

Адронная спектроскопия

Игорь Денисенко
ОИЯИ
iden@jinr.ru

1 апреля 2023

Чем интересны адронные спектры?

- Один из ключевых способов изучения и проверки нашего понимания теории сильных взаимодействий в непertурбативной области.
- Большое количество **новых неожиданных результатов**:
 - открытие чармониеподобных и боттомониеподобных состояний,
 - открытие пентакварков,
 - открытие резонансов в системе $J/\psi/J/\psi$,
 - открытие экзотических мезонов с зарядом 2.

Атом водорода и его спектр

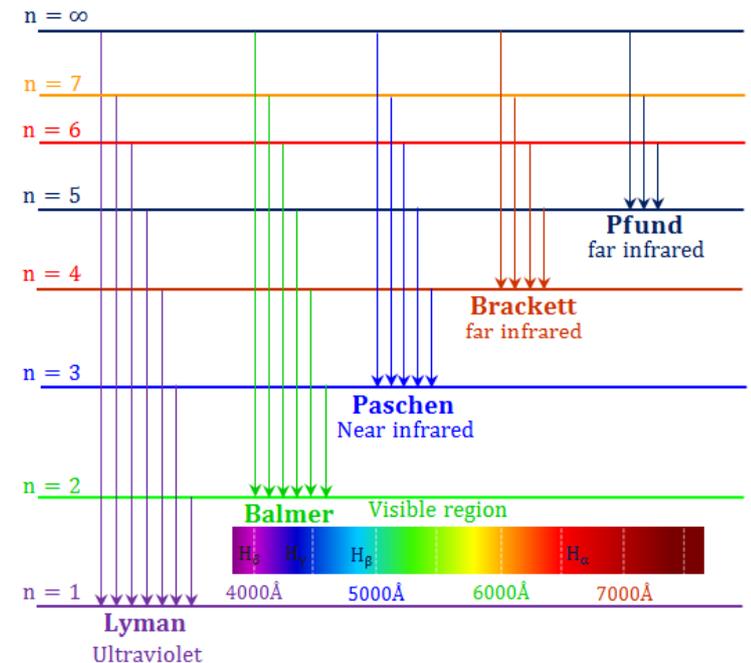
Электрон и протон с потенциалом взаимодействия $1/r$. Спектр дается решением стационарного уравнения Шредингера:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi(r, \theta, \varphi) = E\psi(r, \theta, \varphi)$$

Спектр

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

- $n = n_r + l$
- не учитывает тонкую структуру (LS-взаимодействие, релятивистские поправки,...)



- 4-вектор (частица или система частиц):

$$p = (E, p_x, p_y, p_z)$$

- инвариантная масса:

$$p^2 = E^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 = m^2$$

- масса отскока (recoil mass):

$$M_{\text{rec}}^2 = (p^{\text{tot}} - p^{\text{mes}})^2$$

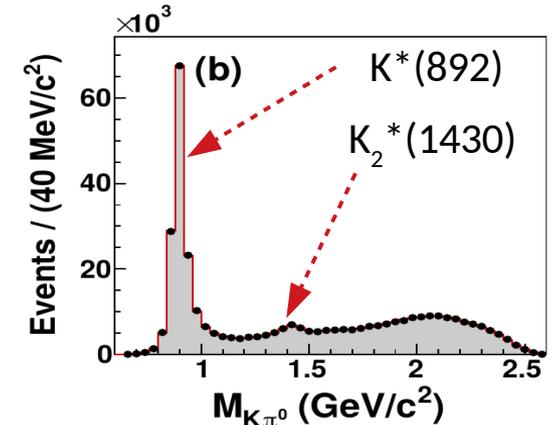
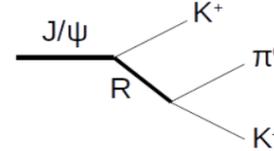
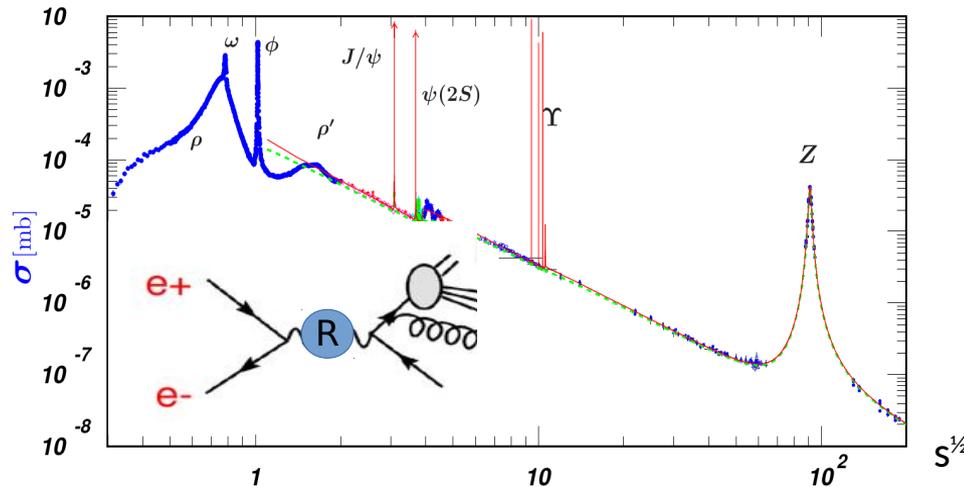
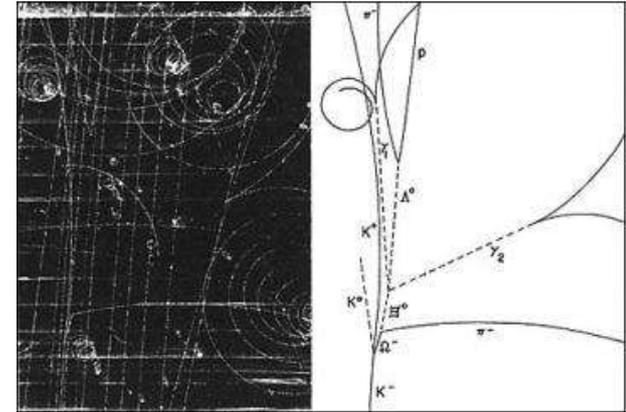
- $s = E_{\text{CM}}^2$

Элементарные частицы и резонансы

- долгоживущие заряженные частицы видны по трекам в детекторе
- математически обмен частиц соответствуют полюсу в амплитуде процесса

$$A \propto \frac{1}{s - M^2 + iM\Gamma}$$

- короткоживущие частицы могут быть виртуальными («вне массовой поверхности») видны как пики (описываемые формулой Брейта-Вигнера) в распределение по инвариантной массе конечных частиц



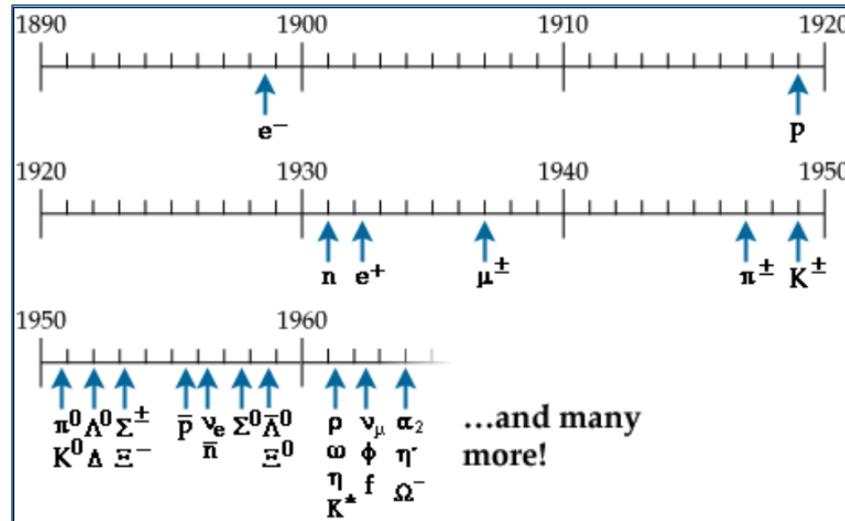
Немного истории

1947

- Nucleus consists of nucleons - protons and neutrons
- Nucleons are bound strongly by π -meson (pion) exchange
- β -decay — weak nuclear forces
- Question: why μ meson is necessary?

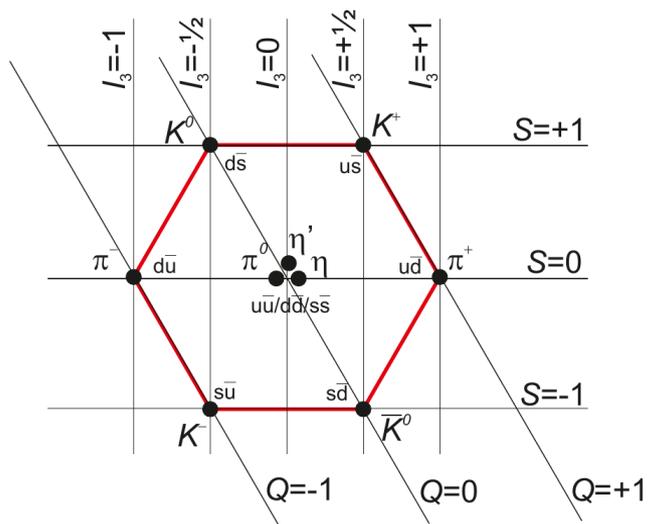
15 years later **particle zoo**:

- K-mesons (1947, 1951)
- Λ — hyperon (1951)
- $\Delta(1232)$ (1952)
- Σ и Ξ hyperons (1953)
- ρ , ω , η mesons (1961)

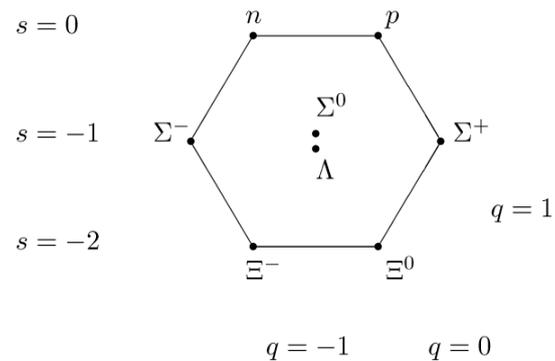


- Протон и нейтрон имеют практически одинаковые массы и взаимодействуют одинаково с точки зрения сильных взаимодействий \rightarrow их можно считать двумя состояниями одной частицы в изотопическом пространстве ($I=1/2, I_z = \pm 1/2$). Изоспин и его проекцию по «ось Z» обобщается и на другие частицы.
- Странность – квантовое число, введенное в связи с тем, что некоторые частицы рождались парами, хотя не были частицей и античастицей (например, $p + p \rightarrow p + \Lambda + K^+$)

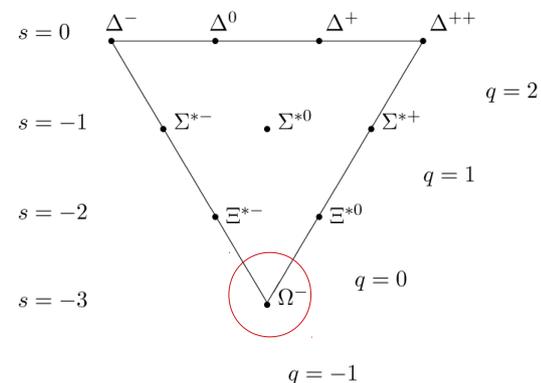
Мультиплеты частиц



Октет и синглет псевдоскалярных мезонов ($J^P = 0^-$)



Октет барионов с $J=1/2$

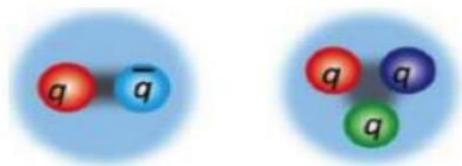


Декуплет барионов с $J=3/2$

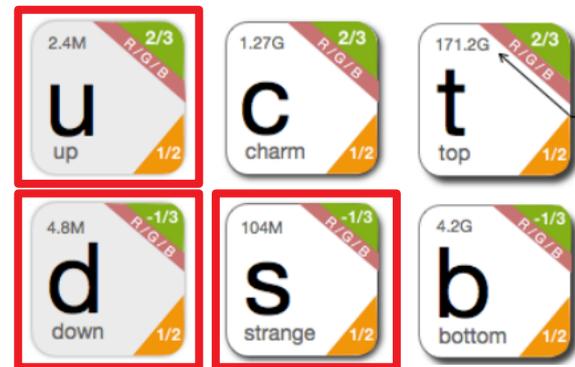
Кварковая модель

Гелл-Манн и Цвейг (1964): увидели связь мультиплетов с представлениями группы SU(3).
 Кварковая модель с u , d и s кварками:

- мезоны - $q\bar{q}$
- барионы - qqq



Состояние классифицируются по флейворному составу и квантовым числам



Легчайшие скалярные нонеты

J^{PC}	$2S+1L_J$	Мезоны	Нонет
0^{-+}	1S_0	$\pi \eta \eta' K$	псевдоскалярный
1^{--}	3S_1	$\rho \omega \phi K^*$	векторный
1^{+-}	1P_1	$b_1 h_1 h'_1 K_1$	псевдовекторный
0^{++}	3P_0	$a_0 f_0 f'_0 K_0^*$	скалярный
1^{++}	3P_1	$a_1 f_1 f'_1 K_1$	аксиальный векторный
2^{++}	3P_2	$a_2 f_2 f'_2 K_2^*$	тензорный

Кварковая модель

Мезоны

$$\begin{pmatrix} u\bar{d} \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d}) \\ d\bar{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u\bar{s} \\ d\bar{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K^+ \\ K^0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} s\bar{d} \\ s\bar{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{K}^0 \\ K^- \end{pmatrix}$$

$$\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}) = \eta(550)$$

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}) = \eta'(960)$$

Барионы

$$\begin{pmatrix} uud \\ ddu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} ssu \\ ssd \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Xi^0 \\ \Xi^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} uuu \\ uud \\ ddu \\ ddd \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta^{++} \\ \Delta^+ \\ \Delta^0 \\ \Delta^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} uus \\ uds \\ dds \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Sigma^{*+} \\ \Sigma^{*0} \\ \Sigma^{*-} \end{pmatrix}$$

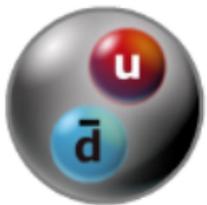
$$\begin{pmatrix} ssu \\ ssd \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Xi^{*0} \\ \Xi^{*-} \end{pmatrix}$$

$$\Omega^-(1672) = sss$$

SU(3) симметрия нарушается из-за различных масс кварков, поэтому возможно смешивание состояний с одинаковыми квантовыми числами!

