.4 \pm 0.6 \text{ MeV}$)

D⁰と \bar{D}^{*0} の質量和: $3871.8 \pm 0.4 \text{ MeV}$)

- ・ $J^{PC} = 1^{++}$ らしい (D⁰と \bar{D}^{*0} のS波状態と一致)
- ・ $D^0\bar{D}^0\pi^0$ への崩壊が見つかった。が、 \bar{D}^{*0} かどうかは不明。
(実験で直接確認するのは難しい) 質量が3MeVほど重い

X(3872)について考察と今後

- 4クォークを含む – $D\bar{D}^*$ の2中間子分子か？
- 異なる崩壊モードにおいて質量、幅を比べる
 $D\pi^0$ と $D\gamma$ の分岐比の比を D^{*0} と比べる
- その他、理論の予言と比べる

現在も研究続行中

ふつうのチャーモニウムではおそらくない。
でも、 $\chi_{c1}(2P)$ である可能性は残っている。

2中間子分子らしい。
でも、渾然一体のテトラクォークかも知れない

おもしろい重要な粒子

Z(4430)の発見

$$B \rightarrow Z(4430)K, \quad Z(4430) \rightarrow \psi' \pi^\pm$$

(B, Kは荷電と中性の両方)

$$\psi' \equiv \psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-, \quad l^+ l^-$$

