



# Belle II 実験における ハドロン物理



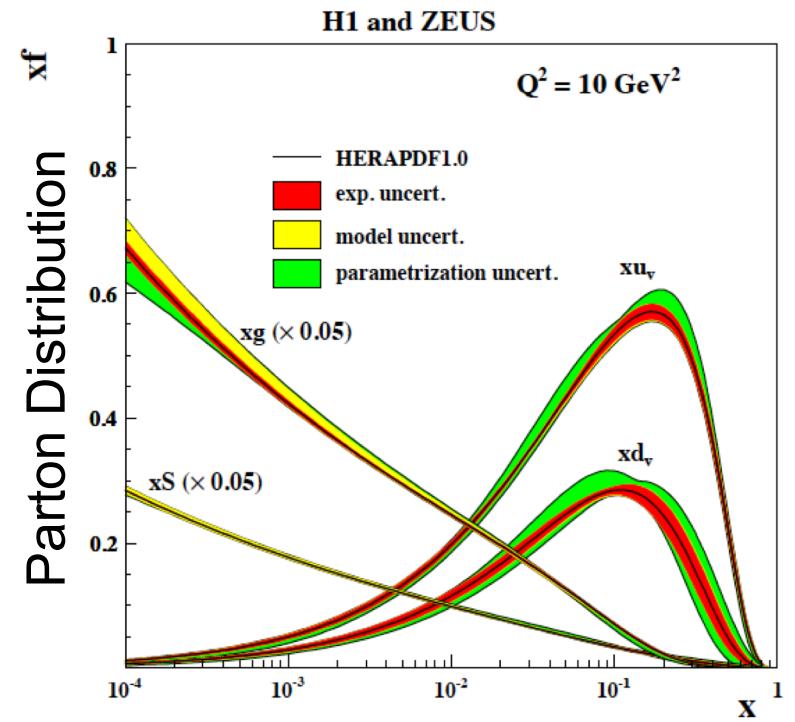
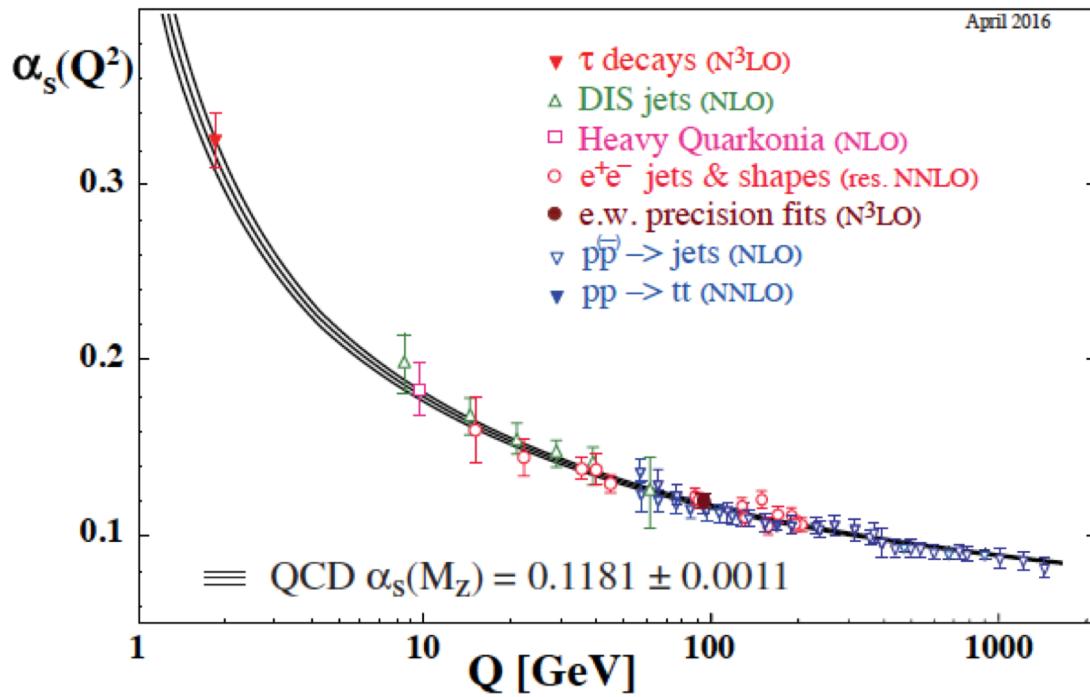
宮林 謙吉

(奈良女子大学)

Flavor Physics Workshop 2018

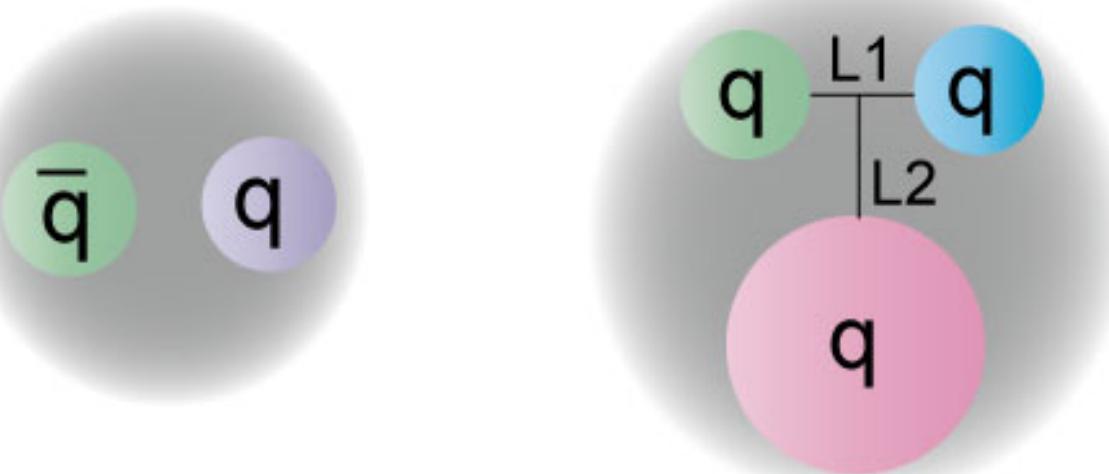
2018 Nov. 1<sup>st</sup>

# 強い相互作用について



わかっていること;  
非可換群SU(3)ゲージ対称性、漸近的自由という性質を持つ。  
結合  $\alpha_s(M_Z^2)=0.12$ 、runningあり、高エネルギーでは摂動論が有効。  
核子はvalence quarkに加え、sea quarkとgluonが内部を満たす。<sup>2</sup>

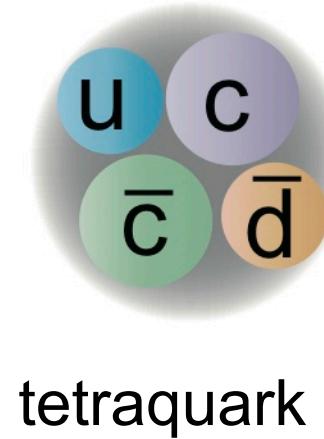
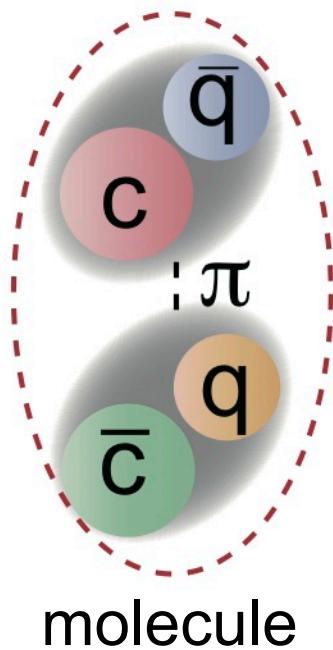
# クオークは単独では出てこない



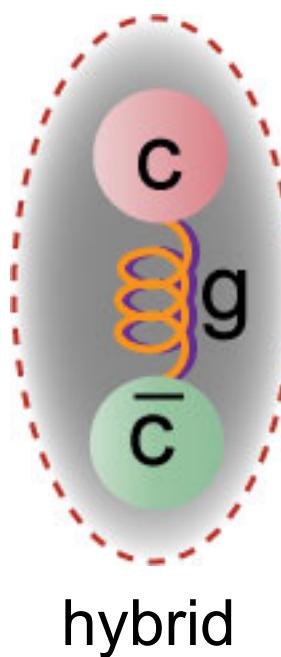
構成子が  
クオーク・反クオークの二体:メソン と クオーク三体:バリオン  
その質量はヒッグス機構がクオークに与えたもとの(裸の)質量に、  
カイラル対称性の自発的破れによる“着膨れ”ぶんが加わっている。