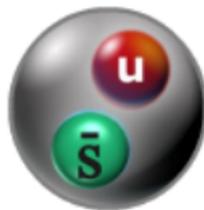
Массы адронов

Pion



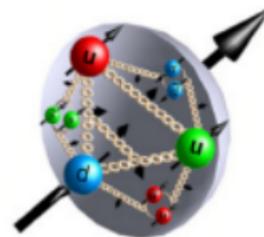
- $M_\pi \sim 140\text{MeV}$
- Spin 0
- 2 light valence quarks

Kaon



- $M_K \sim 490\text{MeV}$
- Spin 0
- 1 light and 1 "heavy" valence quarks

Proton



- $M_p \sim 940\text{MeV}$
- Spin 1/2
- 3 light valence quarks

Higgs generated masses of the valence quarks:

$$M_{(u+d)} \sim 7 \text{ MeV}$$

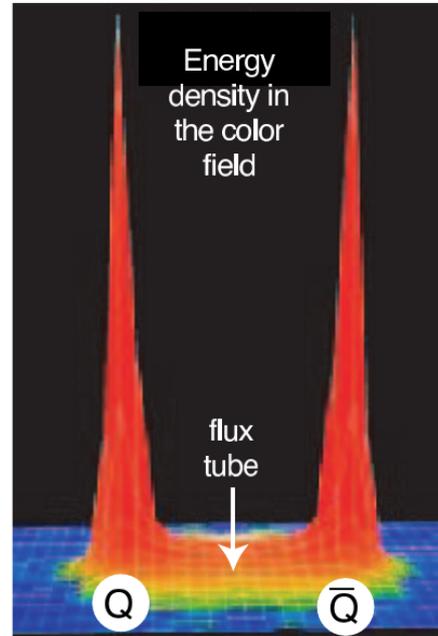
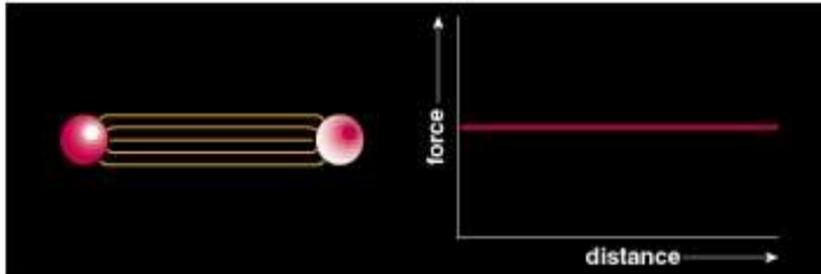
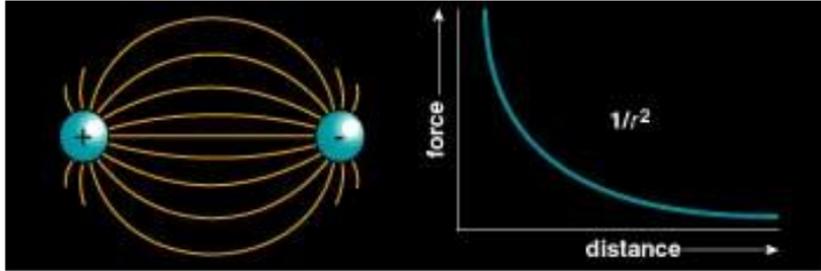
$$M_{(u+s)} \sim 100 \text{ MeV}$$

$$M_{(u+u+d)} \sim 10 \text{ MeV}$$

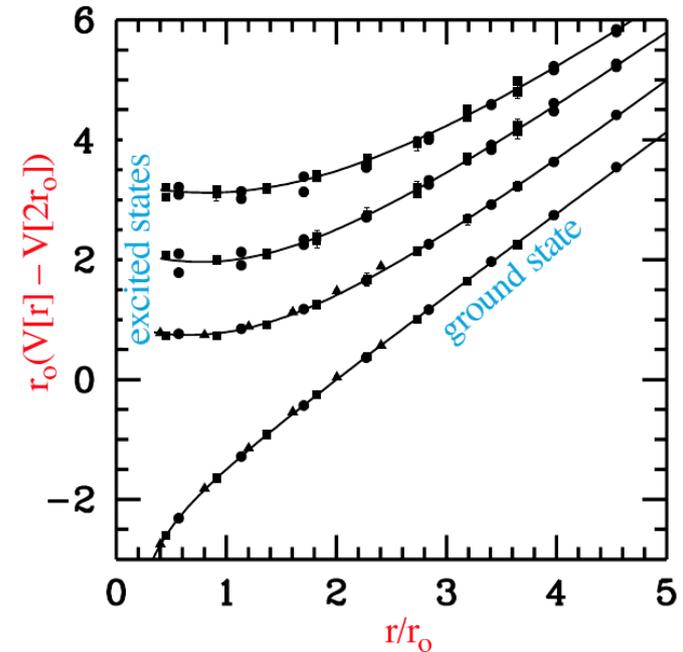
From O. Denisov, EHM 2020

Конфайнмент

From C. Meyer "Light and exotic mesons"



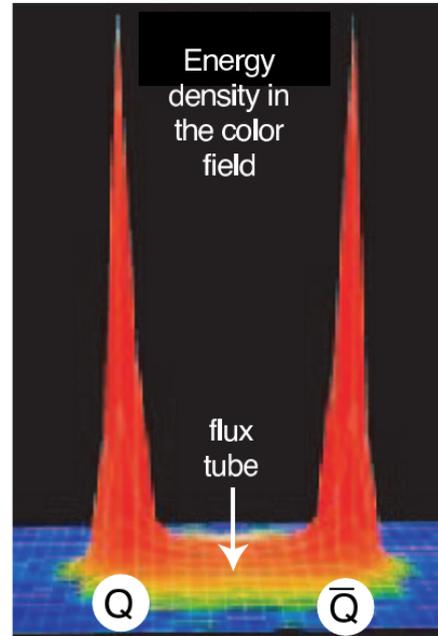
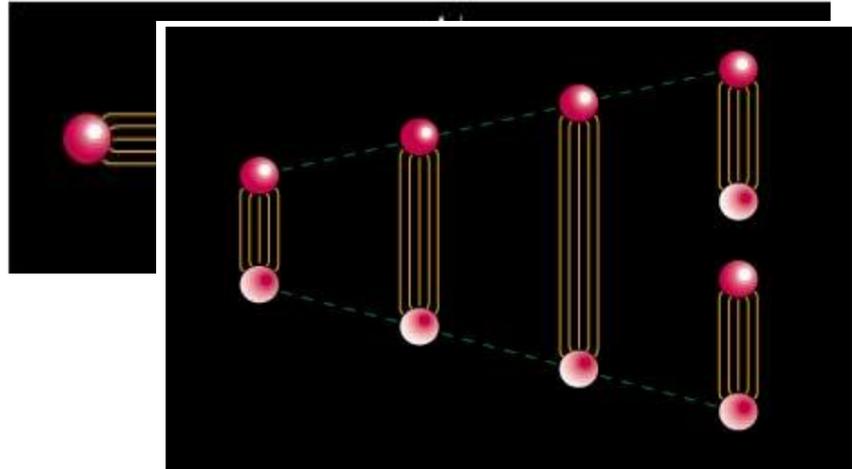
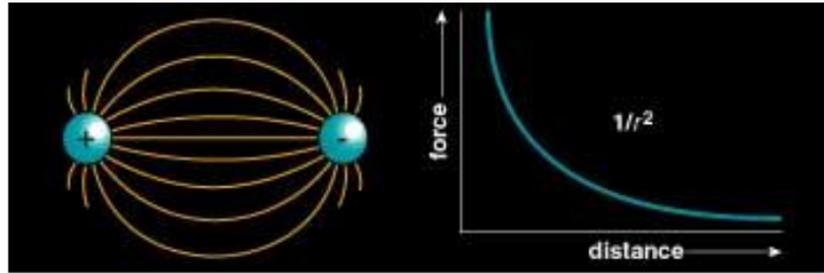
Lattice QCD



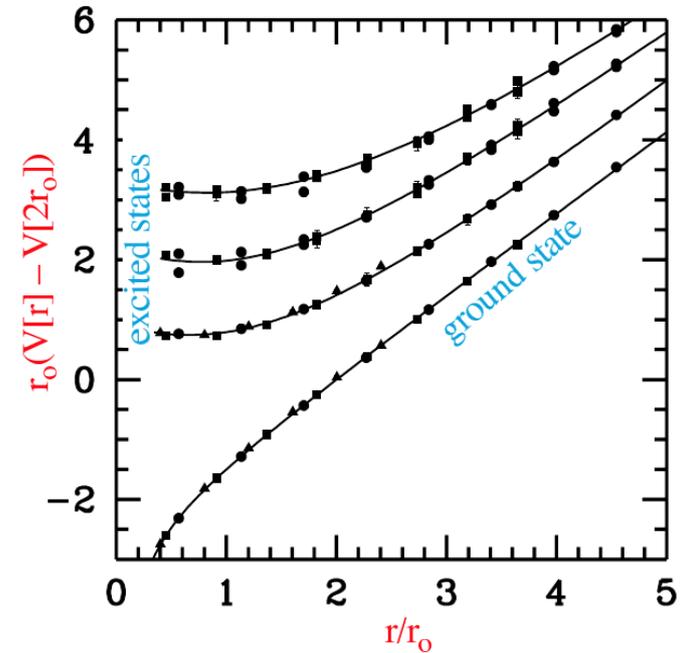
Potential: $\sim 1/r$ for small distances and linear for large ones

Конфайнмент

From C. Meyer "Light and exotic mesons"

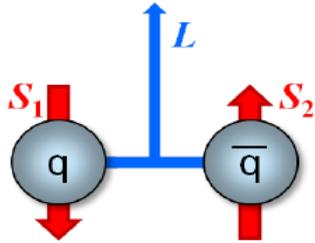


Lattice QCD



Potential: $\sim 1/r$ for small distances and linear for large ones

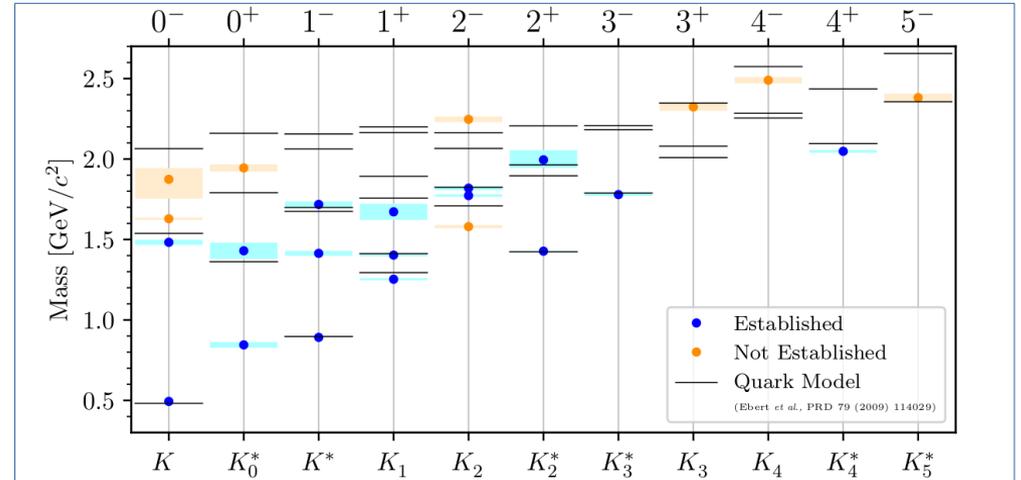
Потенциальные модели для мезонов



- В феноменологических потенциальных моделях предполагается, что кварк и антикварк взаимодействуют посредством эффективного потенциала ($1/r$ на малых расстояниях и $\sim r$ на больших)
- Кварки имеют эффективную массу
- Модели обычно различаются спин-зависимым взаимодействием
- Аналогично атому водорода состояния характеризуются L, S, J, n ($^{2S+1}nL_J$)
- Пространственная и зарядовые четности

$$P = (-1)^{L+1}$$

$$C = (-1)^{L+S}$$

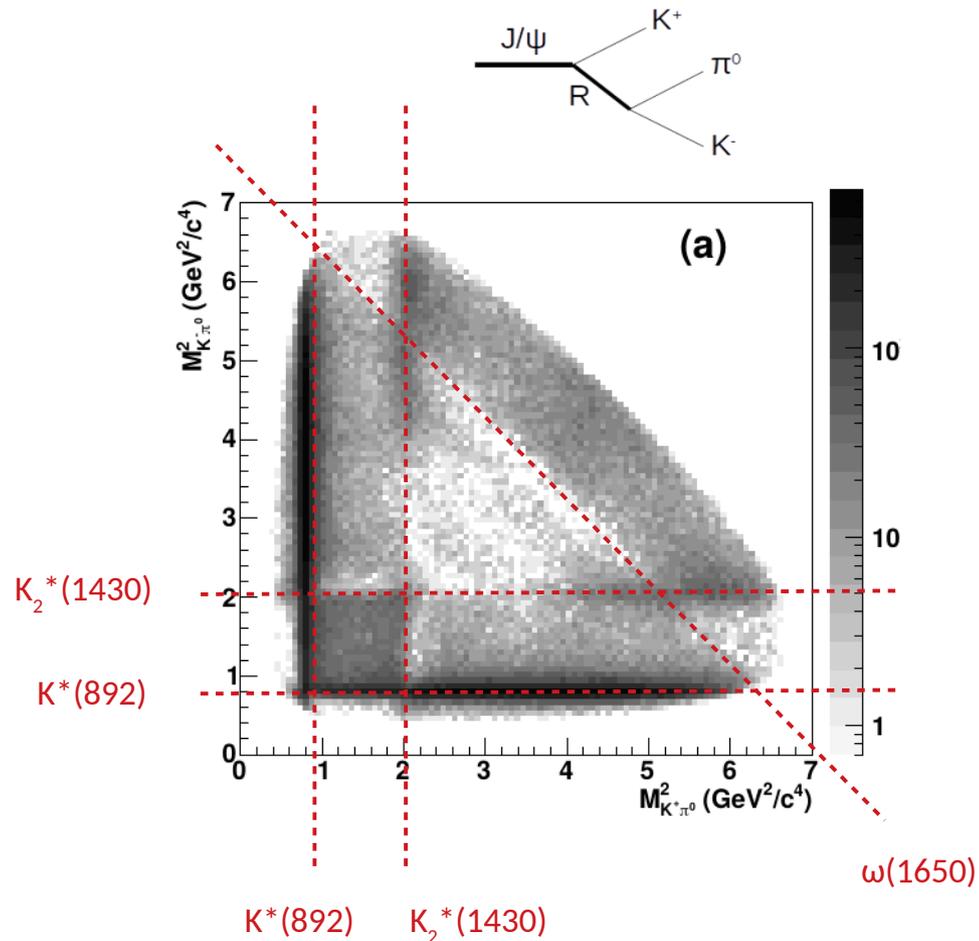


Описание конных спектров
(Credit: B. Grubbe)

В кварковой модели возможны не все квантовые числа.
В частности, запрещены квантовые числа $JPC = 1-+$.

Амплитудный анализ и Далиц-диаграмм

- Спин частицы задает угловые зависимости продуктов распада, анализируя которые, его можно определить.
- В амплитудном анализе амплитуда процесса или распада аппроксимируются набором резонансов в различных парциальных волнах. (Разложение на парциальные волны вытекает из сложения угловых моментов в КМ.)
- Трехчастичные распады удобно анализировать с помощью Далиц-диаграммы.



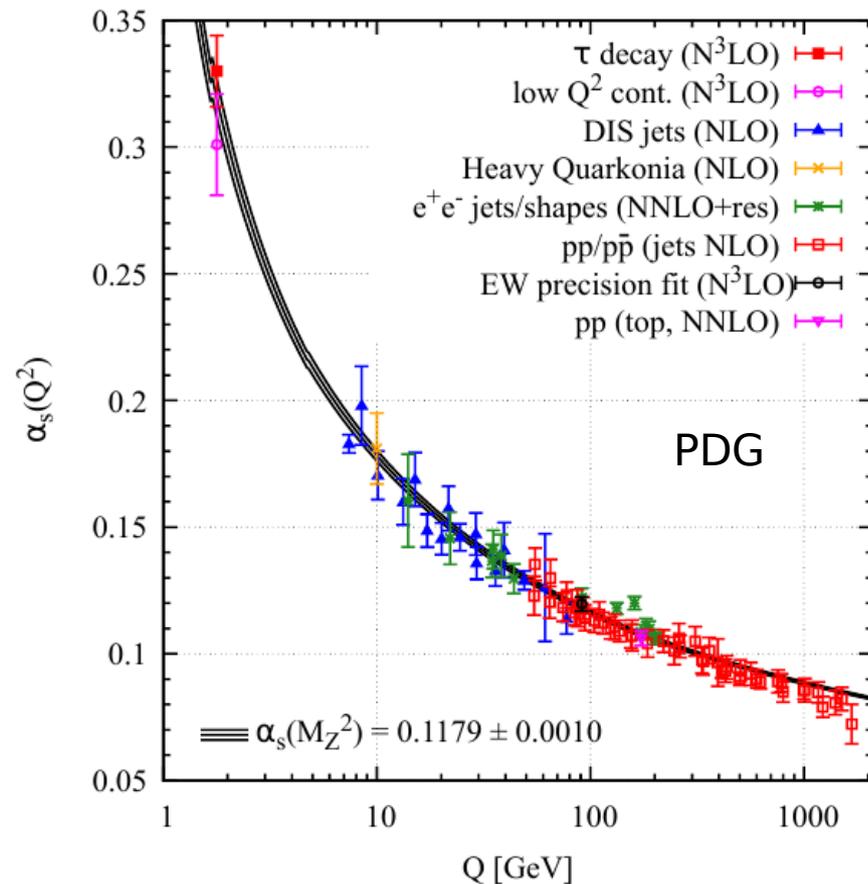
Адронные спектры в КХД

Основной инструмент получения предсказаний – пертурбативное разложение по α_s .