ψ' は幅が大変狭いので、これの識別・再構成には問題ない

親のBの再構成と選別

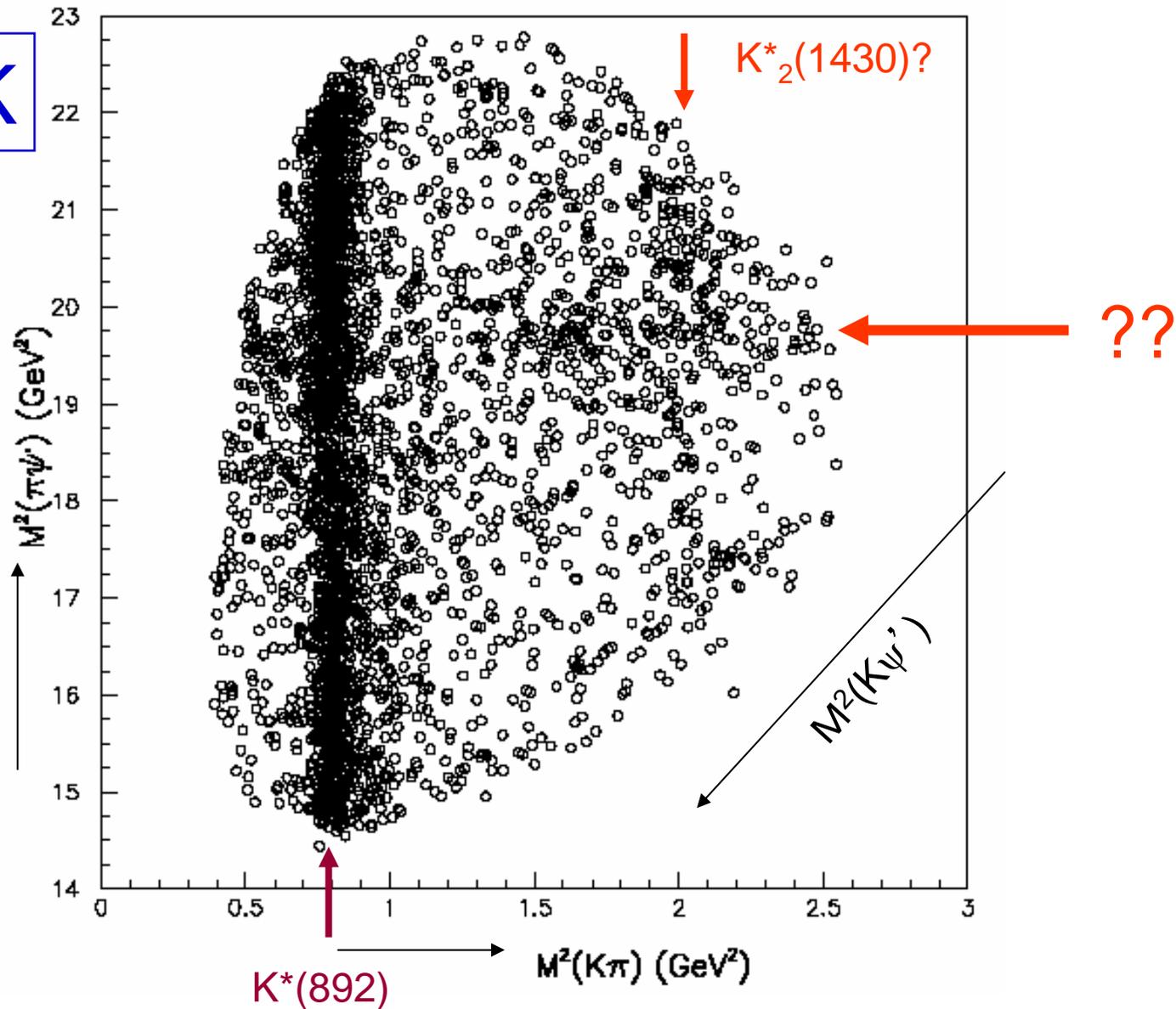
$$B \rightarrow \psi' \pi^\pm K$$

エネルギー： 重心系でビームエネルギーと同じ

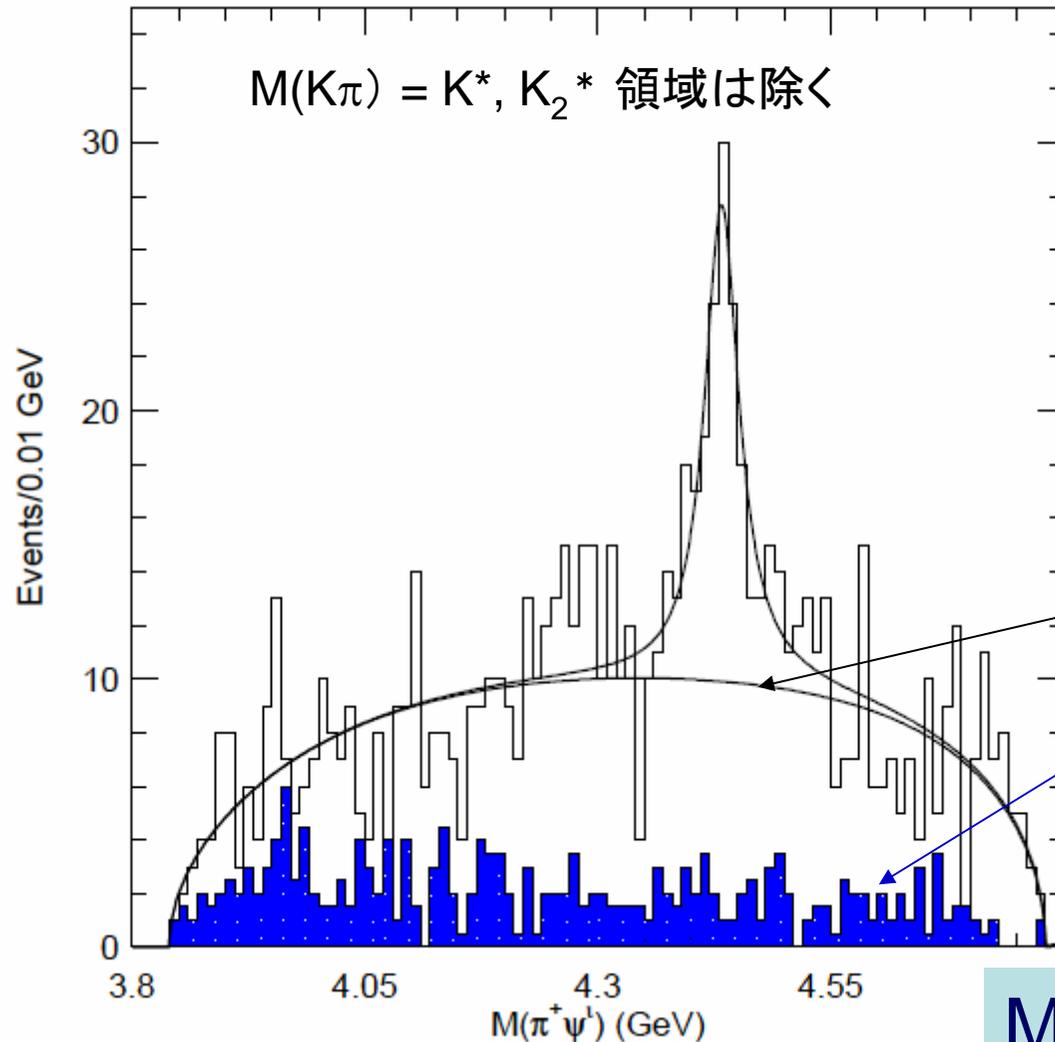
質量： 知られているB中間子の質量と同じ

3体崩壊といえばDalitzプロット

$\psi' \pi^\pm K$



Z(4430)の発見と測定結果



$M(\psi' \pi)$ に明瞭で鋭いピーク
 6.5σ

$K\pi$ 共鳴の干渉では説明できない
観測された幅が知られている
 $K\pi$ 共鳴の幅と同程度かそれ以下

Phase-space like component (fit)

Non-B中間子 起源の
バックグラウンド (sideband)

$$M = 4433 \pm 4 \pm 1 \text{ MeV}/c^2$$
$$\Gamma = 44 \pm^{17}_{13} \pm^{30}_{11} \text{ MeV}$$