# 他の配位のもの

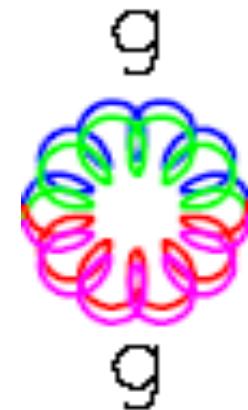
- QCDは“有効自由度”が違うものを禁止していない。



tetraquark



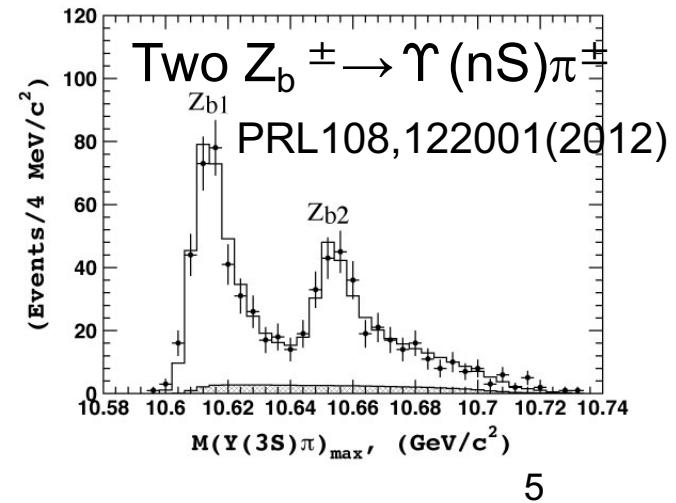
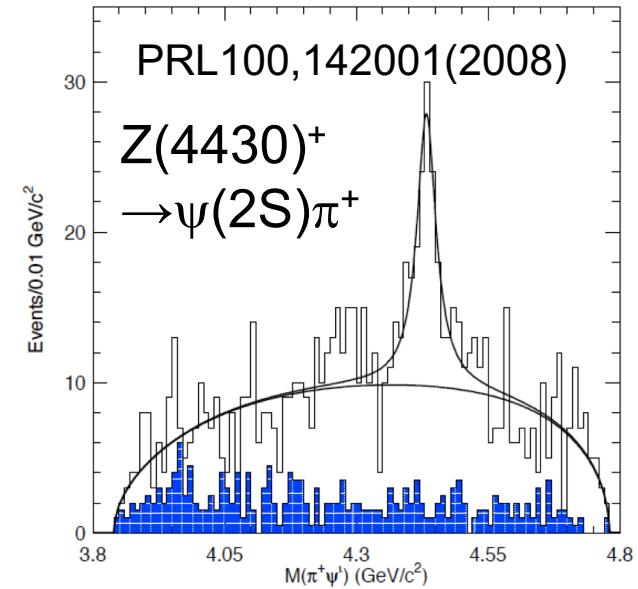
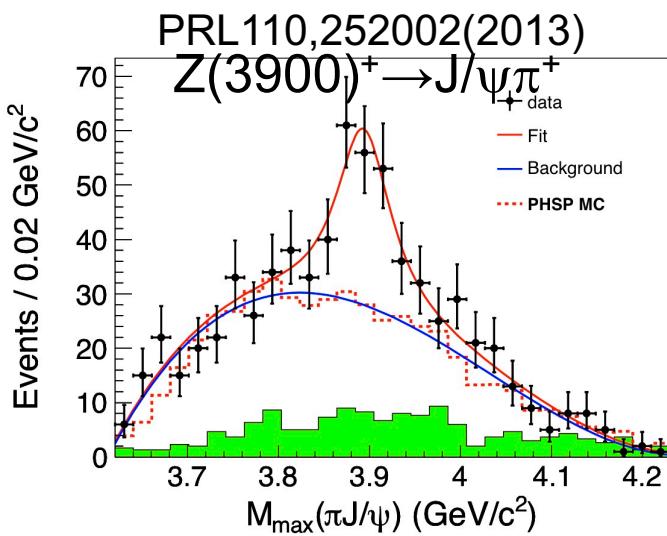
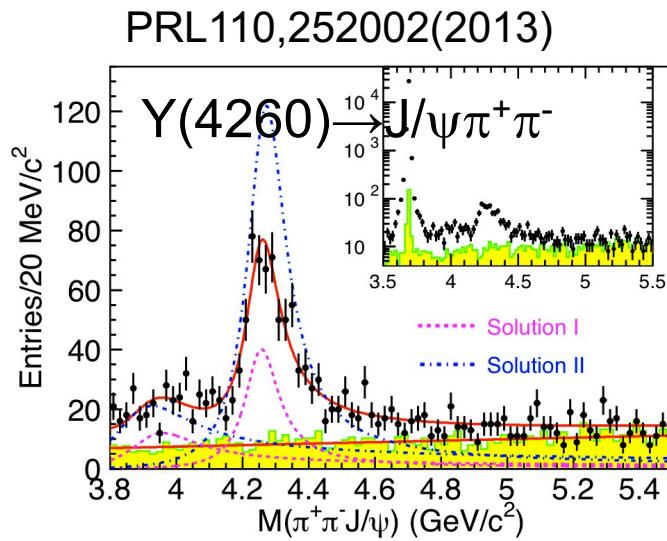
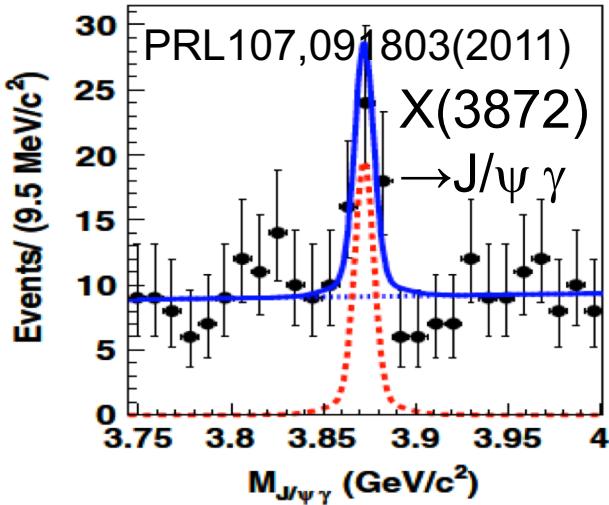
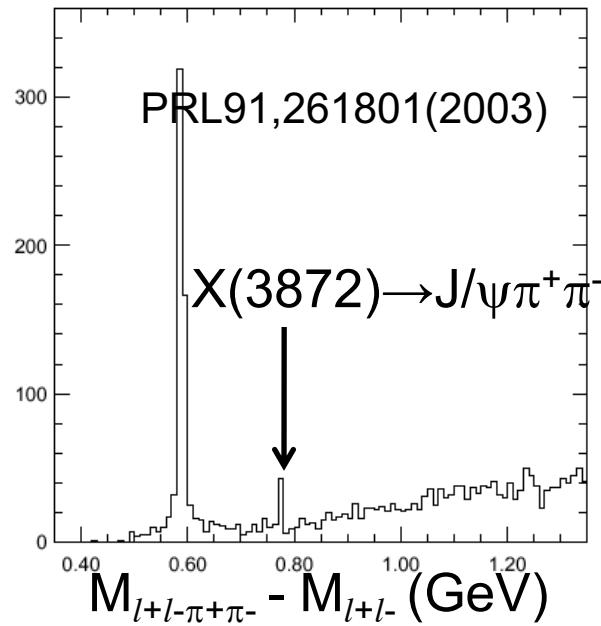
hybrid



glue ball

- 数十年にわたり、メソンとバリオンで説明してきた。
- 非摂動論的領域で、まだ我々が知らないことがある。

# Belle での “XYZ” sensations

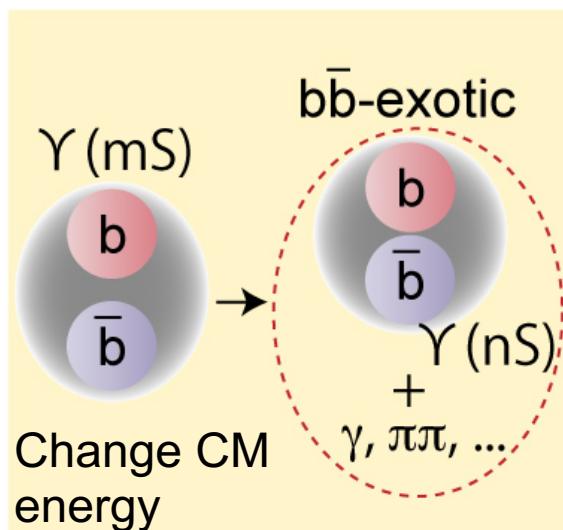
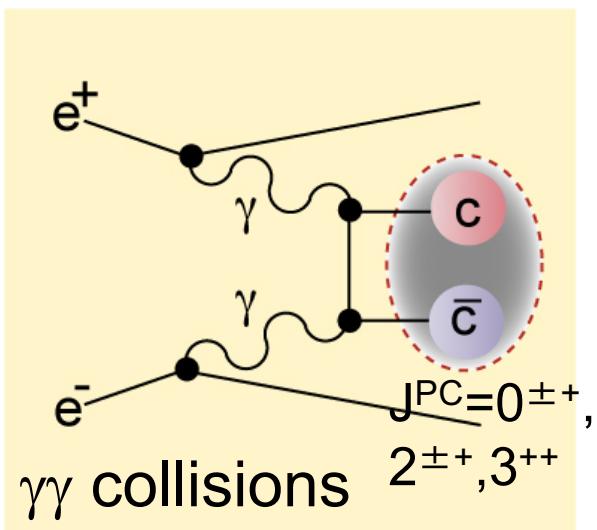
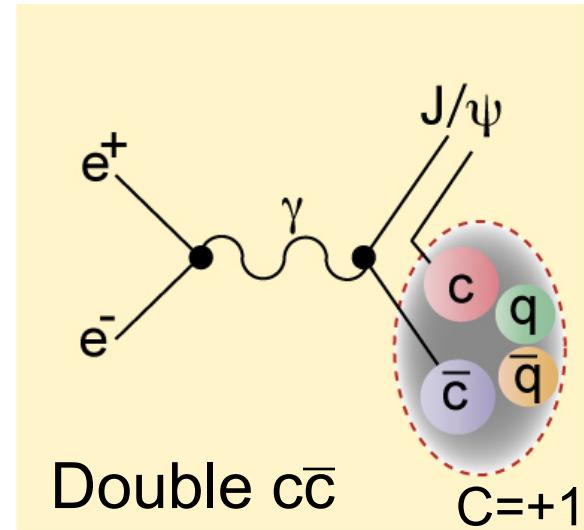
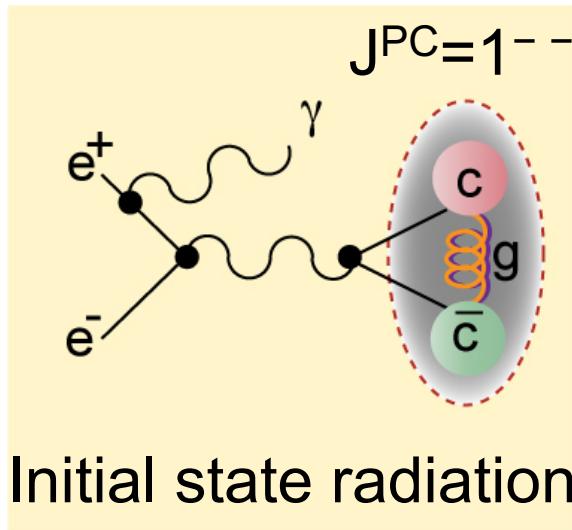
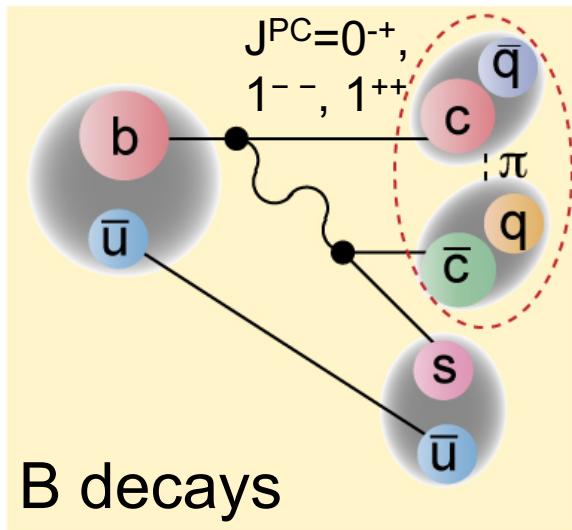


# 何がこれを可能にしたか

この“XYZ”発見の経験では、  
以下の二つの点が重要であった。

- 生成反応のバラエティがある。
  - Each physics process has preferable states.
  - Interplay among several approaches is effective.
- いろいろな崩壊モードを検出する能力がある。
  - Each hypothesis; other decay modes, partner states.
  - Partner states have specific decay modes.