Другие подходы:

- Решеточные вычисления
- Дуальные модели (AdS/CFT и AdS/QCD)
- Феноменологические модельные вычисления
- ...

На данный момент у нас нет достаточного понимания КХД в режиме сильной связи.



Despite significant theoretical and experimental efforts no satisfactory understanding of formation of hadrons has been achieved!

Studying hadron spectra and search for states beyond the conventional quark model can be a clue!



Millennium Problems **1 million USD prize from the Clay Mathematics Institute!**

Yang–Mills and Mass Gap Experiment and computer simulations suggest the existence of a "mass gap" in the solution to the quantum versions of the Yang–Mills equations. But no proof of this property is known.

Riemann Hypothesis

The prime number theorem determines the average distribution of the primes. The Riemann hypothesis tells us about the deviation from the average. Formulated in Riemann's 1859 paper, it asserts that all the 'non-obvious' zeros of the zeta function are complex numbers with real part $1/2$.

P vs NP Problem

If it is easy to check that a solution to a problem is correct, is it also easy to solve the problem? This is the essence of the P vs NP question. Typical of the NP problems is that of the Hamiltonian Path Problem: given N cities to visit, how can one do this without visiting a city twice? If you give me a solution, I can easily check that it is correct. But I cannot so easily find a solution.

Navier–Stokes Equation

This is the equation which governs the flow of fluids such as water and air. However, there is no proof for the most basic questions one can ask: do solutions exist, and are they unique? Why ask for a proof? Because a proof gives not only certitude, but also understanding.

Hodge Conjecture

The answer to this conjecture determines how much of the topology of the solution set of a system of algebraic equations can be defined in terms of further algebraic equations. The Hodge conjecture is known in certain special cases, e.g. when the solution set has dimension less than four. But in

Hadrons beyond conventional QM

Nothing in QCD forbids existence of

- other multiquark states
 - tetraquarks,
 - hadronic molecules
 - pentaquarks,
 - dibaryons
 - ...
- hybrid states,
- glueballs.

Ways to identify them:

- Specific production and decay properties
- “Extra” states in hadron spectra
- Exotic quantum numbers
- ...

Difficulties:

- Complicated interferences in experimental spectra
- Can mix with ordinary meson with the same quantum numbers

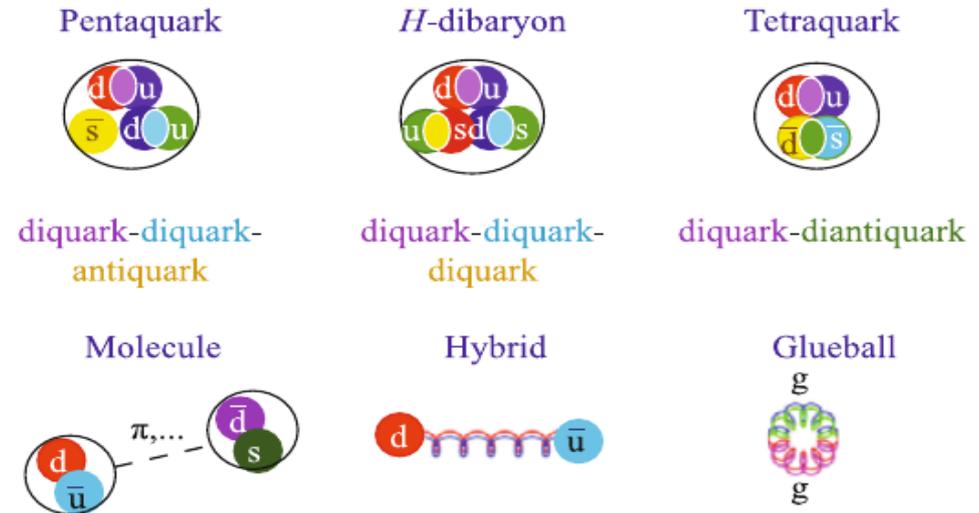


Figure: S. Olsen

Hadrons beyond conventional QM

Nothing in QCD forbids existence of

- other multiquark states
 - tetraquarks,
 - hadronic molecules
 - pentaquarks,
 - dibaryons
 - ...
- hybrid states,
- glueballs.

Ways to identify them:

- Specific production and decay properties
- “Extra” states in hadron spectra
- Exotic quantum numbers
- ...

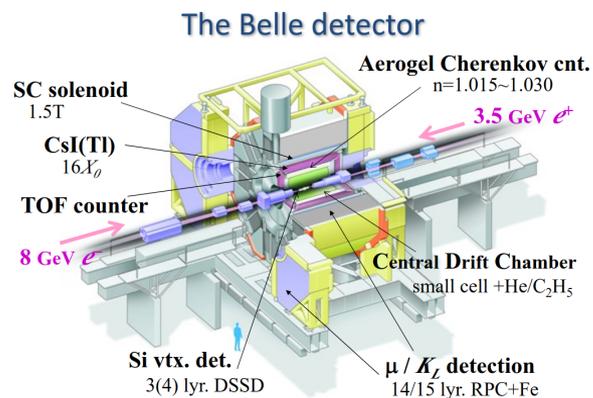
Difficulties:

- Complicated interferences in experiments
- Can mix with ordinary meson with the same quantum numbers

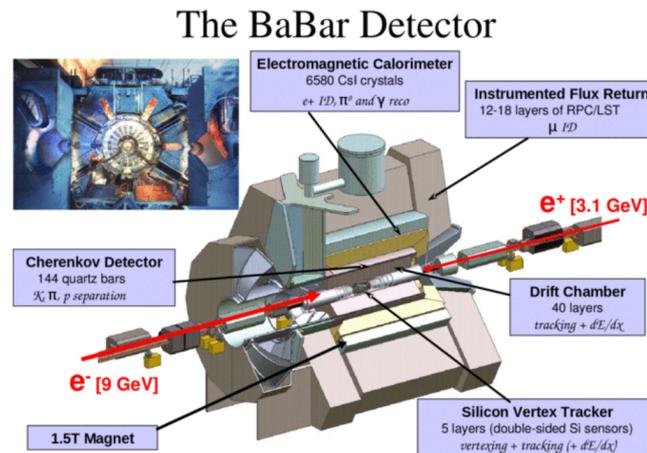


Gell-Mann: “Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq) , $(qqqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qqq\bar{q})$, etc.”

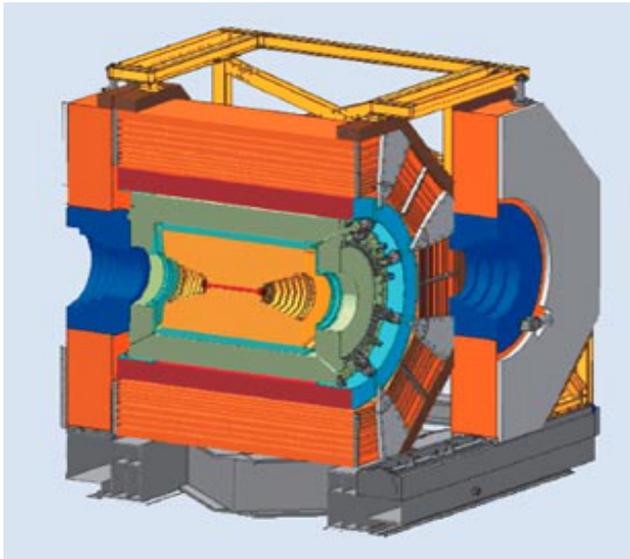
Zweig: “In general, we would expect that baryons are built not only from the product of these aces, AAA , but also from $\bar{A}AAAA$, $\bar{A}\bar{A}AAAA$, etc., where \bar{A} denotes an anti-ace. Similarly, mesons could be formed from $\bar{A}A$, $\bar{A}\bar{A}AA$, etc.”



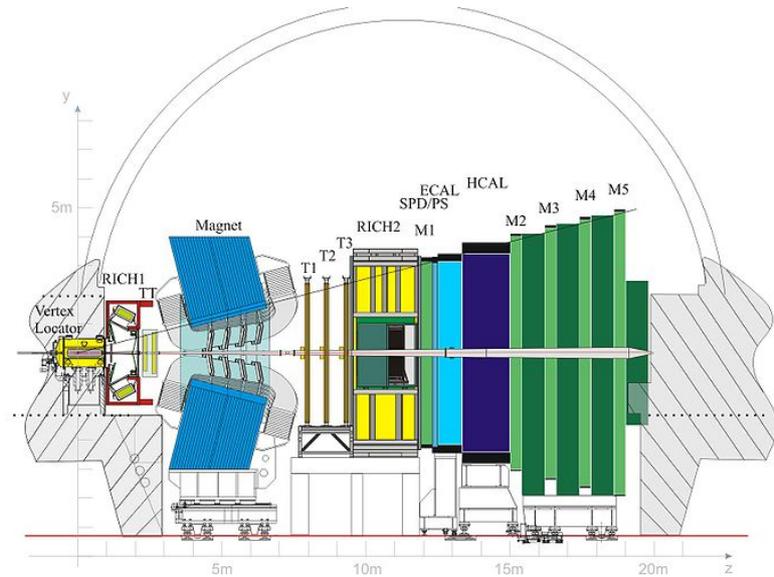
Tsukuba, Japan, 1999-2010
 Peak luminosity $> 2.11 \times 10^{34} \text{sm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Stanford, US, 1999-2008
 Peak luminosity $> 1 \times 10^{34} \text{sm}^{-2}\text{s}^{-1}$



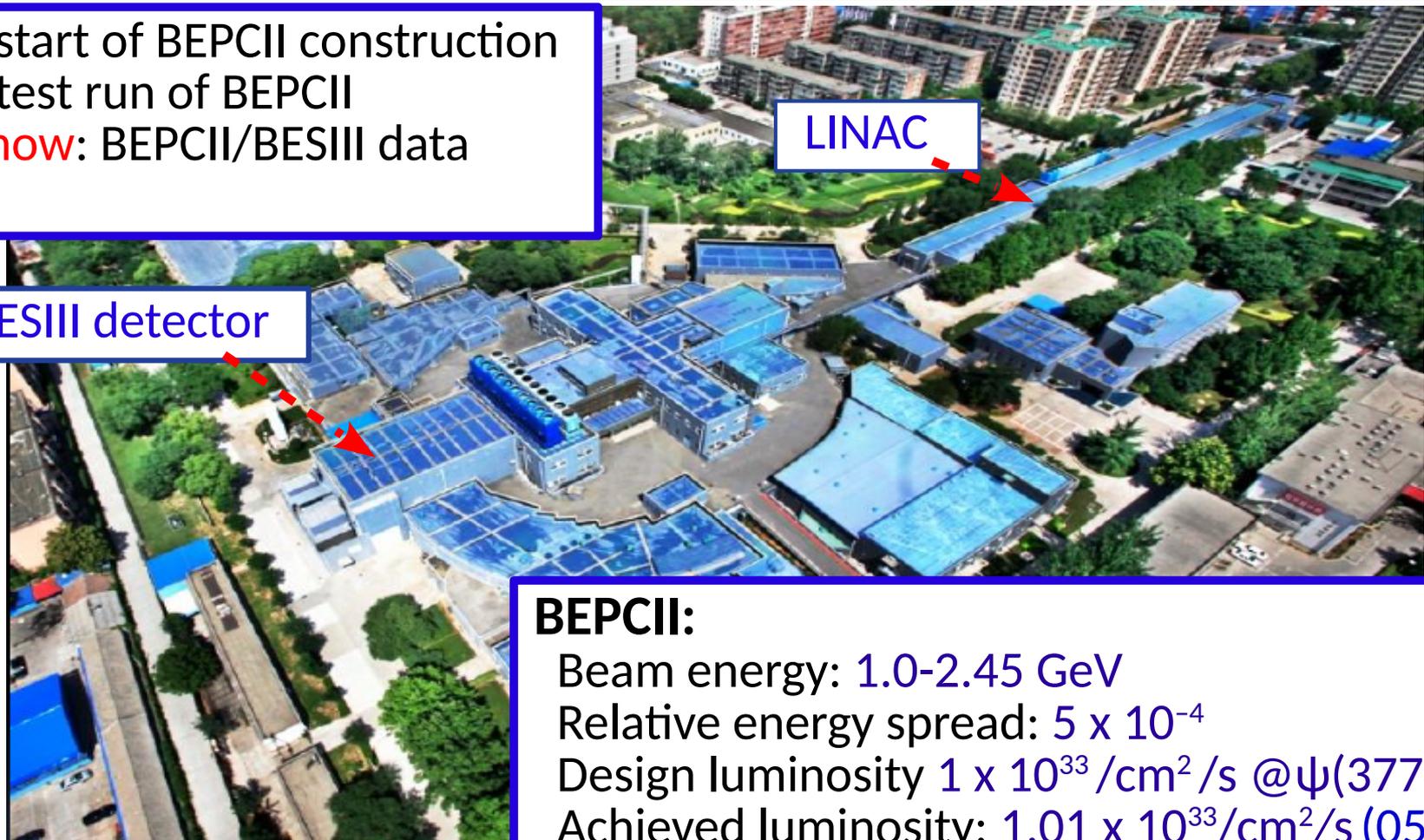
BESIII
Beijing, China, 2009-now
Peak luminosity $1 \times 10^{33} \text{sm}^{-2}\text{s}^{-1}$



LHCb
CERN, 2011-now
Peak luminosity $10^{34} \text{sm}^{-2}\text{s}^{-1}$

BESIII @ BEPCII

2004: start of BEPCII construction
2008: test run of BEPCII
2009-now: BEPCII/BESIII data taking



BEPCII:

Beam energy: 1.0-2.45 GeV

Relative energy spread: 5×10^{-4}

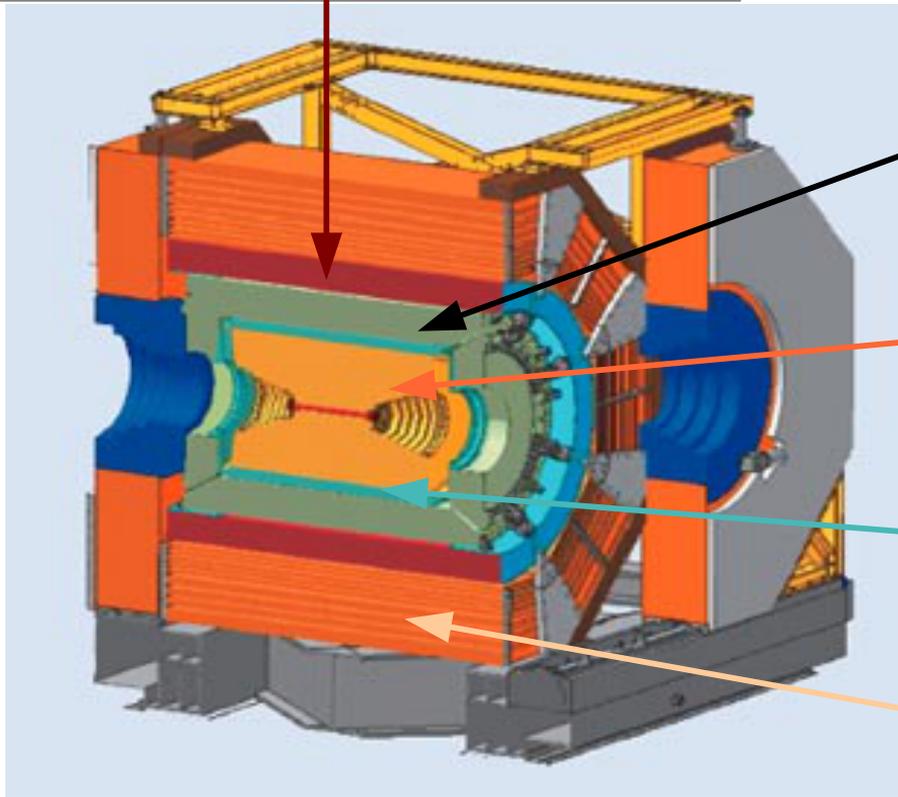
Design luminosity $1 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{s}$ @ $\psi(3770)$