Z(4430)の特徴

- 電荷のある隠れたチャーム

これが粒子なら「4クォークを含むこと」が確定

- ψ' π への分岐比が比較的大きい and/or
B中間子からの崩壊生成が小さくない

$$B(\bar{B}^0 \rightarrow K^- Z^+(4430)) \times B(Z^+(4430) \rightarrow \pi^+ \psi') = (4.1 \pm 1.0 \pm 1.4) \times 10^{-5}$$

$$\text{cf. } B(B \rightarrow K \psi') = \sim 6 \times 10^{-4}$$

- $D^* \bar{D}_1(2420)$ の質量和にきわめて近い

(和 = 4430, $4432 \pm 3 \text{ MeV}/c^2$)

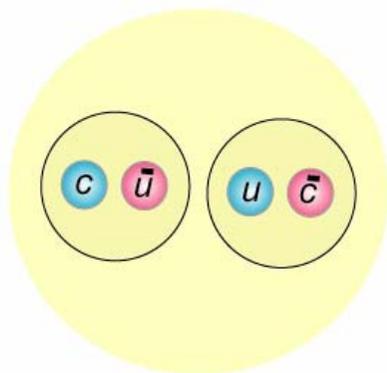
崩壊幅も似ている ($\Gamma(D_1) = 20, 25 \text{ MeV}$)

- スピン・パリティは不明。 Gパリティの固有状態ならG=+

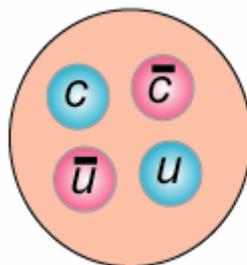
Z(4430)の今後の課題

- J/ψ, ψ(3770)などに崩壊しないのか
- スピン・パリティの決定
- 他の崩壊過程
- 他の生成過程
- 中性のアイソスピンパートナー
($\pi^0\psi'$ で見えればC=-1)

2中間子分子とテトラクォーク

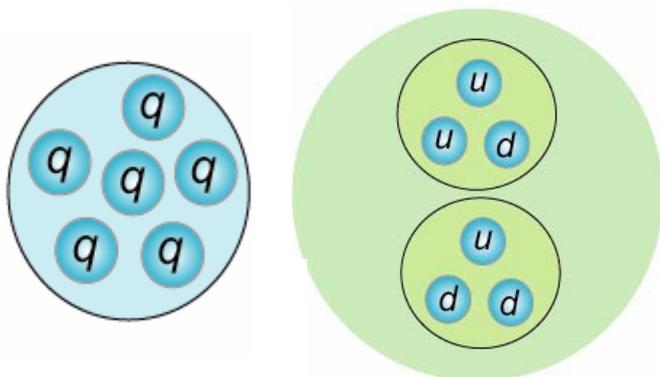


と



の区別ができるか？
の区別に意味があるか？

重陽子はダイバリオンの一種か？



まさか、そんなことはないだろう。
重陽子は、陽子と中性子の「分子」

区別に意味はある

「分子」説なら
結合エネルギーが小さい
引力が働く

「渾然一体＝テトラクォーク」説
モデル計算に頼る

理論による検討

「分子」説

ポテンシャルの理論の計算は可能だが、すぐに信頼できる答えが得られるわけではない。

でも、質量が近いので、とにかく現象論的には有力

「テトラクォーク」説

多体なので一般的には計算が難しい

X(3872)とZ(4430)の両方を統一的に説明できる可能性

他の説

バリオンニウム説 ($\Lambda_c \bar{\Sigma}_c$ 状態)

擬粒子 (pseudo-resonance) 状態説

threshold enhancement – 2中間子生成の閾質量近くで

相互作用が強くなる

cusp 効果

– 閾質量近くで散乱振幅が強調される

一般論--理論の予言と実験の戦略

- ・幅と崩壊分岐比の予言はかなり難しい
- ・質量、 J^{PC} の予言は比較的信頼できる
 - (でも予想される状態の数が多いと縛りとしては弱い
 - どれがどれだかわからない。まぐれ当たりも起こりうる)
- ・他の状態の予言
 - まぐれ当たりの可能性を消すためには、

実験的により多くの状態を見つけることが必要
道は遠い、でも今後も発見は続くだろう...

ハイブリッド候補その他

- Y(3940)、Y(4260)などはハイブリッド状態の候補と言われている
- チャームクォークをボトムクォークやストレンジクォークで置き換えた状態の探索研究も始まっている。

まとめ

- **Z(4430)**は、B中間子の崩壊で見つかった電荷のある隠れたチャーム

構成するには 4クォーク を含むことが必要

→ **エキゾティックハドロンの 史上最強の候補**

もし1個のハドロンなら



- **X(3872)**と **Z(4430)** は共通点が多い
でも、質量は大きく違う。量子数も違うかも。
似て非なる物が2つ - 理論による統一的説明に期待