# 生成反応のバラエティ



Allowed/favored quantum numbers are different depending on production processes.

# 大立体角高分解能検出器が必要

$K_L$  and muon detector:

Resistive Plate Counter (barrel outer layers)

Scintillator + WLSF + MPPC (end-caps, inner 2 barrel layers)

EM Calorimeter:

CsI(Tl), waveform sampling (baseline)

electron  
(7GeV)

Beryllium beam pipe  
2cm diameter

Vertex Detector

2 layers DEPFET + 4 layers DSSD

Central Drift Chamber

He(50%):C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(50%), Small cells, long lever arm, fast electronics

Particle Identification

Time-of-Propagation counter (barrel)

Prox. focusing Aerogel RICH (fwd)

positron  
(4GeV)

8 Better or same performance under  $\times 20$  beam background!

# 構成要素としてcやbを含むと

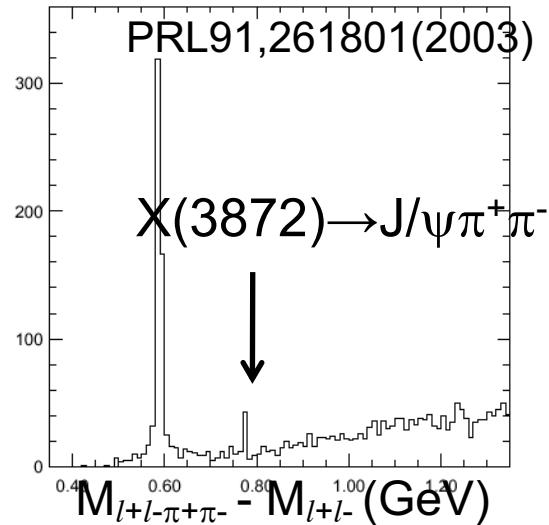
- 軽いフレーバー(u,d,s)たちは混ざるが

例:  $f' = \psi_8 \cos \theta - \psi_1 \sin \theta \rightarrow \eta$        $\psi_8 = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$   
 $f = \psi_8 \sin \theta + \psi_1 \cos \theta \rightarrow \eta'$        $\psi_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$

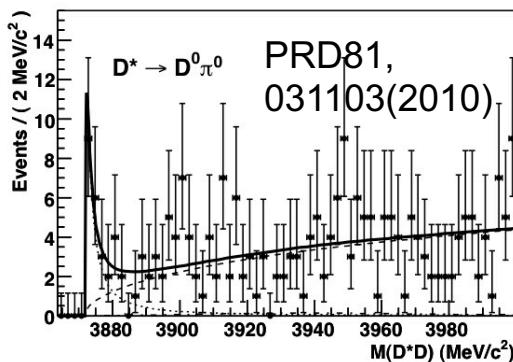
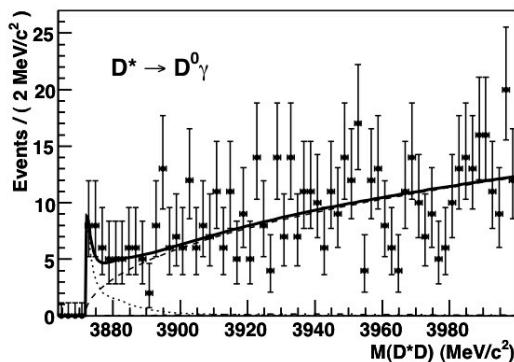
重いクオーク( $M_c \sim 1.5\text{GeV}$ ,  $M_b \sim 5\text{GeV}$ )は  
混ざらない。

→観測された状態と理論的記述がより直接的

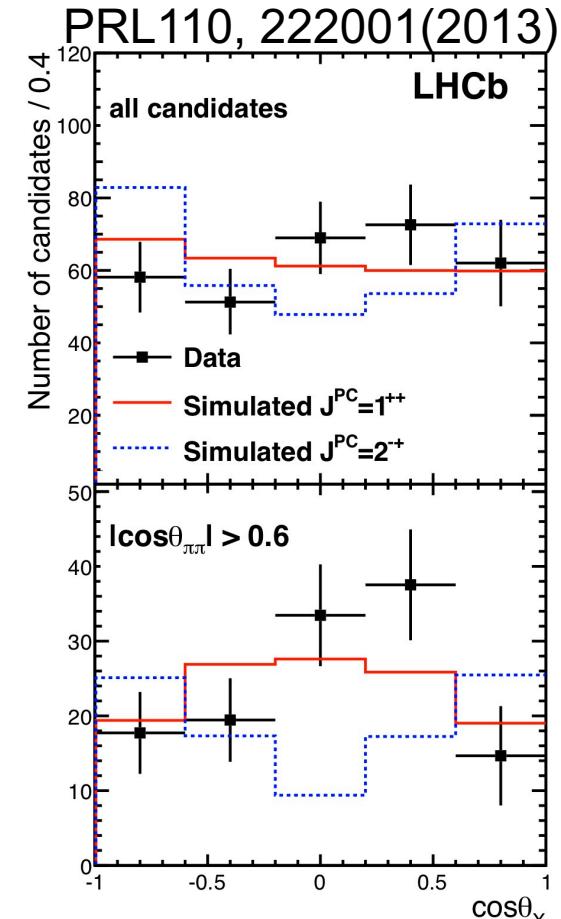
# 最初の衝撃:X(3872)



Dメソン対閾値よりも重いのに、幅が狭くて $J/\psi$ に崩壊するのは異常なこと。



$\text{Br}(X(3872) \rightarrow D^0 \bar{D}^{*0})$  is about  
 $\text{Br}(X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-) \times 10.$



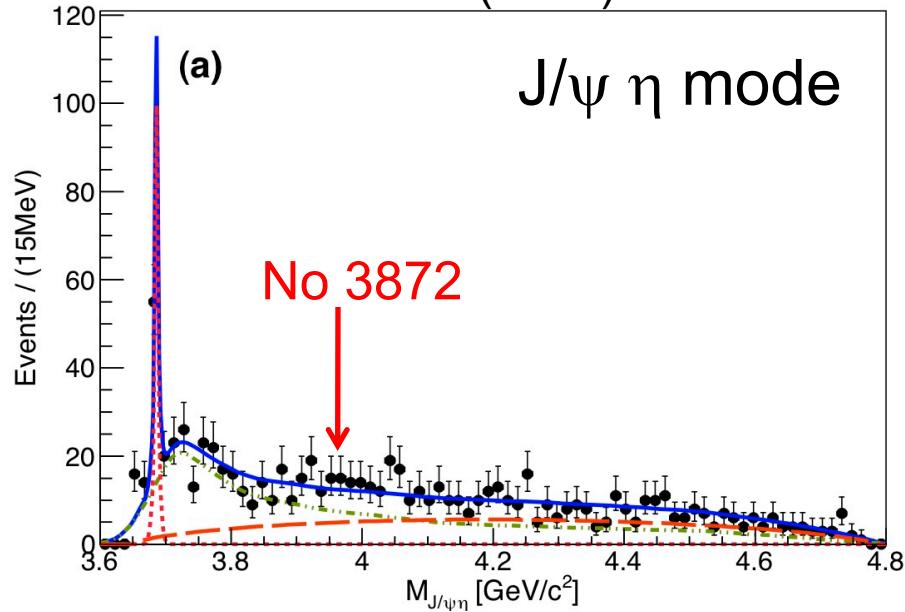
$J^{PC}=1^{++}$  (Belle, BaBar, CDF, LHCb) from  $J/\psi \pi^+ \pi^-$  angular distribution.

# パートナー状態はこれまで未発見

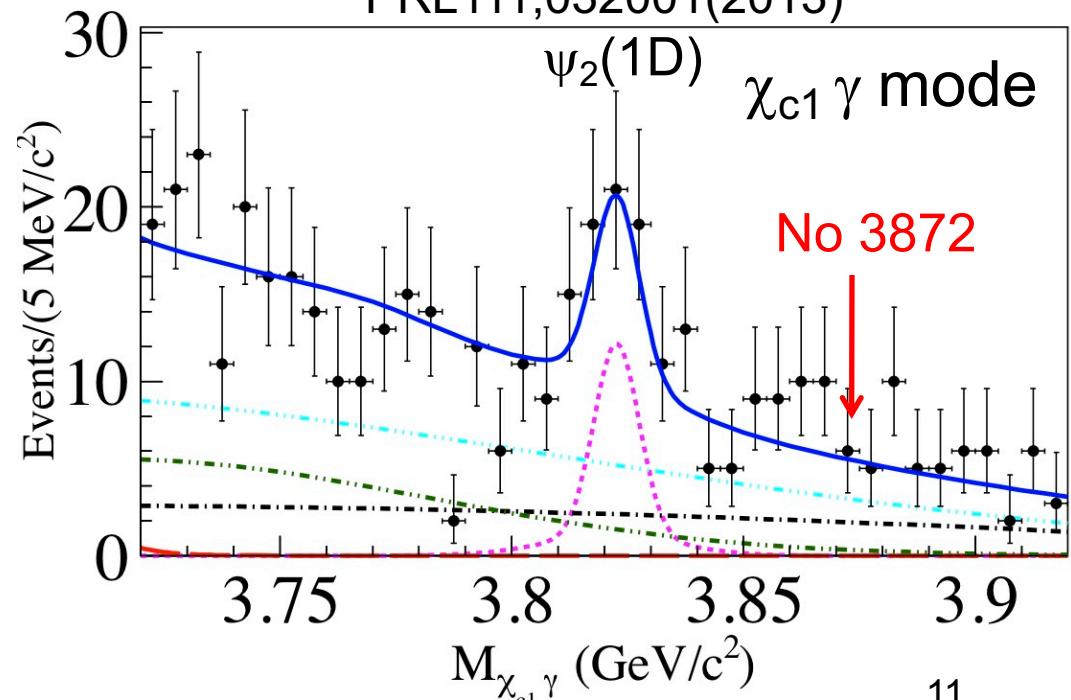
No signature for

- Charged partner in  $J/\psi \pi^+ \pi^0$ .  $\rightarrow$  most likely, isospin=0.
- C=-1 partner in  $J/\psi \eta$  and  $\chi_{c1} \gamma$ .  $\rightarrow$  disfavor tetraquark hypothesis.