Achieved luminosity: $1.01 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{s}$ (05.04.2016)

The BESIII detector

Superconducting magnet: 1 T

NIM A614, 345(2010)



EMC: CsI cristal

- Energy resolution: 2.5% @1GeV
- Spatial resolution: 6mm

MDC:

- Spatial resolution: $\sigma_{xy} = 120\mu\text{m}$
- Momentum resolution: 0.5% @ 1GeV
- dE/dx resolution: 6%

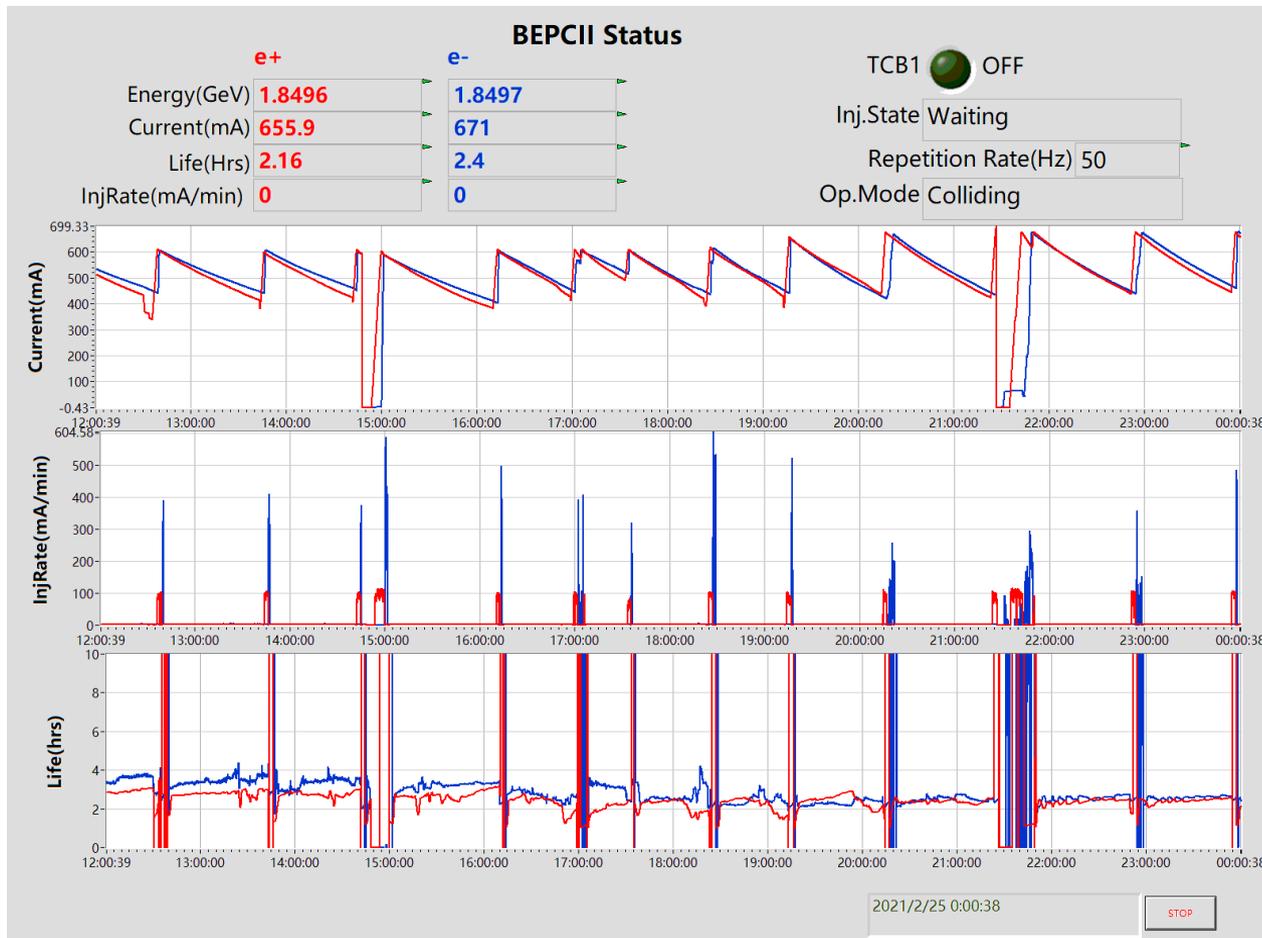
TOF (double/single layer scintillator):

- Time resolution: 80ps (barrel)
110ps [60ps] (endcaps)

Muon ID:

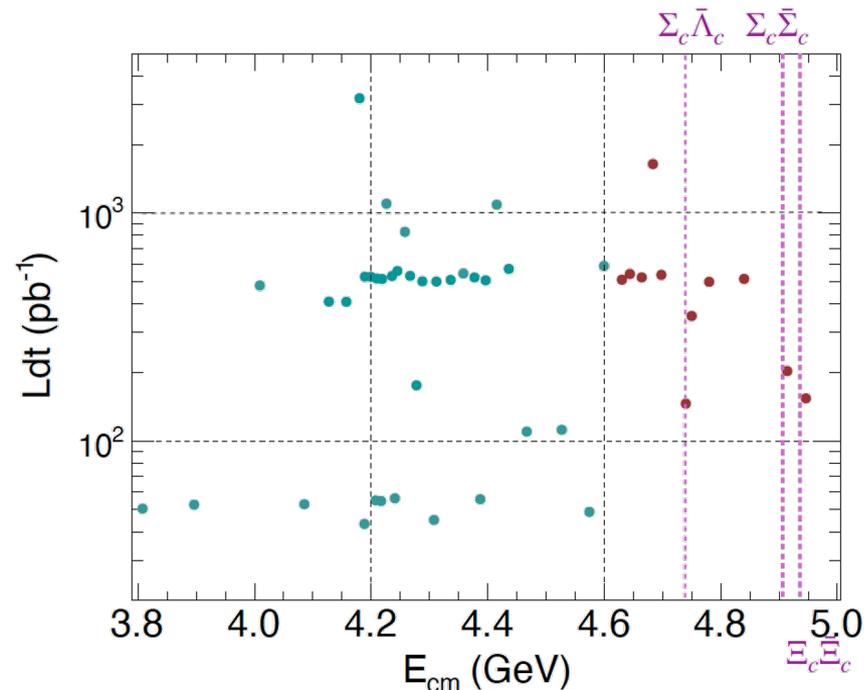
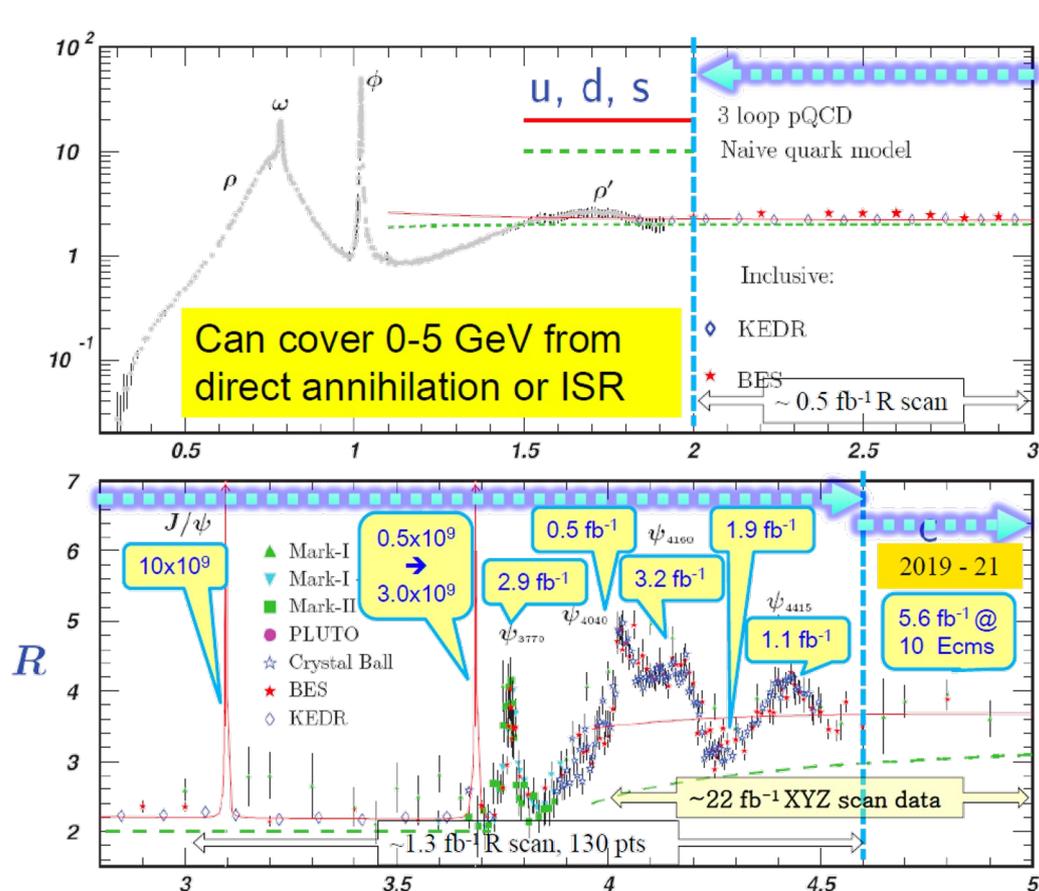
- 9 layers RPC (8 for endcaps) in the flux-return yoke

Data taking



- Light hadron spectroscopy
- Charmonium physics and XYZ states
- Charm physics
- R values, QCD and τ physics
- Exotic decays and new physics

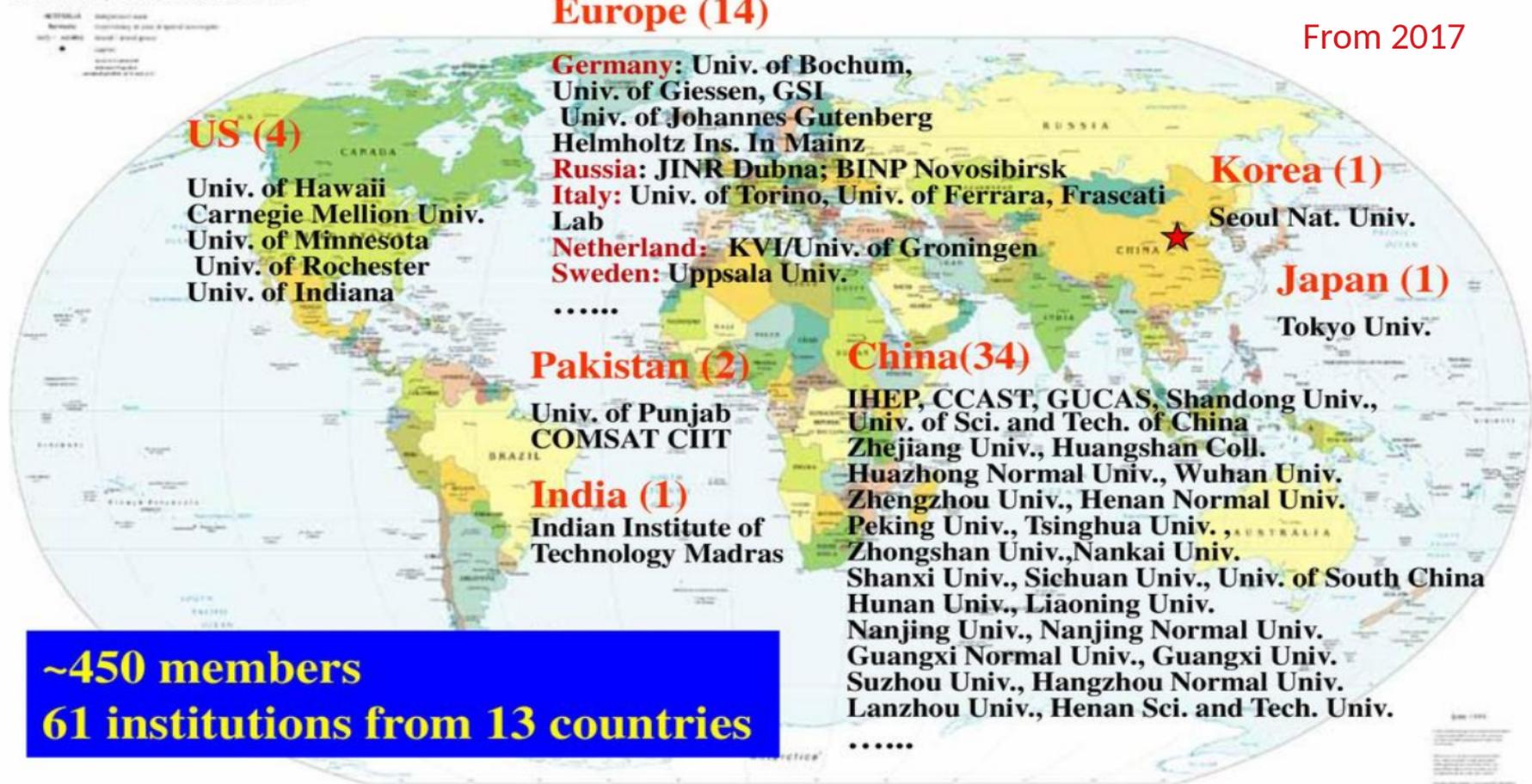
BESIII data sets



46 data samples $L \sim 21.9 \text{ fb}^{-1}$
 29 with $L_i > 0.4 \text{ fb}^{-1}$

The BESIII Collaboration

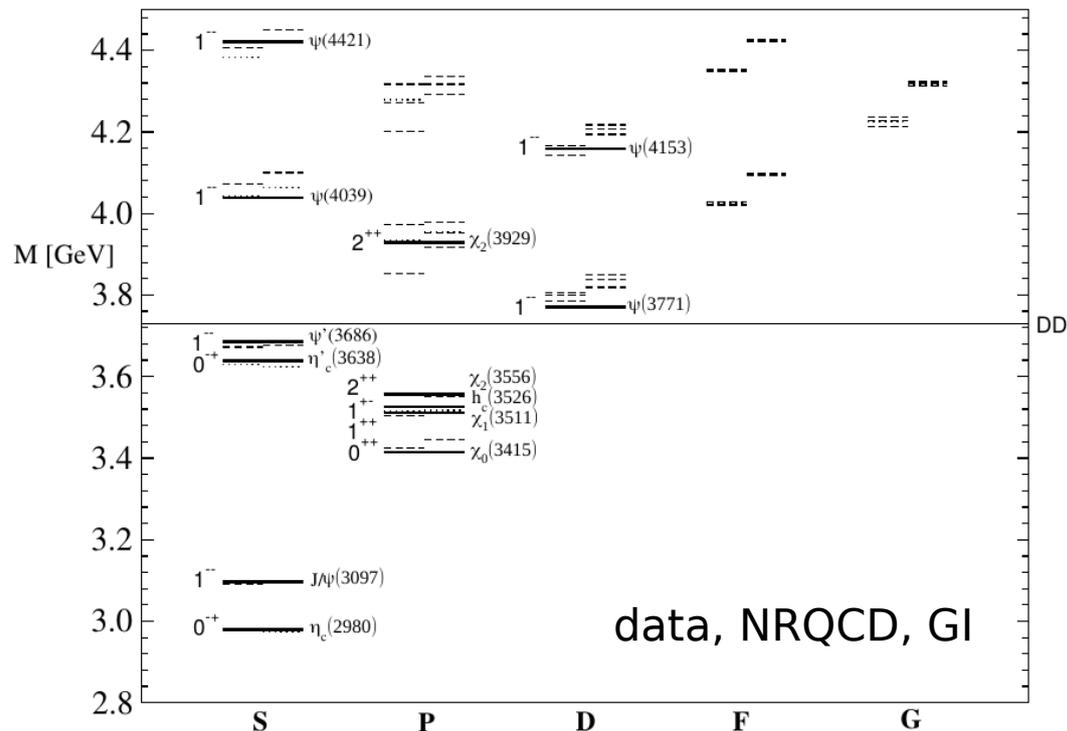
Political Map of the World, June 1999



- Spectroscopy of XYZ states
 - Y states
 - X(3872)
 - Z_c states
- Search for hybrid states
- Glueball search