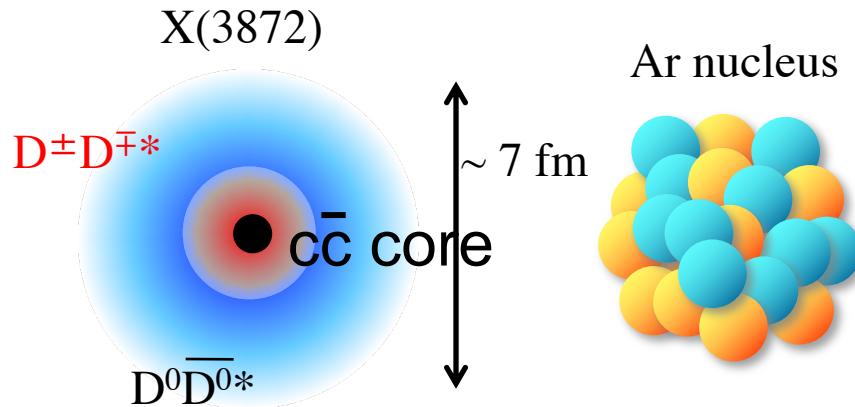
PTEP2014(2014)043C01



PRL111,032001(2013)



# メソン分子と $c\bar{c}$ の混合か



S.Takeuchi, K.Shimizu and M.Takizawa, arXiv:1408.0973

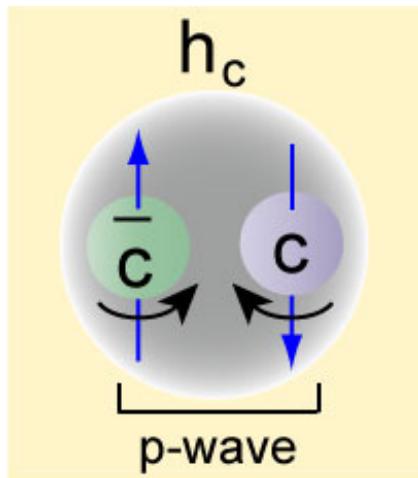
- $D\bar{D}^*$  component is coupled with the same  $J^{PC}$   $c\bar{c}$ ,  $\chi_{c1}(2P)$  (unseen).
- can explain  $Br(X \rightarrow D^0 \bar{D}^{*0})/Br(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)$  is about 10.
- pure molecule is too fragile to be produced in Tevatron/LHC.
- another  $\chi_{c1}(2P)$  dominant state would become broad.

これまでに得て積み上げた知見と無矛盾。  
こうした描像に達したことは当該分野の進歩といえる。

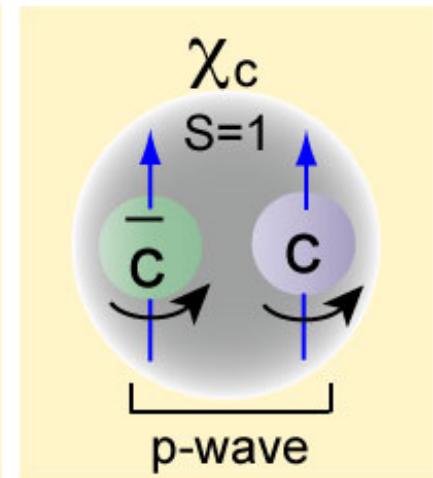
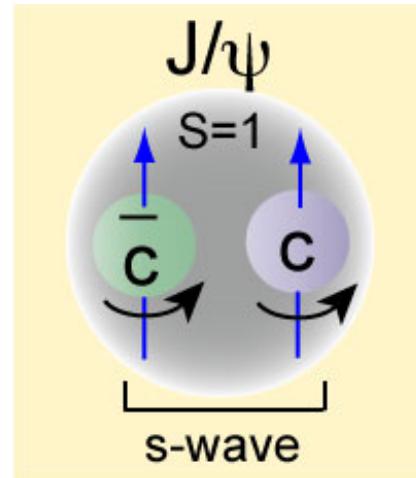
# するとパートナー状態はどんなもの？

If  $X(3872)$  is admixture of molecule and  $\chi_{c1}(2P)$ ,  
its C-odd partner,  $J^{PC}=1^{+-}$  state, is

mixing  
with



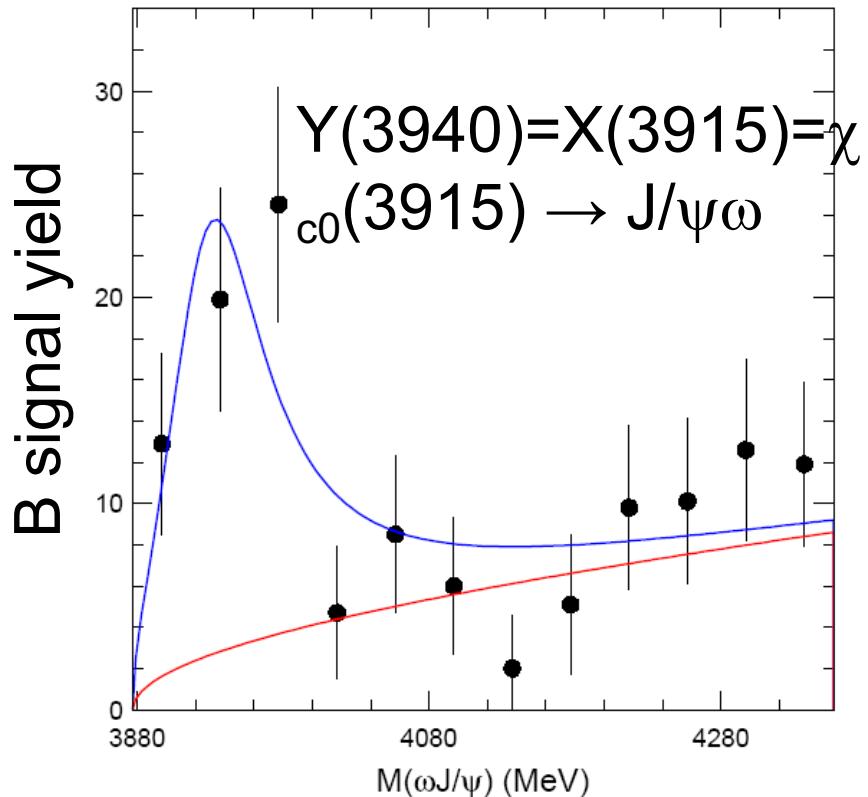
then not  
familiar  
with



この研究に着手しました→皆吉talkを聞いてください。

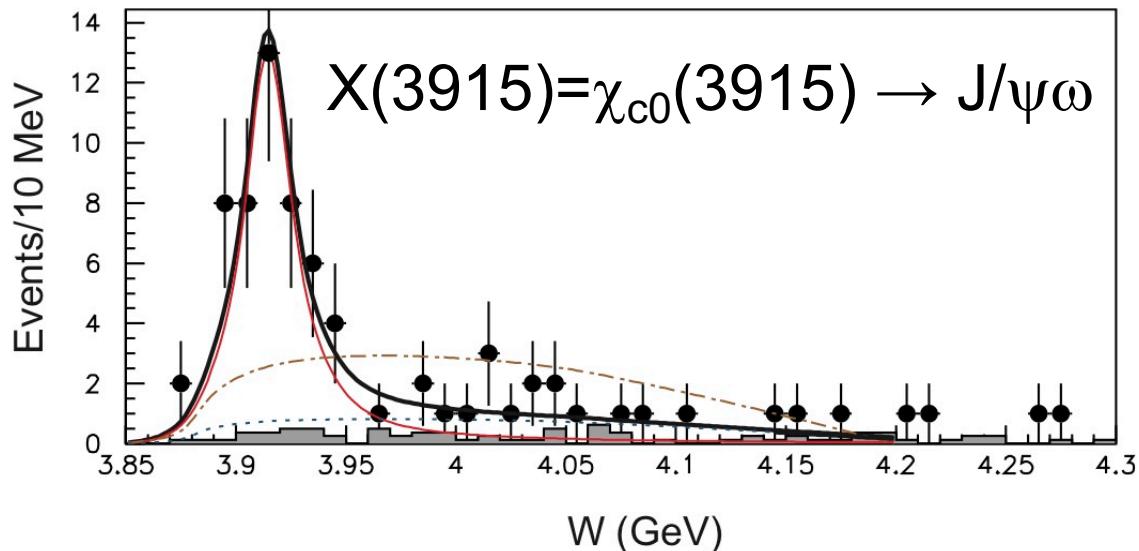
# 生成反応のバラエティ: $Y(3940)=X(3915)$

In  $B^\pm \rightarrow J/\psi \omega K^\pm$  decay



$M=3943 \pm 11(\text{stat}) \pm 13(\text{syst})$  MeV  
 $\Gamma=87 \pm 22(\text{stat}) \pm 36(\text{syst})$  MeV  
 PRL94, 182002(2005)

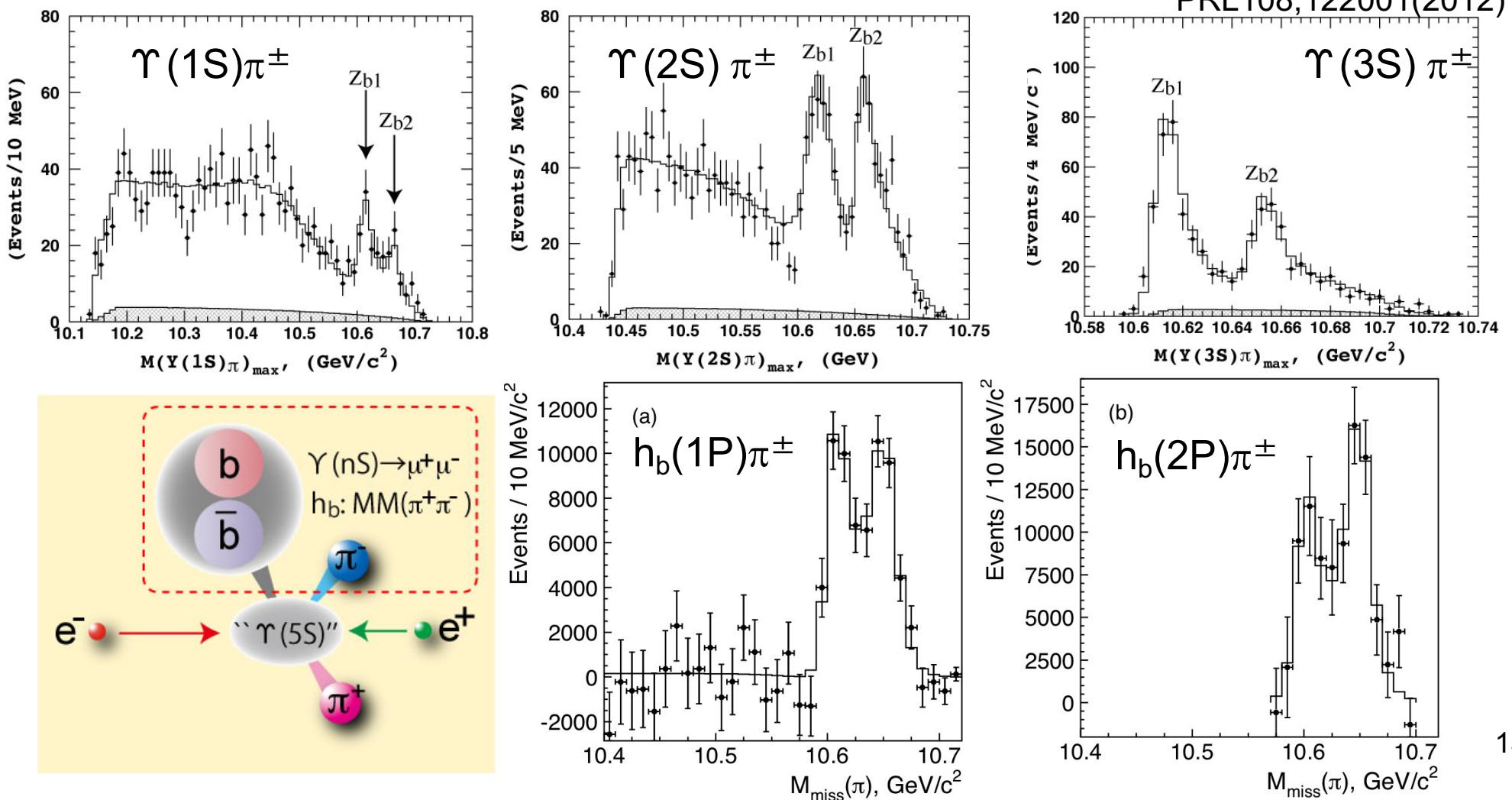
In  $\gamma\gamma \rightarrow J/\psi \omega$  process



$N_{\text{sig}}=49 \pm 14(\text{stat}) \pm 4$  events.  
 $M=3915 \pm 3(\text{stat}) \pm 2(\text{syst})$  MeV,  
 $\Gamma=17 \pm 10(\text{stat}) \pm 3(\text{syst})$  MeV  
 $J^{PC}$  not yet determined.

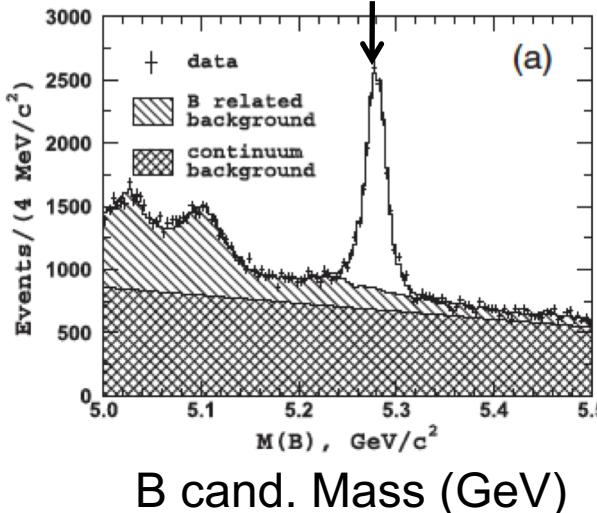
(still need confirmation for PDG interpretation)

# 二つの電荷あり $b\bar{b}$ 似状態 $Z_b(10610)^+$ and $Z_b(10650)^+$

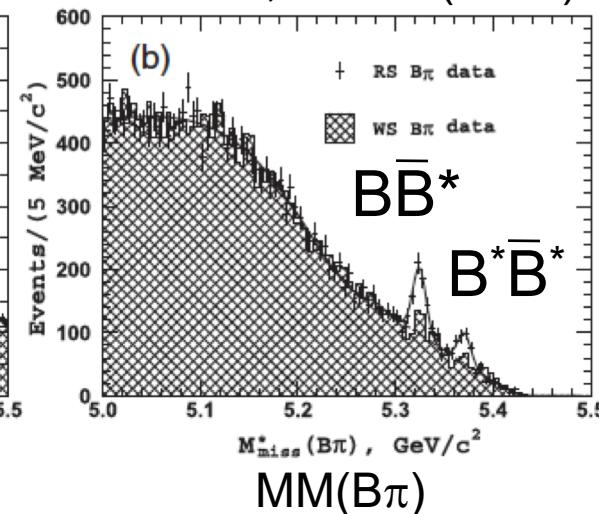


$$Z_b(10610)^\pm \rightarrow \bar{B}\bar{B}^*, Z_b(10650)^\pm \rightarrow \bar{B}^*\bar{B}^*$$

One B  
reconstructed



PRL116,212001(2016)

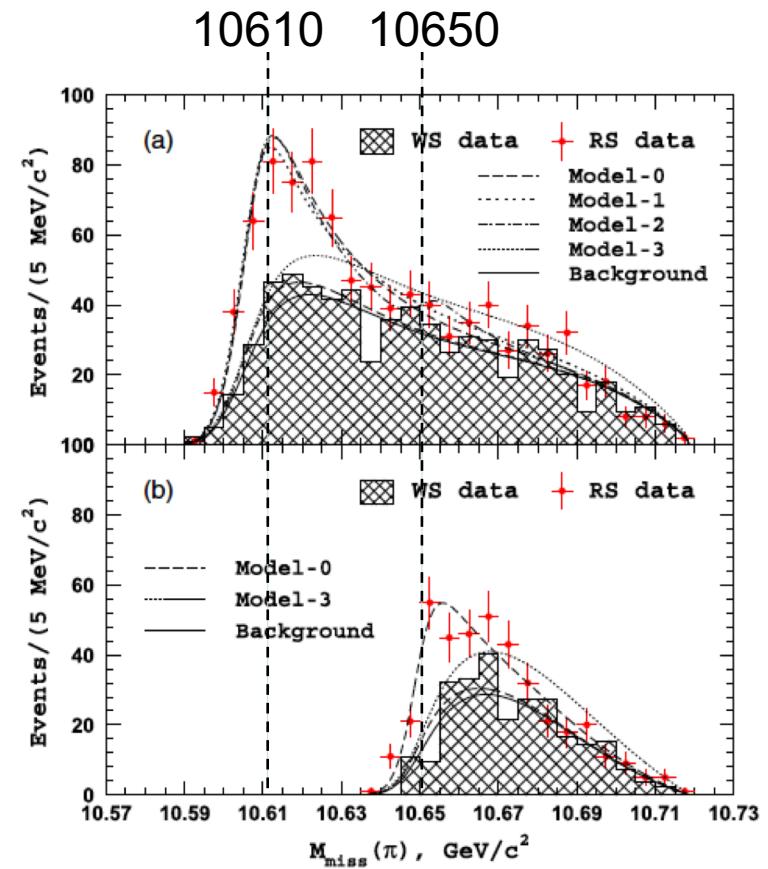


B cand. Mass (GeV)

$$\frac{\text{Br}(Z_b(10610)^\pm \rightarrow \bar{B}\bar{B}^*)}{\text{Br}(Z_b(10610)^\pm \rightarrow \bar{b}\bar{b})} = 5.93 + 0.99/-0.59 + 1.01/-0.73$$

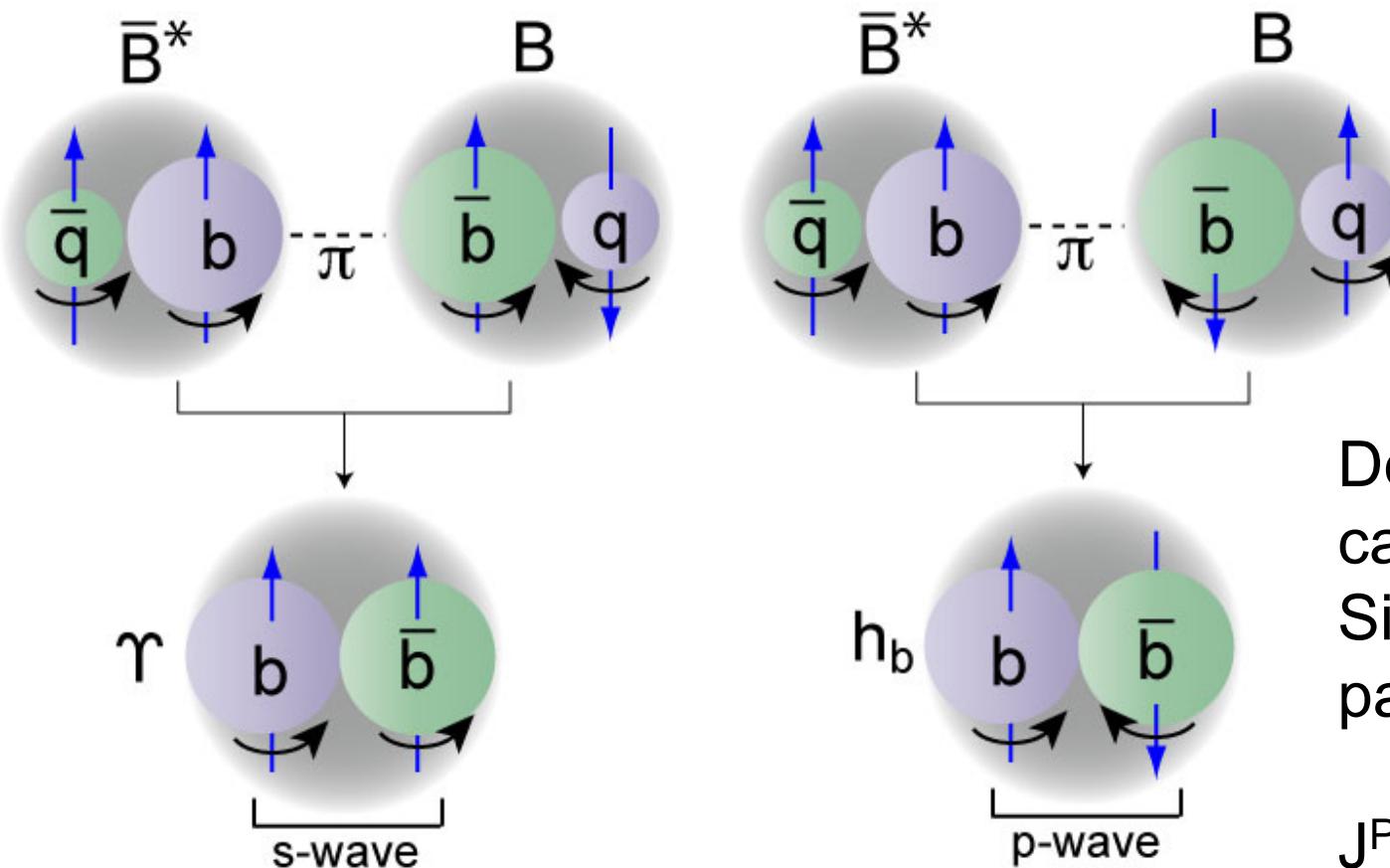
$$\frac{\text{Br}(Z_b(10650)^\pm \rightarrow \bar{B}^*\bar{B}^*)}{\text{Br}(Z_b(10650)^\pm \rightarrow \bar{b}\bar{b})} = 2.80 + 0.69/-0.40 + 0.54/-0.36$$