Charmonium system

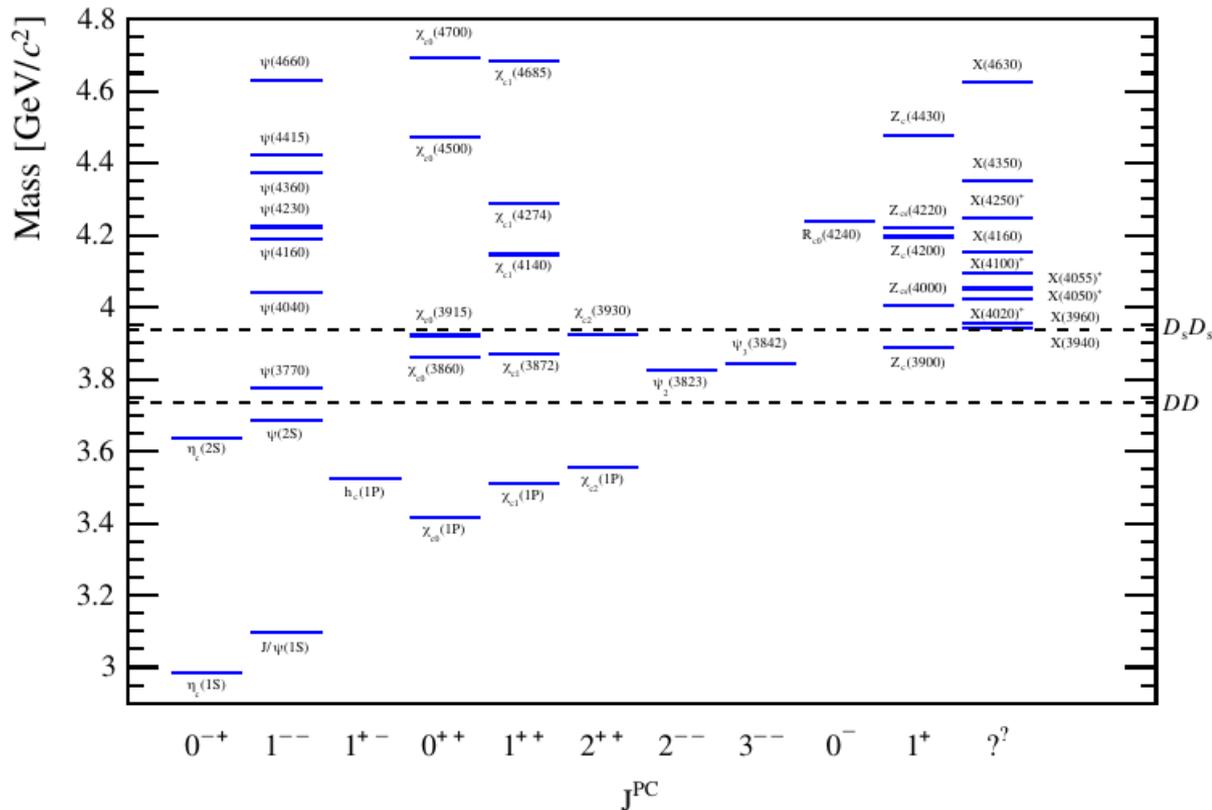
- Charmonia – mesons consisting of a (heavy) $c\bar{c}$ pair
- “onium” stands for similarity with positronium
- States below open charm threshold are well-described by potential and NQCD models



BESIII Yellow Book, 2008

Charmonium system

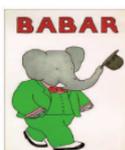
- Charmonia – mesons consisting of a (heavy) $c\bar{c}$ pair
- “onium” stands for similarity with positronium
- States below open charm threshold are well-described by potential and NRQCD models



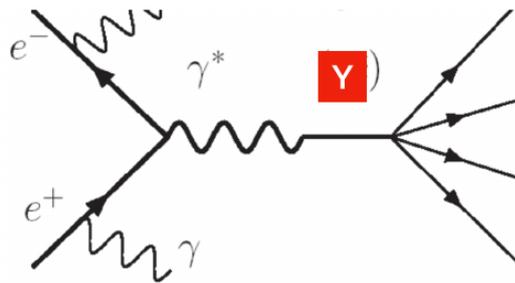
arXiv:2212.11107

XYZ states

- XYZ states are charmonia- or bottomonia-like states which are hard to accommodate in the quarkonia spectrum because of their properties.
- X – states with zero isospin, Z – states with isospin 1
- Y – $JPC = 1^{--}$ states
- PDG adopted the same names as for conventional quarkonia states.
- LHCb proposed naming scheme will be discussed later.

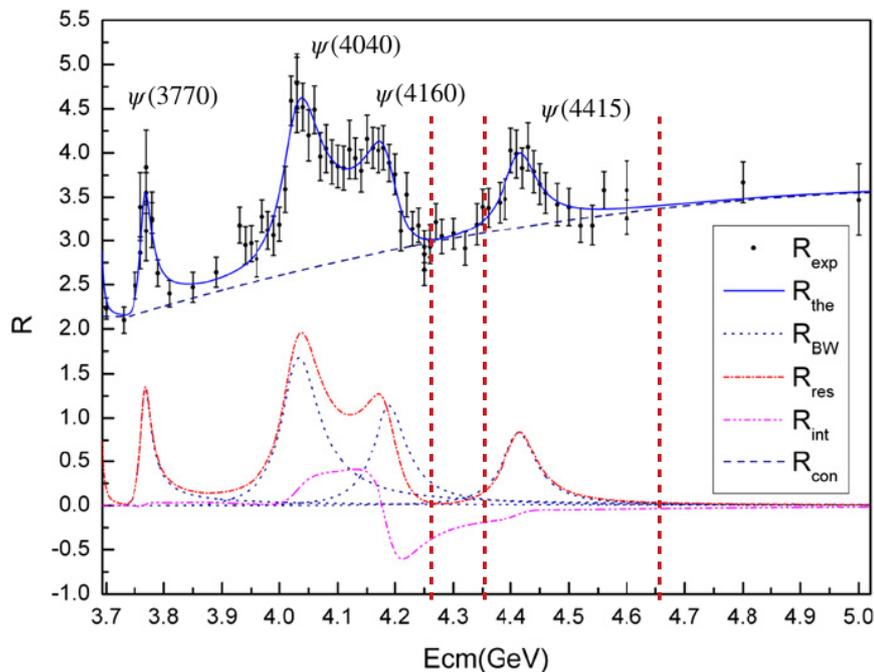


Υ (ψ) states



Y states

$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$
[BESII, PLB 660, 315 (2008)]

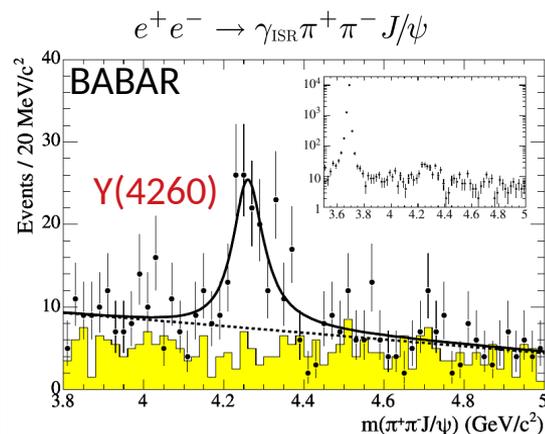


$$\psi(3770) = 1^3D_1$$

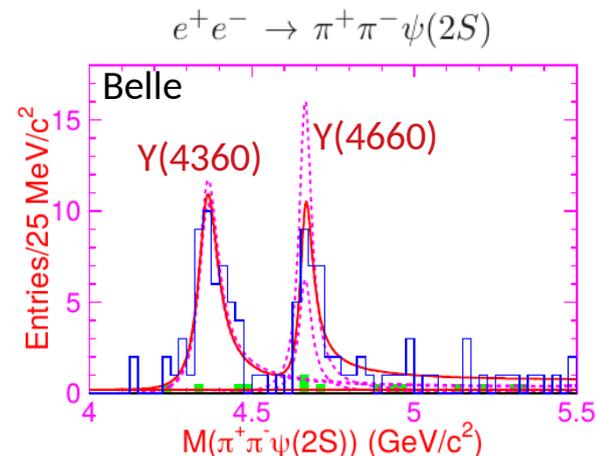
$$\psi(4160) = 2^3D_1$$

$$\psi(4040) = 3^3S_1$$

$$\psi(4415) = 4^3S_1$$



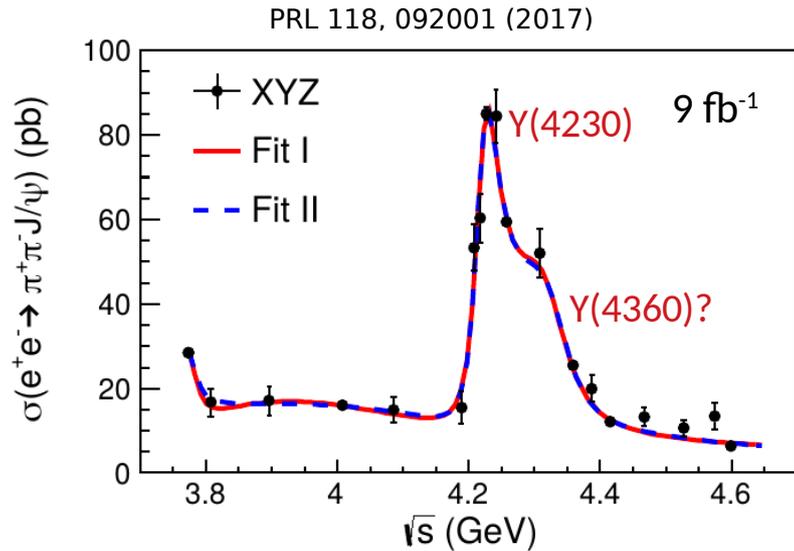
PRL95,142001(2005)



PRL99,142002(2007)

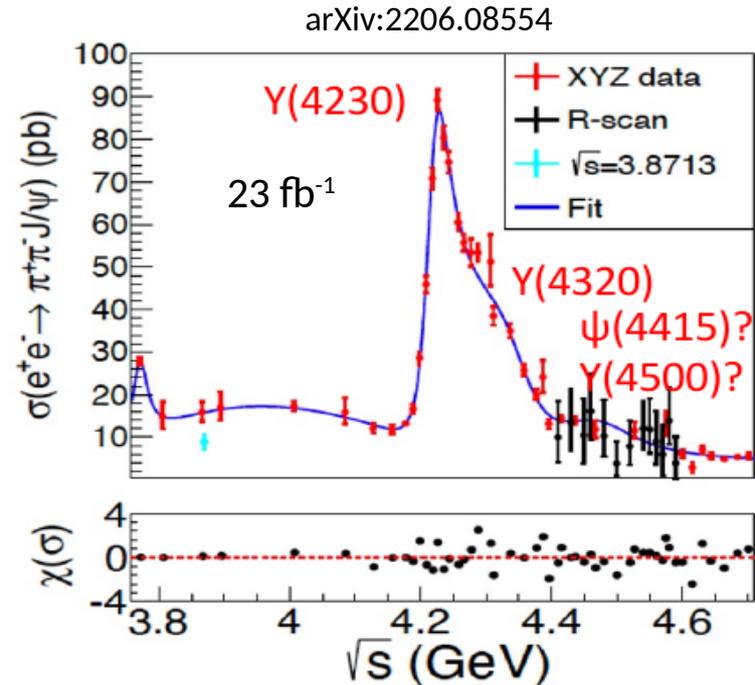
- $JPC = 1^{--}$
- unnaturally strong coupling to hidden charm states ($B(\psi(3770) \rightarrow D\bar{D}) / B(\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi) \sim 500$)
- difficult to accommodate in conventional charmonia spectrum
- candidates for tetraquarks, molecules, hybrids...

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$ at BESIII



Y(4230) $M_1 = 4222.0 \pm 3.1 \pm 1.4$ MeV
 $\Gamma_1 = 44.1 \pm 4.3 \pm 2.0$ MeV,

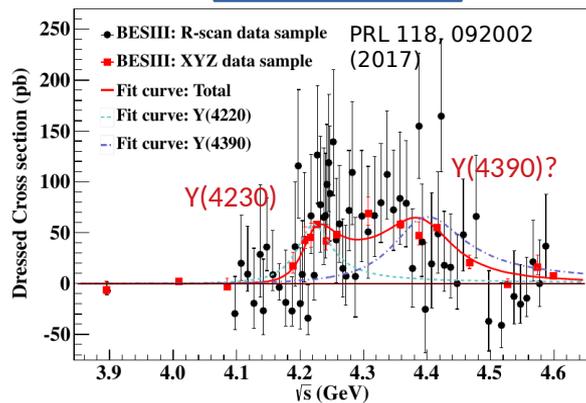
Y(4360)? $M_2 = 4320.0 \pm 10.4 \pm 7.0$ MeV
 $\Gamma_2 = 101.4_{-19.7}^{+25.3} \pm 10.2$ MeV



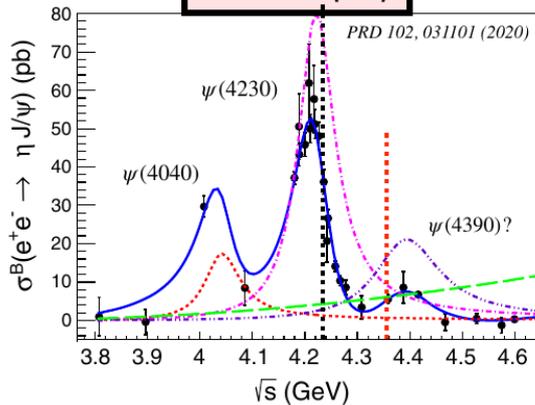
Y(4230) $M = (4220.4 \pm 2.4 \pm 2.3) MeV/c^2$
 $\Gamma = (46.2 \pm 4.7 \pm 2.1) MeV$

Y states at BESIII

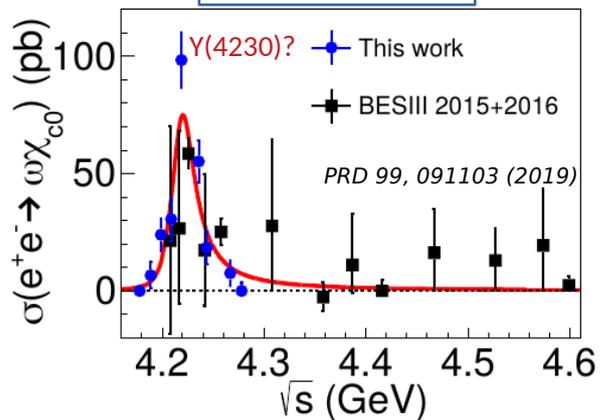
$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-h_c$$