支配的な崩壊モードであることがわかった。



$$\text{MM}(\pi) = M(B^{(*)}\bar{B}^*)$$

# メソン分子でよく説明できる



A.E.Bondar et al., PRD84,054010(2011)

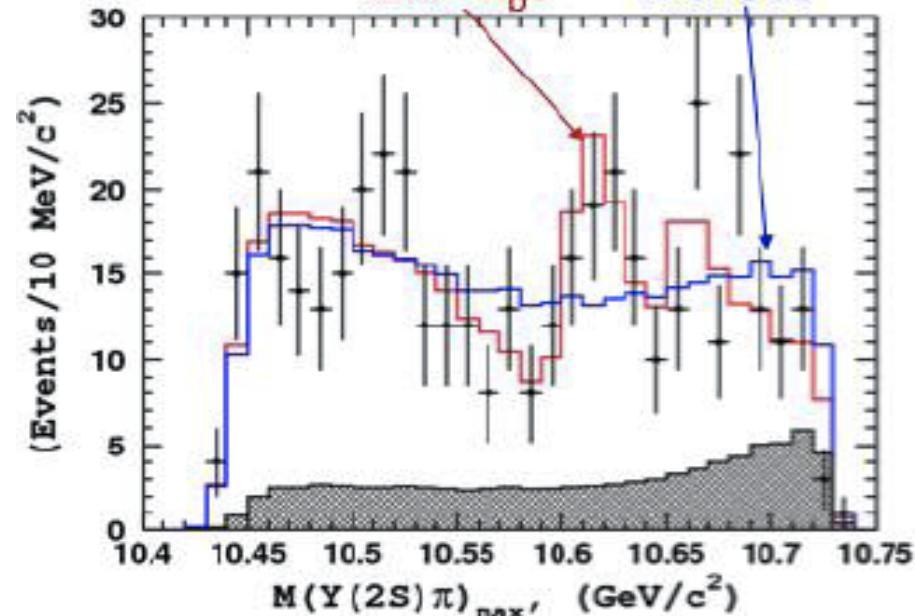
Decays to  $\gamma$  and  $h_b$   
can co-exist.  
Signature in  $\bar{B}^*B^{(*)}$   
partial recon. seen.

$J^P=1^+$  is supported  
by Dalitz analysis.  
PRD91,072003(2015).

# 中性パートナーも発見された

PRD88, 052016 (2013)

with  $Z_b$ s without



$Z_b(10610)^0 \rightarrow \Upsilon(2S)\pi^0\pi^0$  seen  
6.5 $\sigma$  stat. significance

$|G=1^+$ , first isospin partner among "XYZ".

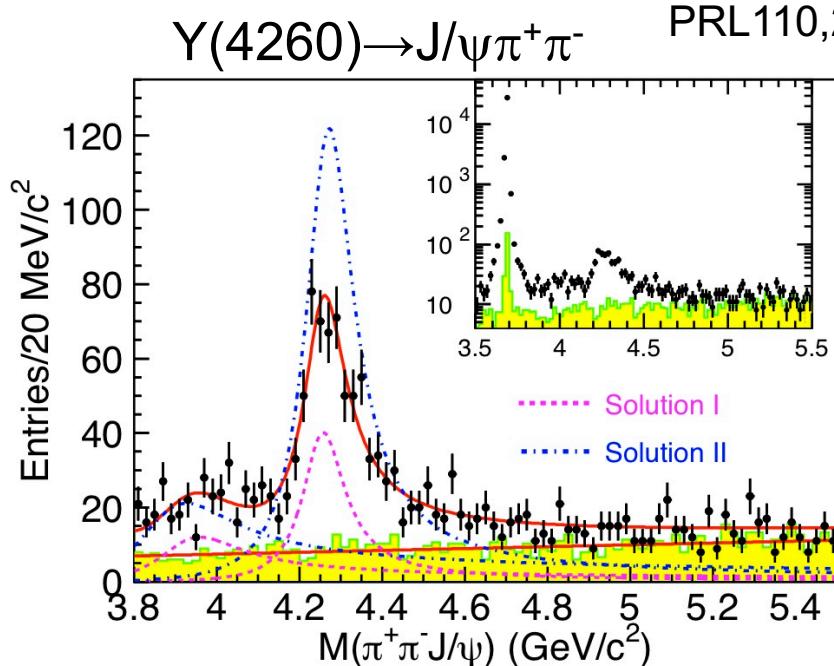
- Partners may decay into  $\chi_{bJ}$  (PRD86,014004(2012)).
  - $Z_b \rightarrow \chi_{bJ} \pi, Z_{b0} \rightarrow \chi_{bJ} \gamma$
- $\text{Br}(\chi_{bJ} \rightarrow \Upsilon(1,2,3S)\gamma)$  and  $\gamma$  efficiency are multiplied, signal yield may be lower one order of magnitude.



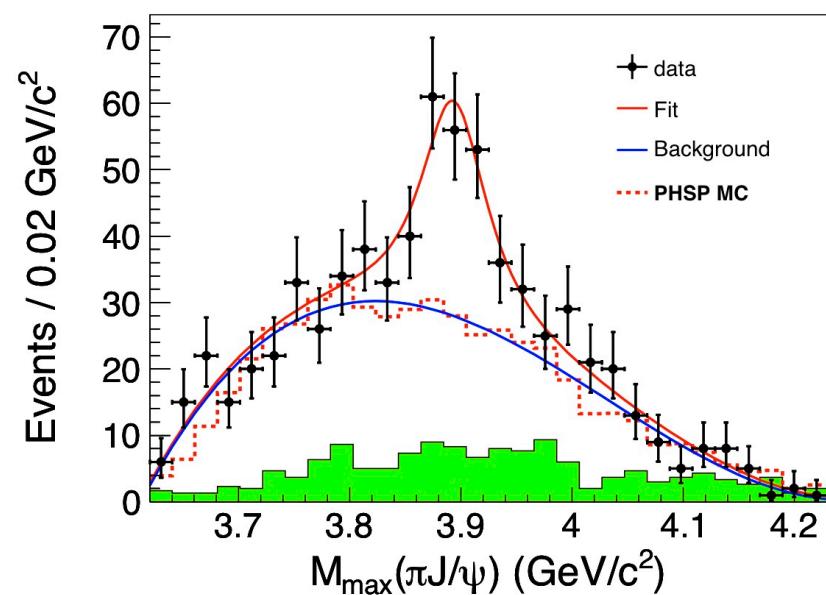
Higher statistics needed.

さらに進めるには Belle II の統計が必要。

# $Z_c(3900)^\pm$ at $Y(4260) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$



PRL110,252002(2013)  $Z(3900)^\pm \rightarrow J/\psi \pi^\pm$



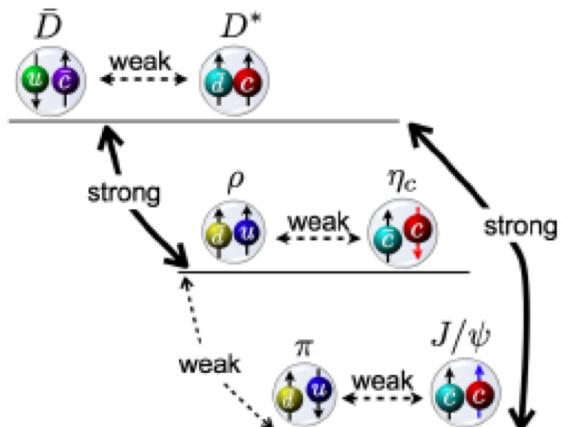
電荷を持つ状態が  $JPC=1^-$  の quarkonium  $\pi^+ \pi^-$  へ崩壊するものの中間状態にできている。

( $Z_c(4060)^\pm$  in  $\psi(2S)\pi^\pm$  at  $Y(4360) \rightarrow \psi(2S)\pi^+ \pi^-$  も同様)

PRD91,112007(2015)

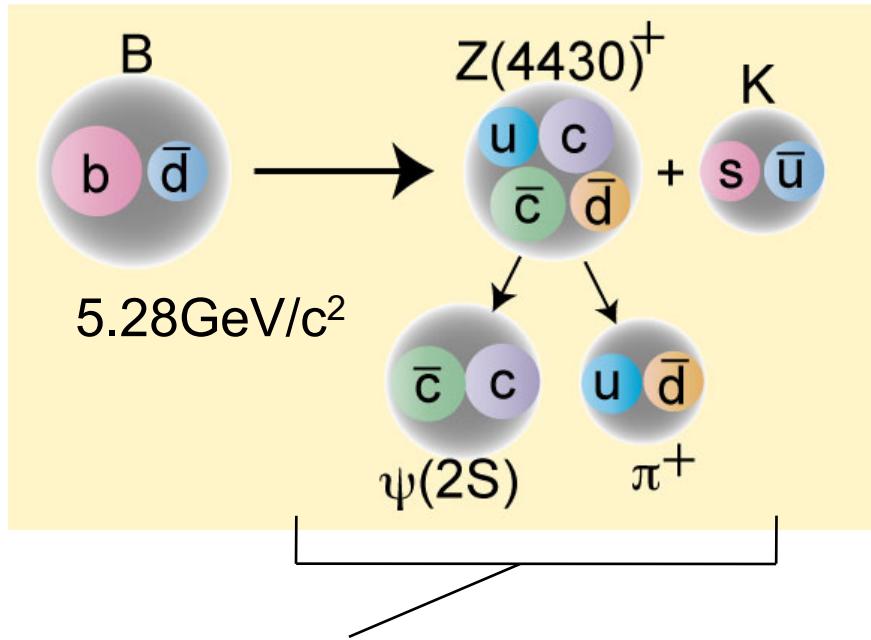
# これらの発見から学んだこと

- The decays of  $J^{PC}=1^-$  states above open charm/bottom threshold contain charged state(s).
  - $Y(4260) \rightarrow Z_c(3900)^+ \pi^-$
  - $\Upsilon(10860) \rightarrow Z_b(10610)^+ \pi^-$  and  $Z_b(10650)^+ \pi^-$
- Near the meson-meson threshold, molecular state plays an important role.