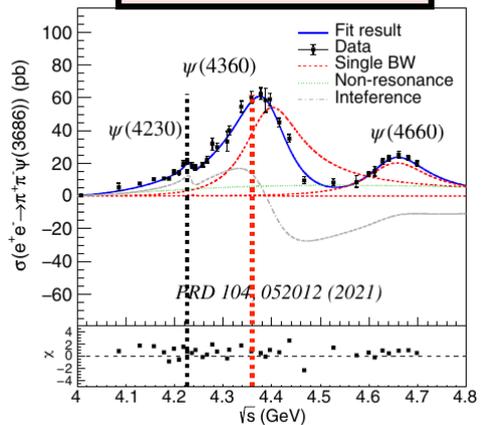
$$e^+e^- \rightarrow \eta J/\psi$$



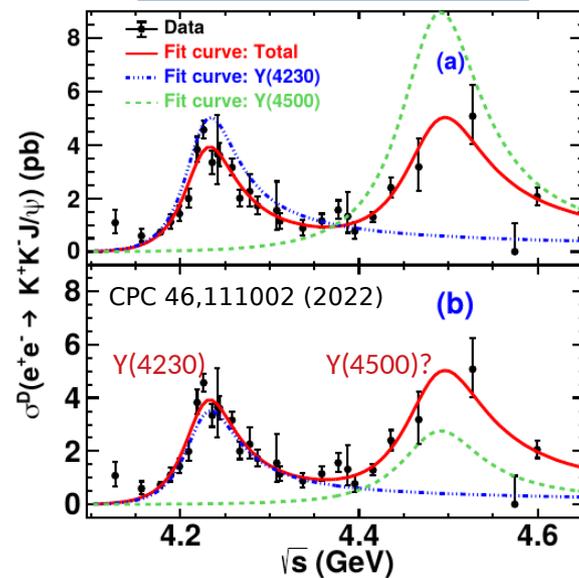
$$e^+e^- \rightarrow \omega \chi_{c0}$$

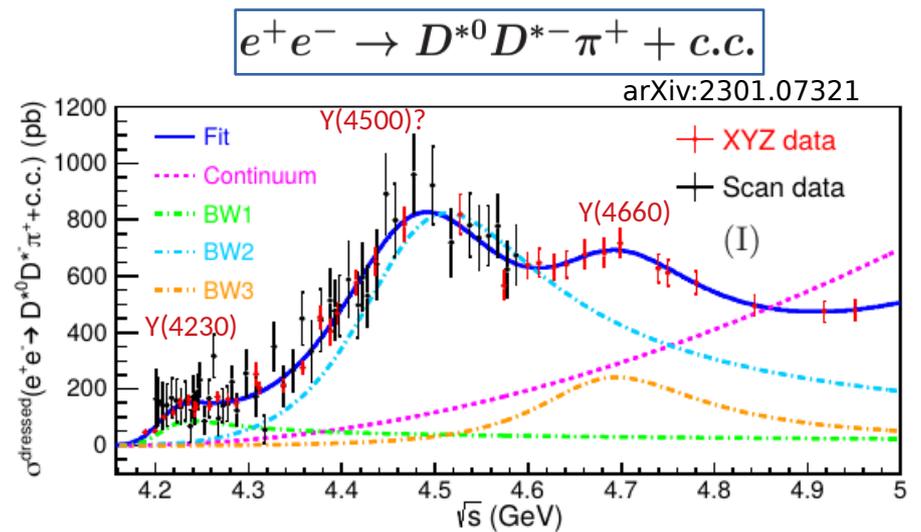
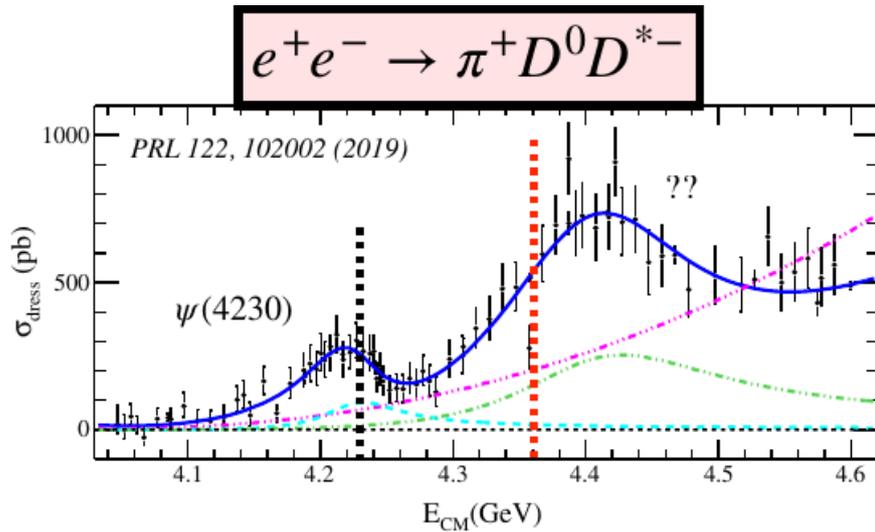


$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^- \psi(2S)$$

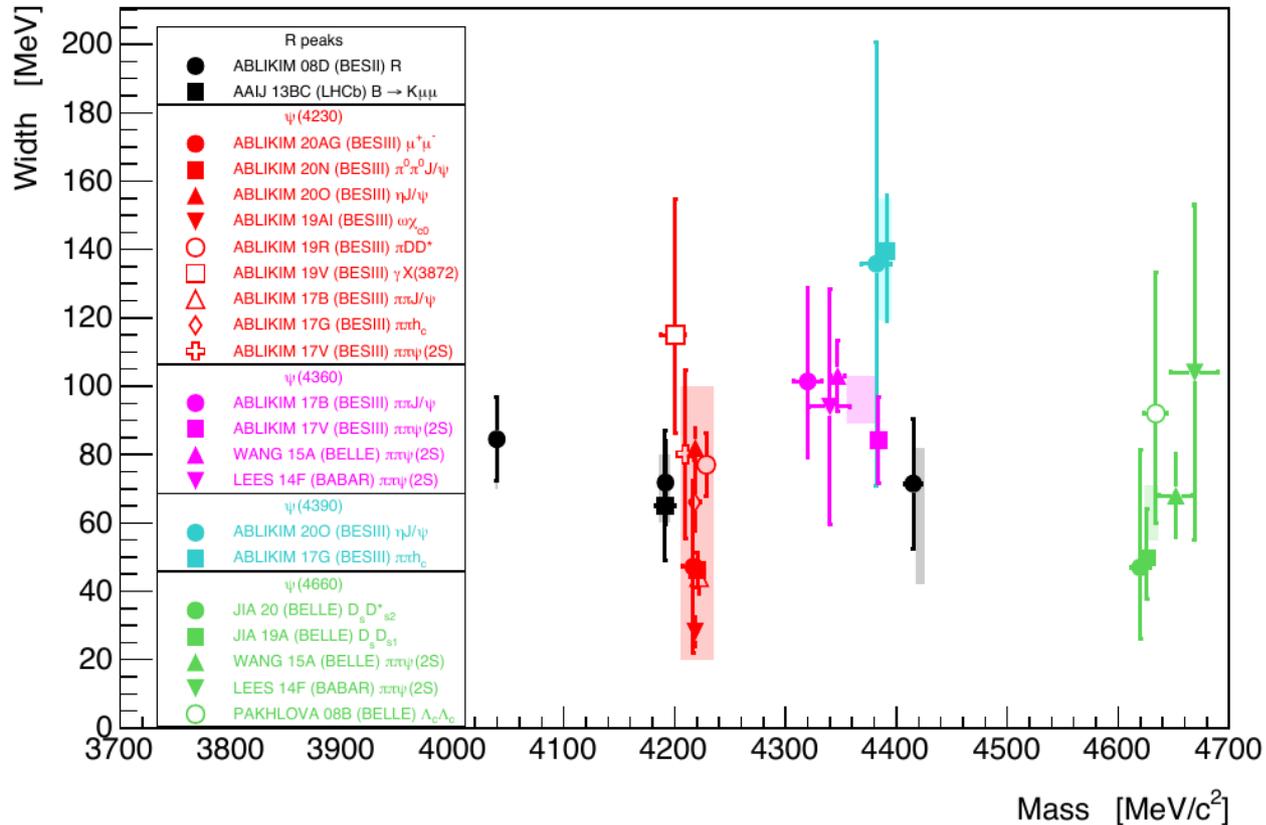


$$e^+e^- \rightarrow K^+K^- J/\psi$$

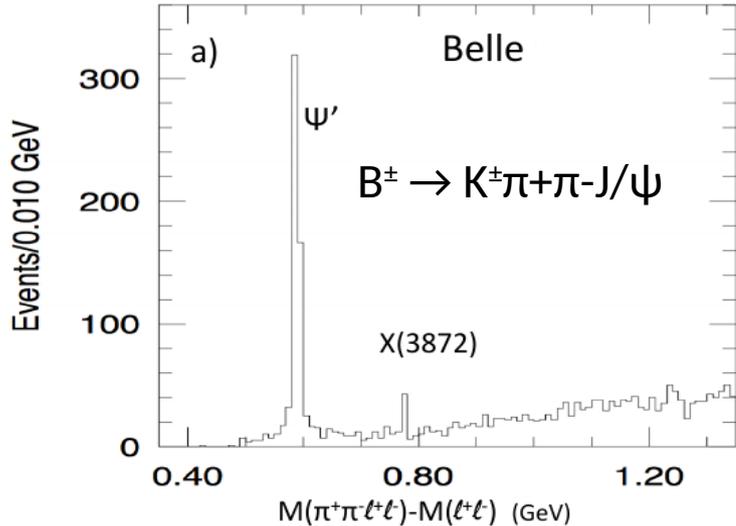




Properties of the Heavy ψ States (PDG 2021)



$X(3872) (\chi_{c_1}(3872))$



Belle collaboration, Phys. Rev. Lett. 91, 262001 (2003)

What we know now:

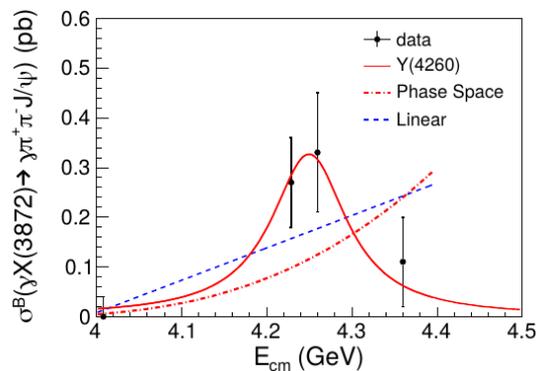
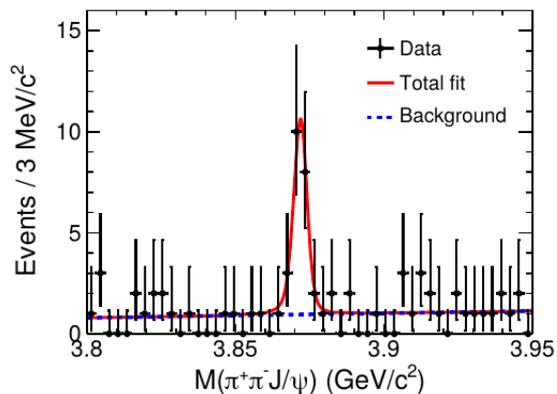
- ✓ Very close do the $D^0 D^{*0}$ threshold: $M_{X(3872)} - M_{D^0 D^{*0}} = 0.01 \pm 0.14 \text{ MeV}$
- ✓ Very narrow: $\Gamma_{X(3872)}^{BW} = 0.96_{-0.18}^{+0.19} \pm 0.21 \text{ MeV}$
- ✓ $J^{PC} = 1^{++}$
- ✓ Charged partner not found (yet) – iso-singlet state?
- ✓ Large isospin breaking $B(X \rightarrow \rho J/\psi) \simeq B(X \rightarrow \omega J/\psi)$
- ✓ Produced in B decays, in hadron collisions, in $e^+e^- \rightarrow Y(4230) \rightarrow \gamma X(3872)$?

The nature of the state remains unclear. Multiple interpretations:

- molecular state
- molecule mixed with charmonium state
- other options not ruled out

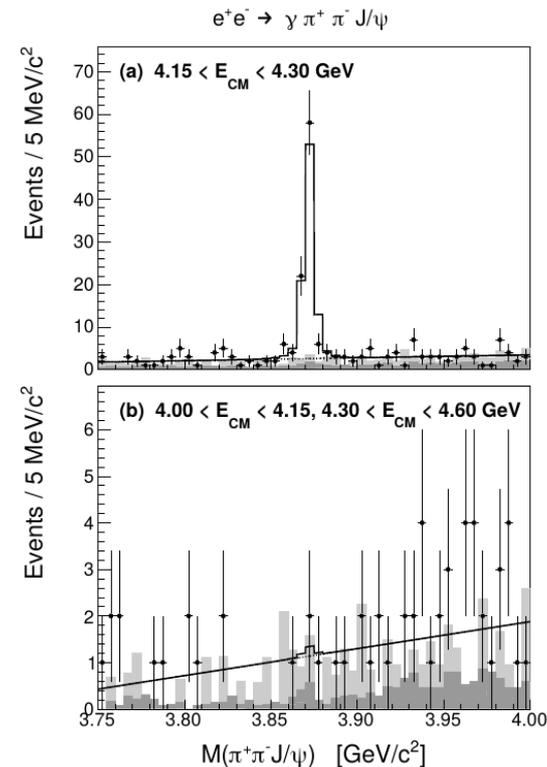
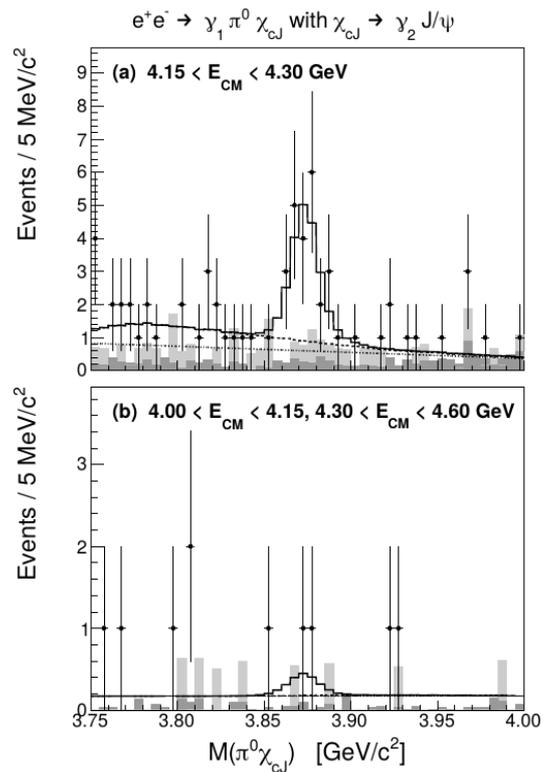
Observation of
 $e^+e^- \rightarrow \gamma X(3872)$, $X(3872) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi$

PRL 112, 092001 (2014)



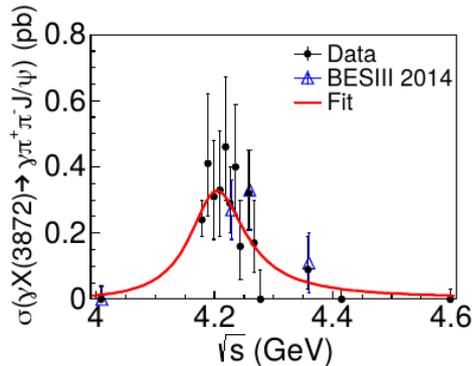
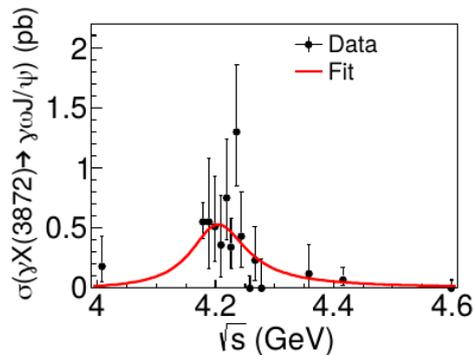
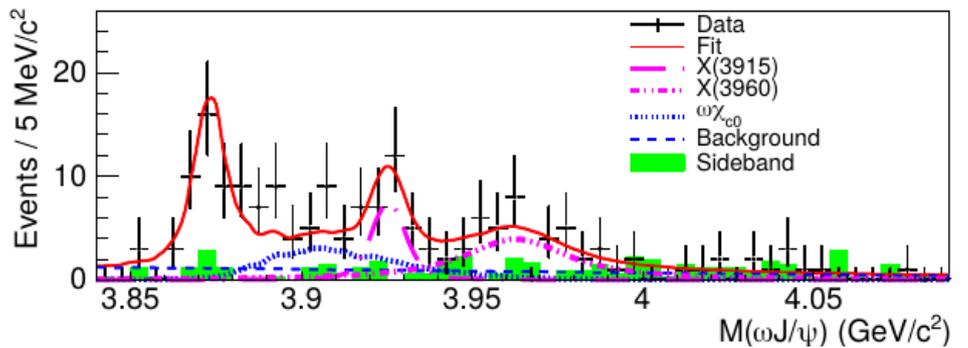
Observation of $X(3872) \rightarrow \pi^0 \chi_{c1}(1P)$

PRL 122, 202001 (2019)



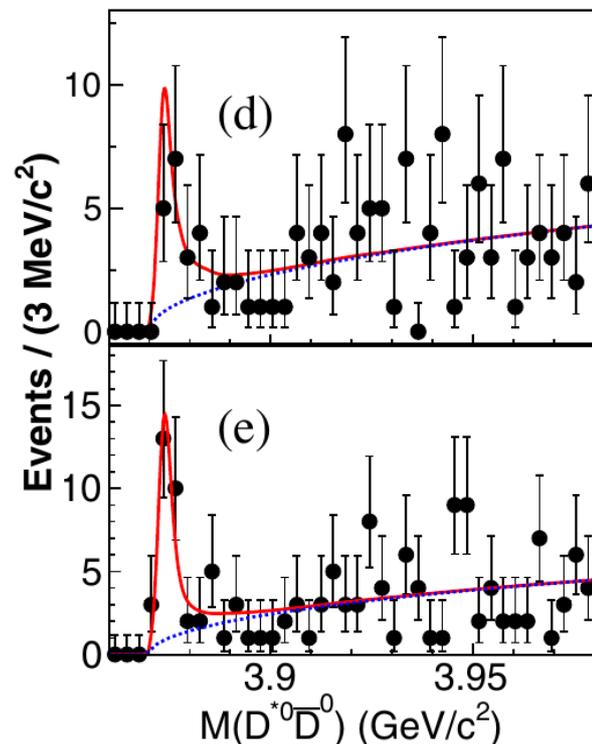
Observation of $X(3872) \rightarrow \omega J/\psi$

PRL 122, 232002 (2019)



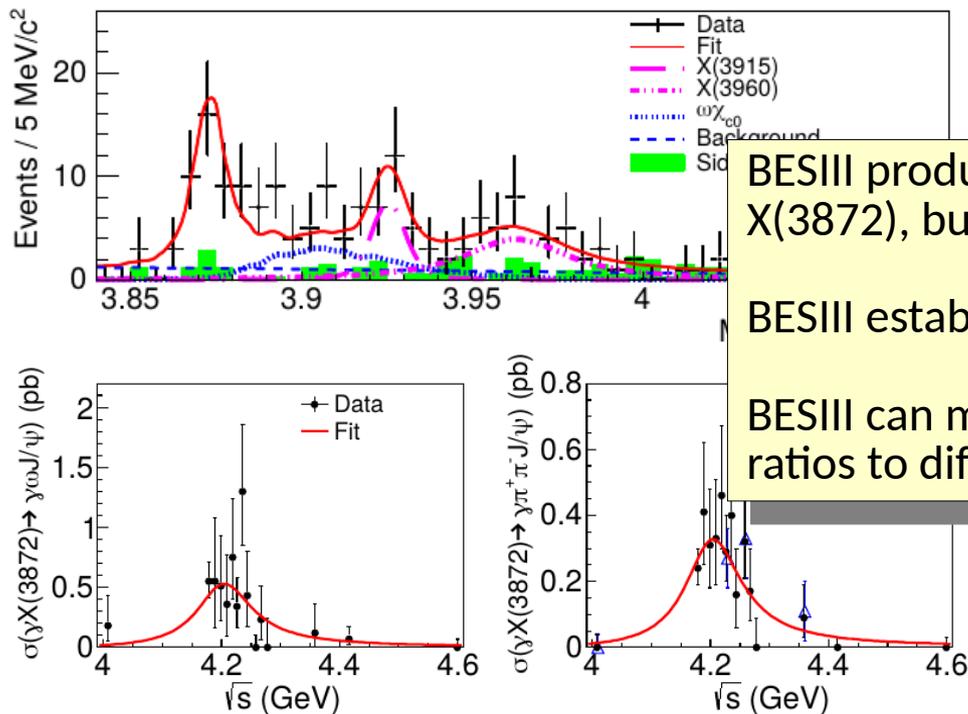
Observation of $X(3872) \rightarrow D^{*0} \bar{D}^0$

PRL 124, 242001 (2020)



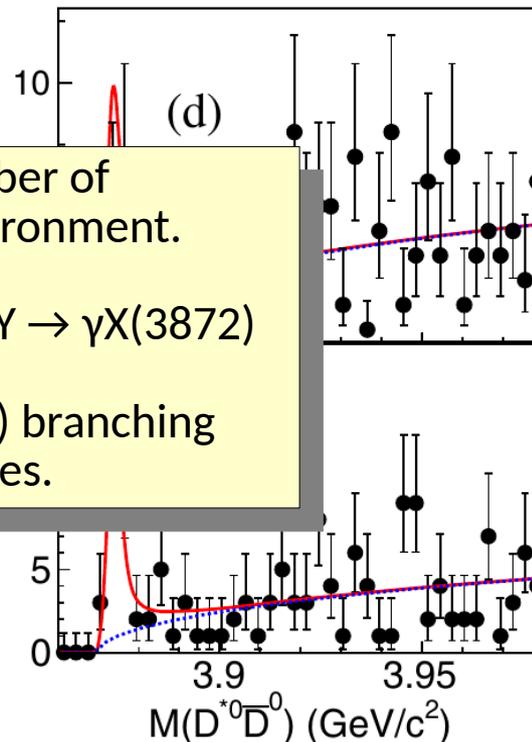
Observation of $X(3872) \rightarrow \omega J/\psi$

PRL 122, 232002 (2019)



$X(3872) \rightarrow D^{*0} \bar{D}^0$

PRL 124, 242001 (2020)



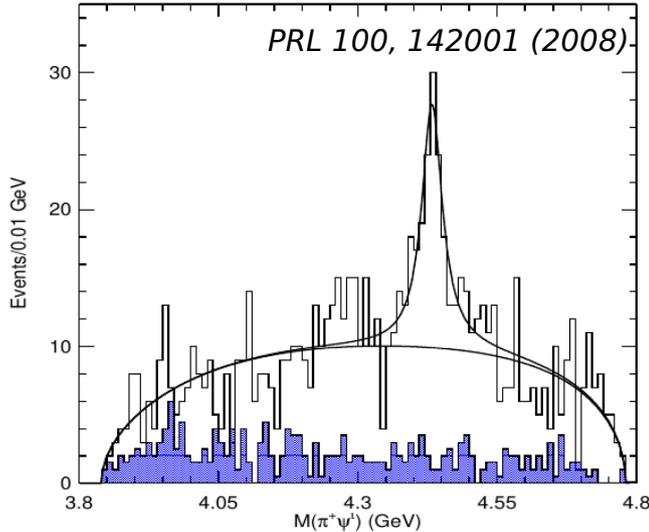
BESIII produces small number of $X(3872)$, but in a clear environment.

BESIII established $e^+e^- \rightarrow Y \rightarrow \gamma X(3872)$

BESIII can measure $X(3872)$ branching ratios to different final states.

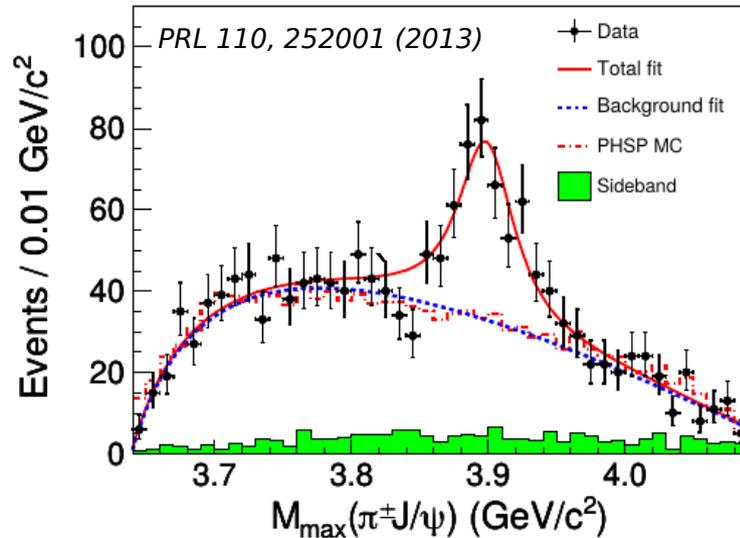
Z_c states

$$\bar{B}^0 \rightarrow \psi(2S)K^-\pi^+$$



- Discovered by Belle (2007)
- Confirmed by LHCb (2014)

$$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-J/\psi$$



- Discovered by BESIII (2013)
- Confirmed by Belle (2013)

$$M = 3899.0 \pm 3.6 \pm 4.9 \text{ MeV}/c^2$$

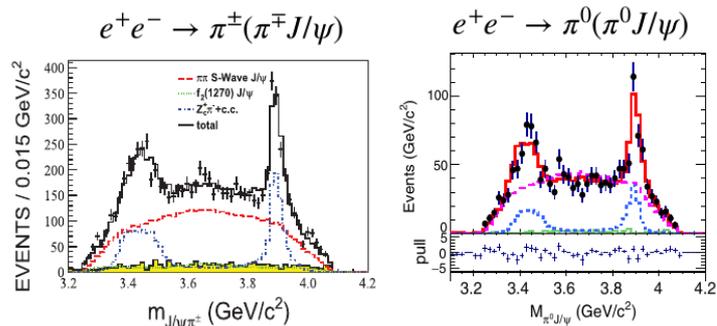
$$\Gamma = 46 \pm 10 \pm 20 \text{ MeV}$$

Z_c :

- carries electric charge
- couples to charmonia
- natural candidate for tetraquark or molecular state

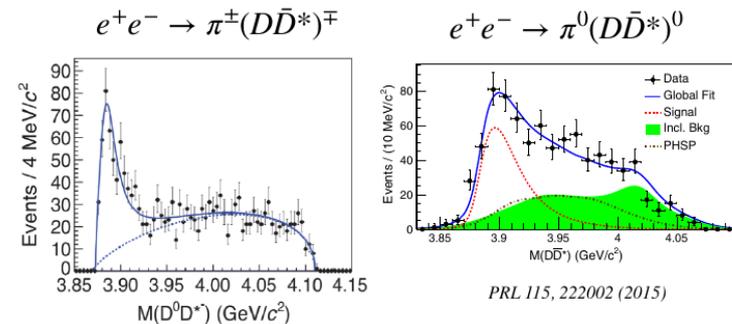
Z_c states at BESIII

$$e^+e^- \rightarrow \pi Z_c(3900)$$



PRL 119, 072001 (2017)

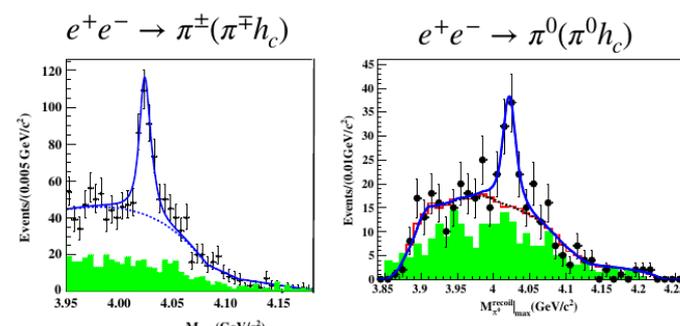
PRD 102, 012009 (2020)



PRL 112, 022001 (2014)

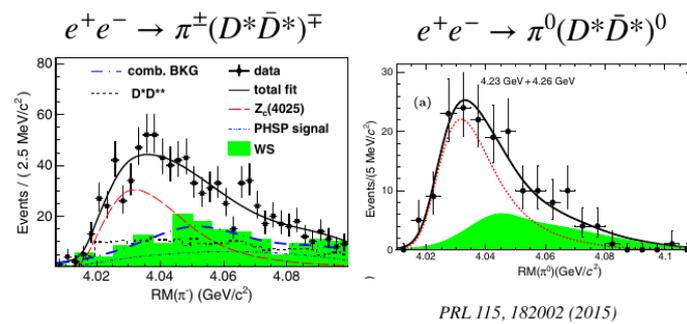
PRL 115, 222002 (2015)

$$e^+e^- \rightarrow \pi Z_c(4020)$$



PRL 111, 242001 (2013)

PRL 113, 212002 (2014)



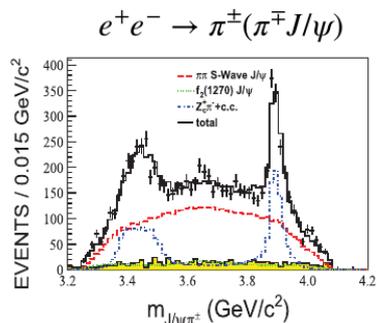
PRL 112, 132001 (2014)

PRL 115, 182002 (2015)

Slide by R. Mitchel,
Workshop on
Double-Charm
Tetraquark
November 22, 2021

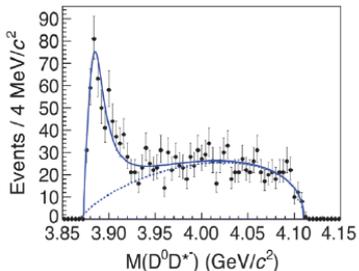
Z_c states at BESIII

$$e^+e^- \rightarrow \pi Z_c(3900)$$



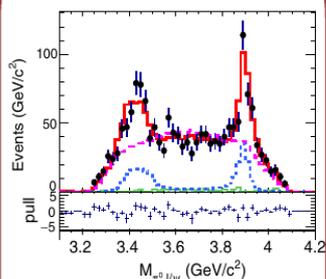
PRL 119, 072001 (2017)

$$e^+e^- \rightarrow \pi^\pm(D\bar{D}^*)^\mp$$



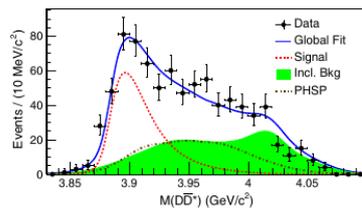
PRL 112, 022001 (2014)

$$e^+e^- \rightarrow \pi^0(\pi^0 J/\psi)$$



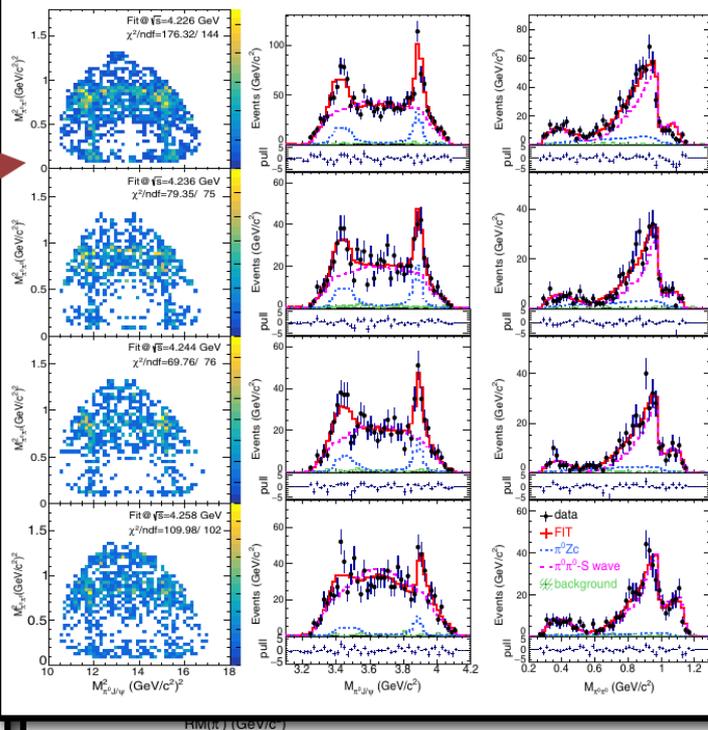
PRD 102, 012009 (2020)

$$e^+e^- \rightarrow \pi^0(D\bar{D}^*)^0$$



PRL 115, 222002 (2015)