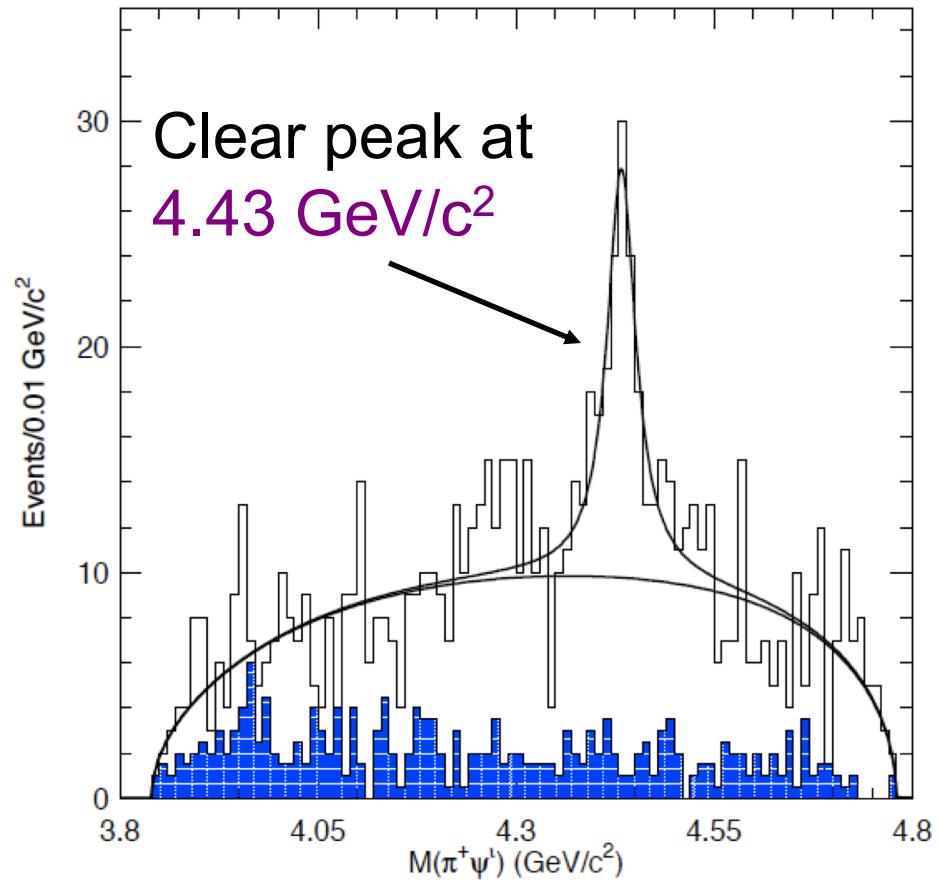
- HAL QCD simulation shows  $Z_c(3900)^\pm$  is likely to be a “threshold cusp”.  
PRL117,242001(2016)

# $Z(4430)^+$ in $\psi(2S)\pi^\pm$ final state



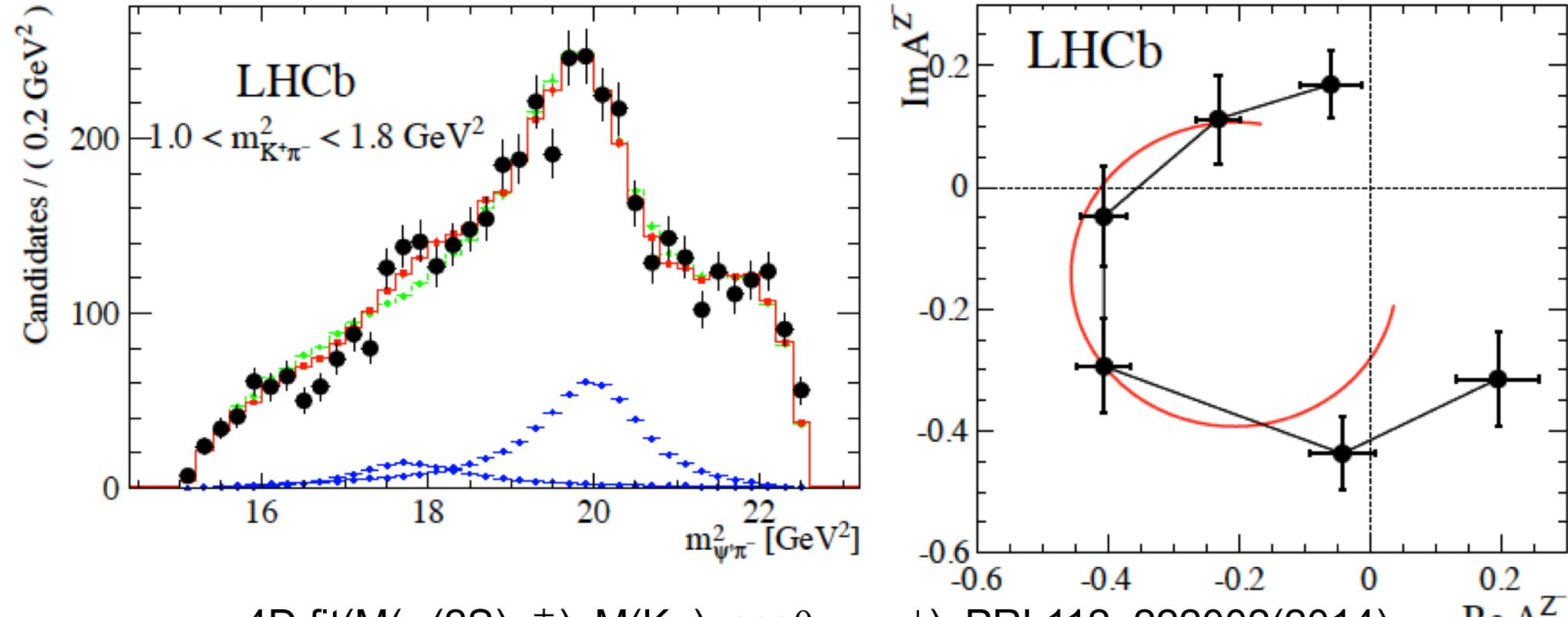
Confirmed by LHCb

PRL112, 222002(2014)



- PRL100, 142001(2008)  
PRD 80, 031104(2009)  
PRD 88, 074026(2013)

# LHCbの統計ではこんなことも



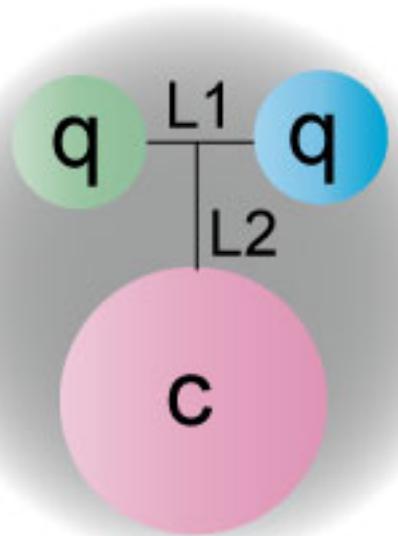
4D fit( $M(\psi(2S)\pi^\pm)$ ,  $M(K\pi)$ ,  $\cos\theta_{\psi(2S)}$ ,  $\phi$ ), PRL112, 222002(2014)  
Argand diagram gives a proof of resonance.

Such approach will be possible to study other states with Belle II statistics only.

# quarkonium(-like) 状態のまとめ

- 閾値付近ではメソン分子が重要な役割を果たす。
  - $X(3872)$  :  $D^0 \overline{D}^{*0}$  and mixing with  $\chi_{c1}(2P)$ .
  - $Z_b(10610)^+$  :  $B \overline{B}^*$ ,  $Z_b(10650)^+$  :  $B^* \overline{B}^*$
- パートナー状態が見出された例は限られている。 $Z_b(10610)^0$  (and  $Z(3900)^0$  in CLEO) so far.
- パートナー状態の探索と発見はもっと統計が必要。
  - 予想される崩壊モードの特性ゆえ
- Argand diagram approach は Belle II の統計が必要。

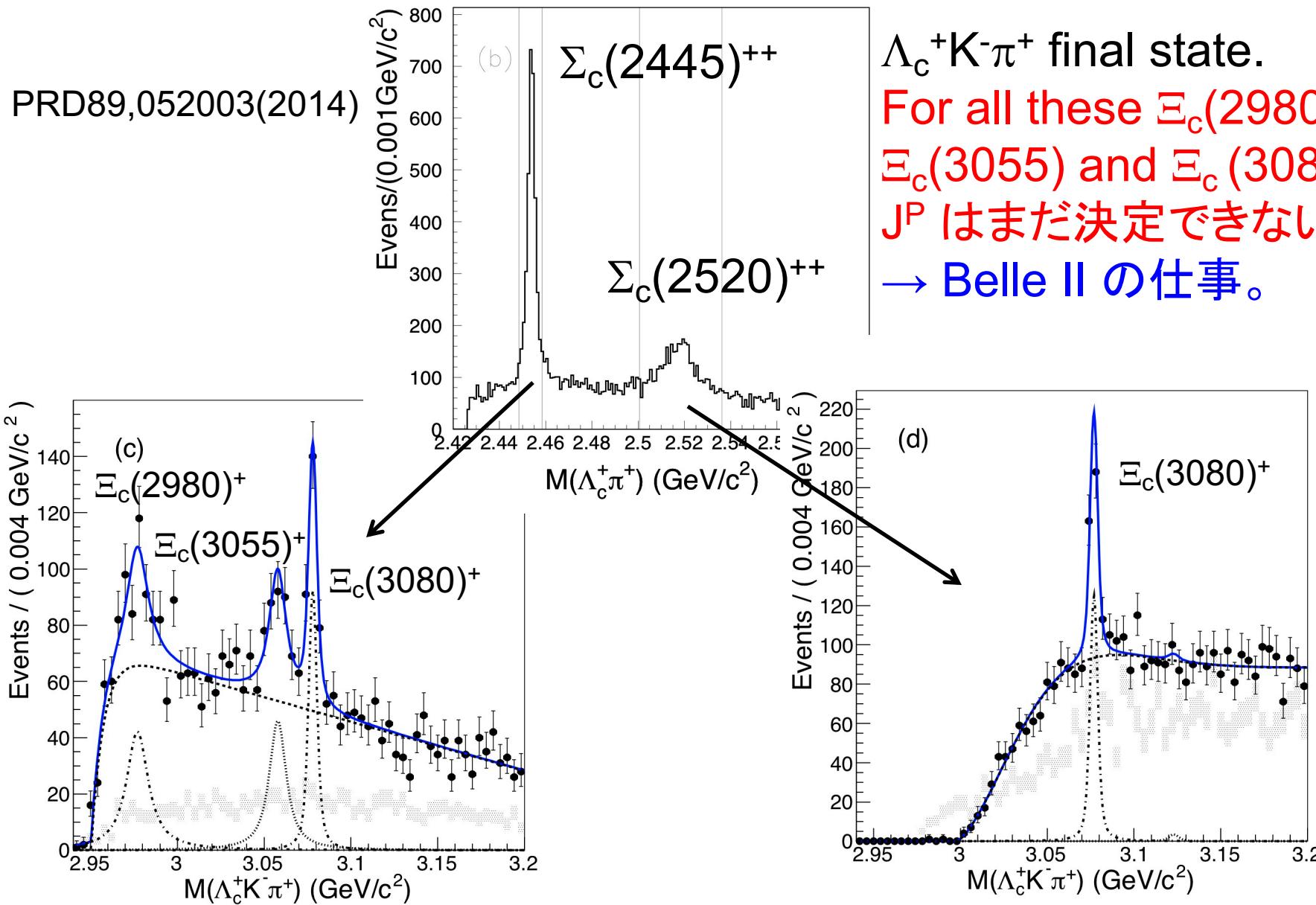
# チャームバリオンと“di-quark”



- Thought to be a good place to check if “di-quarks” is behaving as a good degree of freedom to form hadrons.
- One of the constituent quark is heavy, correlation between the remaining light quarks would become clear.
- $L_1$  :  $\rho$  mode,  $L_2$  :  $\lambda$  mode.

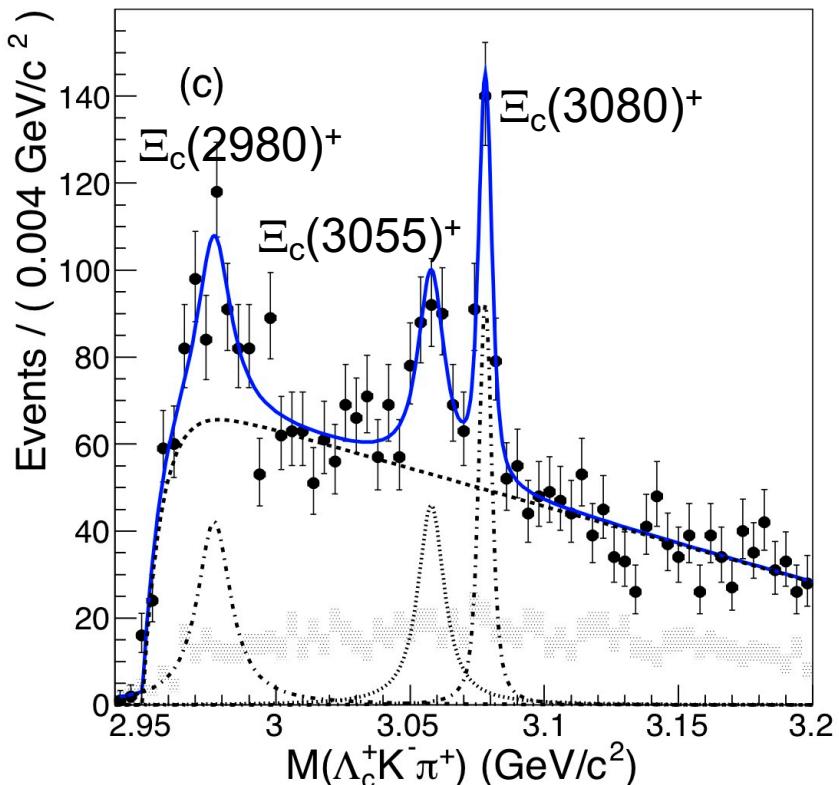
# チャームバリオン励起状態

PRD89,052003(2014)

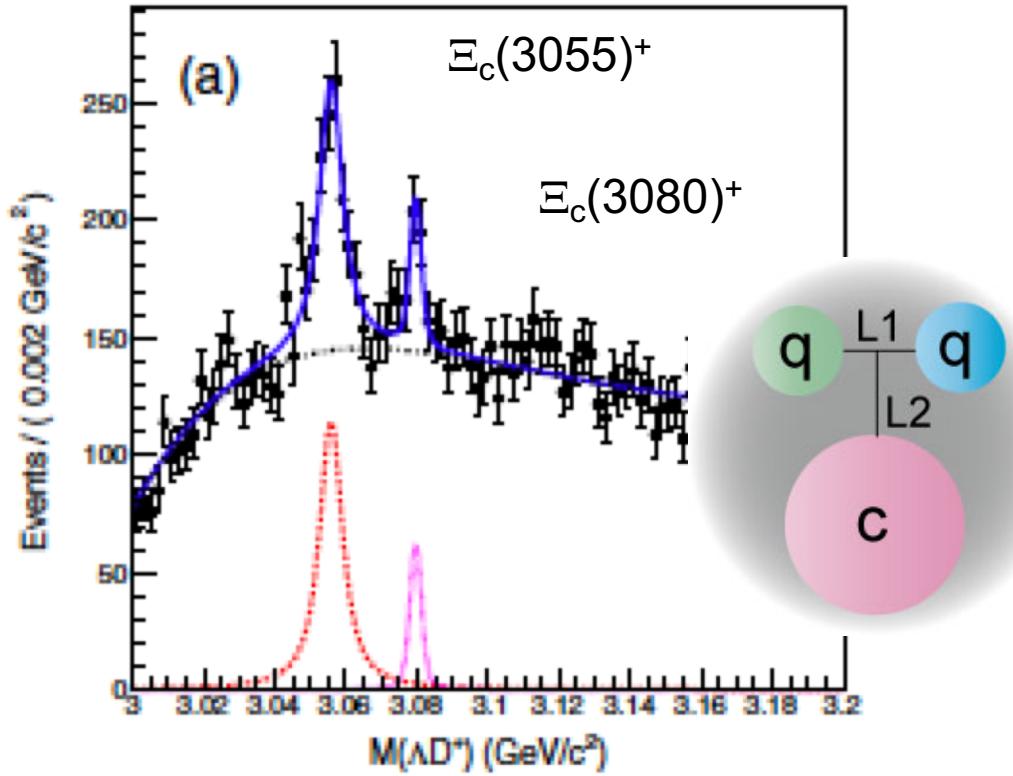


# 複数の崩壊モードで測定

PRD89,052003(2014)



PRD94,032002(2016)



“charm baryon + light hadron” か “charm meson + baryon” か。  
 こうした情報もまだ得られてなかった。  
 $J^P$  決定にはさらに高統計データが必要。

# 競争相手の動向も見ておこう

Doubly charmed baryon,  $\Xi_{cc}^{++}$  unseen in Belle and seen in LHCb.

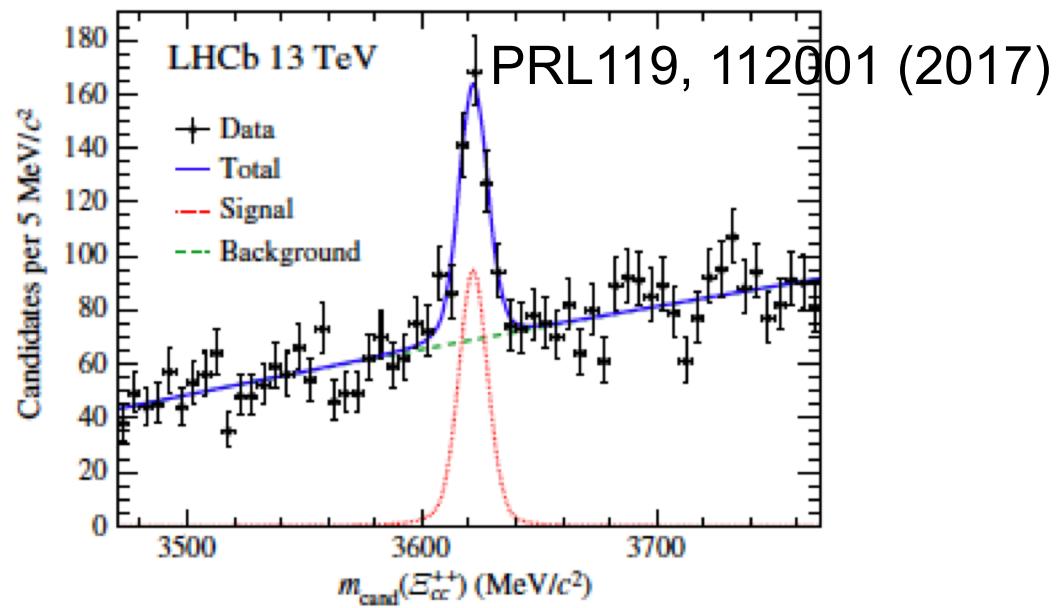
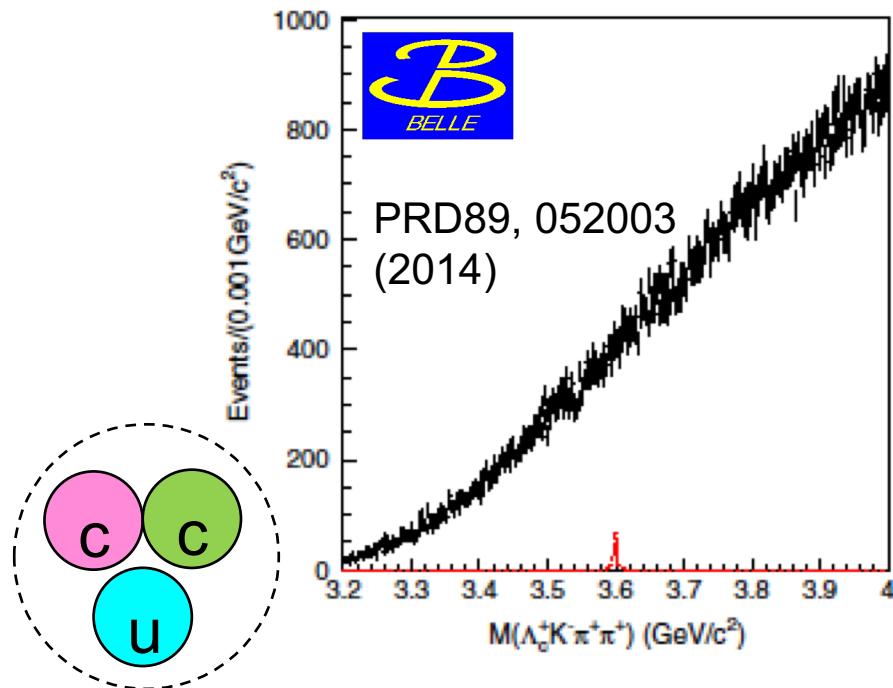


FIG. 3. Invariant mass distribution of  $\Lambda_c^+ K \pi^+ \pi^+$  candidates with fit projections overlaid.

In e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> annihilation at 10.58GeV

実験手法が変わると、できやすいもの、見えやすいものが変わる。  
自分が関わっている実験での印象にひきずられてはいけない。

In pp collision at 13 TeV

# 最後に

- Quarkonium(-like) XYZ states にしろ、Charmed baryons にしろ、Belleでわかったこともある一方で、宿題もたくさん残っている。Belle IIが果たすべき役割は多彩。
- ハドロン物理=非摂動論的QCDは以下の特徴を持つ系の研究である。
  - 非可換群SU(3)対称性
  - 強結合
- ヒッグス粒子が複合粒子であった場合、その中の構成子を結びつける相互作用はおそらく強結合だろう。その場合はハドロン物理研究で開発される研究手法が有効な道具になるだろう(世の中、何が役に立つかわからない)。