Amplitude Analysis of $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi$



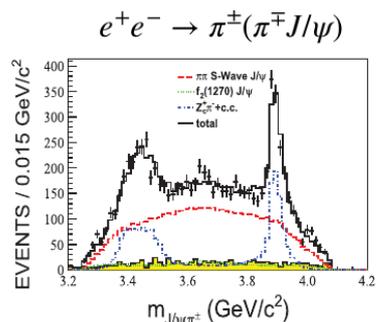
PRL 112, 132001 (2014)

PRL 115, 182002 (2015)

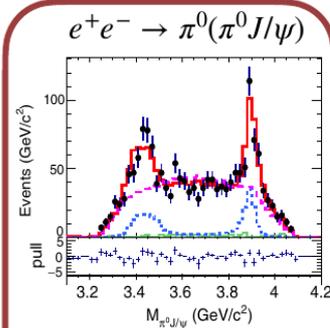
Slide by R. Mitchel,
Workshop on
Double-Charm
Tetraquark
November 22, 2021

Z_c states at BESIII

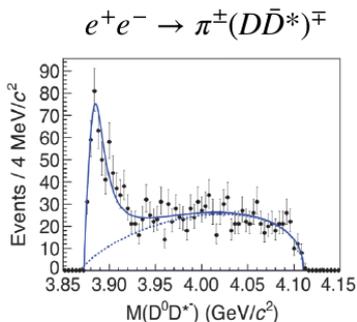
$$e^+e^- \rightarrow \pi Z_c(3900)$$



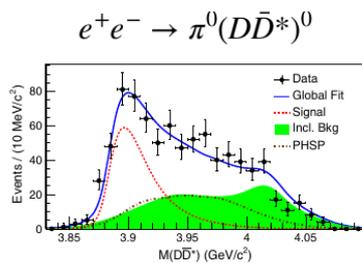
PRL 119, 072001 (2017)



PRD 102, 012009 (2020)

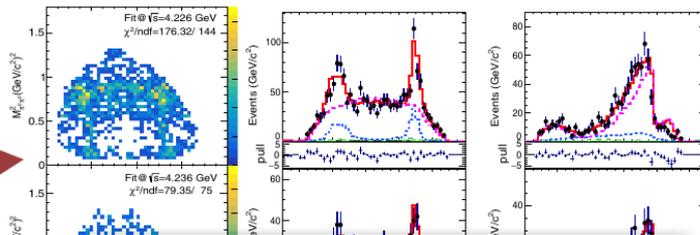


PRL 112, 022001 (2014)

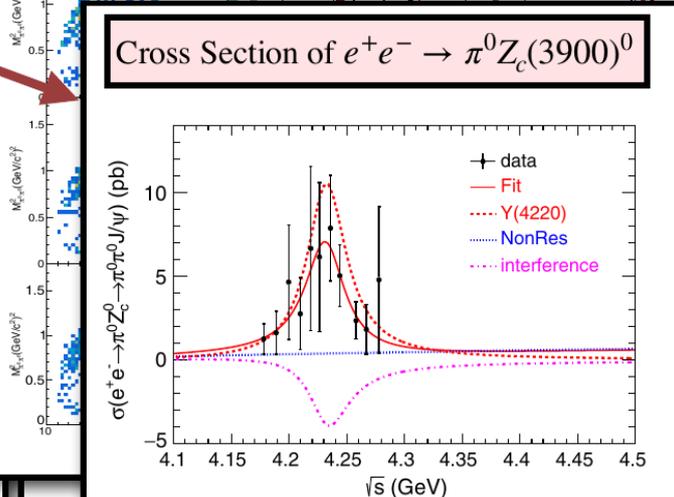


PRL 115, 222002 (2015)

Amplitude Analysis of $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi$



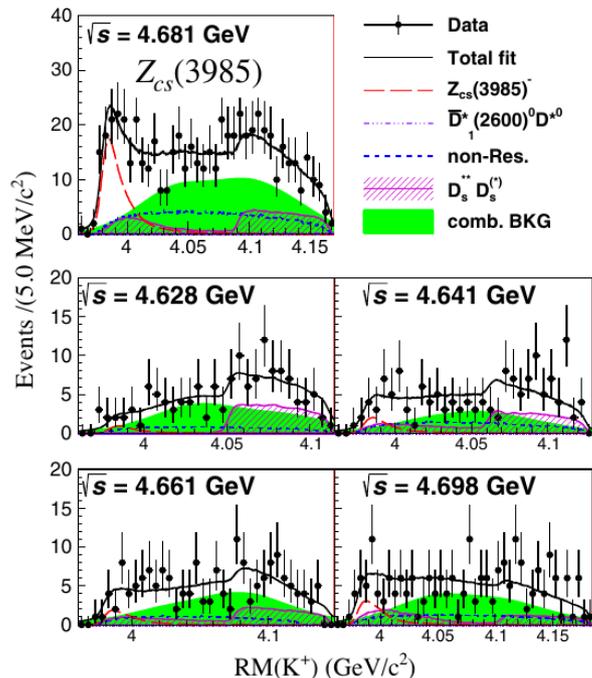
Cross Section of $e^+e^- \rightarrow \pi^0 Z_c(3900)^0$



Slide by R. Mitchel,
Workshop on
Double-Charm
Tetraquark
November 22, 2021

$$e^+e^- \rightarrow K^+(D_s^- D^{*0} + D_s^{*-} D^0)$$

PRL 126, 102001 (2021)



$Z_{CS}(3985)^-$

- significance 5.3σ
- minimal quark content $c\bar{c}s\bar{u}$

$Z_{CS}(3985)^0$

- significance 4.6σ
- minimal quark content $c\bar{c}s\bar{d}$

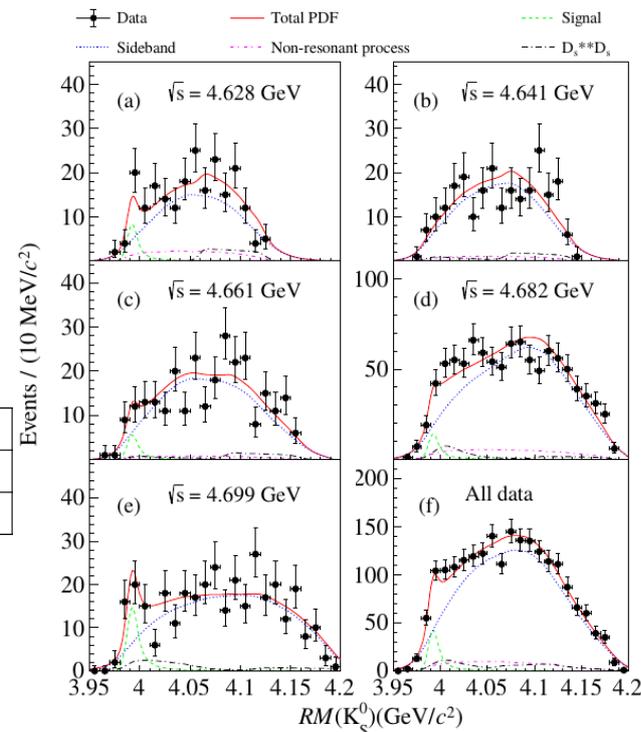
State	Mass (MeV/c^2)	Width (MeV)
$Z_{CS}(3985)^+$	$3985.2^{+2.1}_{-2.0} \pm 1.7$	$13.8^{+8.1}_{-5.2} \pm 4.9$
$Z_{CS}(3985)^0$	$3992.2 \pm 1.7 \pm 1.6$	$7.7^{+4.1}_{-3.8} \pm 4.3$

Compatible with SU(3) flavor symmetry.

Are they related to Y-sates?

$$e^+e^- \rightarrow K_S^0 (D_s^- D^{*+} + D_s^{*-} D^+)$$

PRL 129, 112003 (2022)



Hybrid states

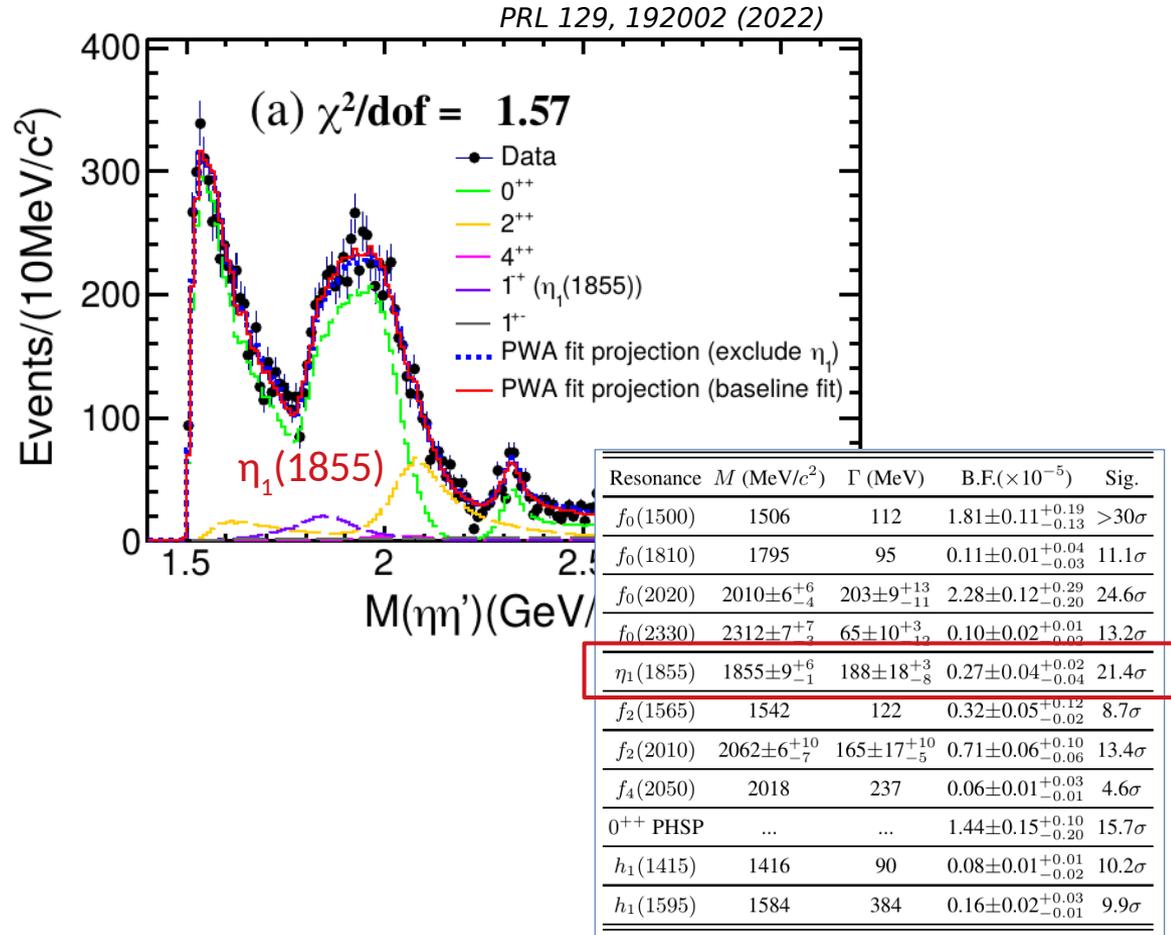
$\eta_1(1855)$ in radiative J/ψ decays to $\eta\eta'$

Hybrids

- the lightest hybrid state is believed to have exotic $1-+$ quantum numbers and mass $1.7 - 2.1$ GeV
- there are isovector candidates $\pi_1(1400)$, $\pi_1(1600)$, and $\pi_1(2015)$
- J/ψ radiative decays favor production of hybrid states

$\eta_1(1855)$ in J/ψ to $\eta\eta'$ at BESIII

- 10 billion** J/ψ decays analyzed
- a state with exotic quantum numbers **$1-+$** is observed with significance above **19σ**
- observation of isoscalar $1-+$ should help to establish hybrid multiplets



Search for glueball states

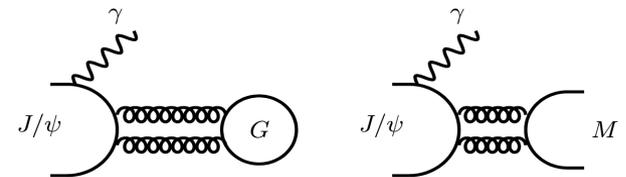
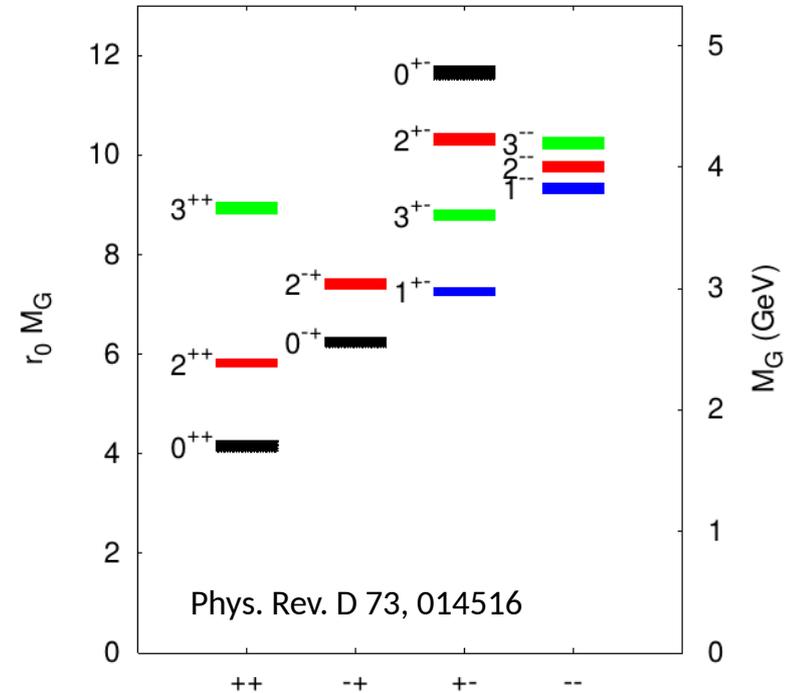
Глюболы

- Глюбол предсказан около 50 лет назад
- Существование глюбола предсказывается в большом количестве различных подходов к КХД
- Предсказания Quenched LQCD для массы глюбола:
 - скалярный (0^{++}): $\sim 1.5-1.7$ ГэВ
 - тензорный (2^{++}): $\sim 2.3-2.4$ ГэВ
 - псевдоскалярный (0^{-+}): $\sim 2.3-2.6$ ГэВ

Для скалярного глюбола:

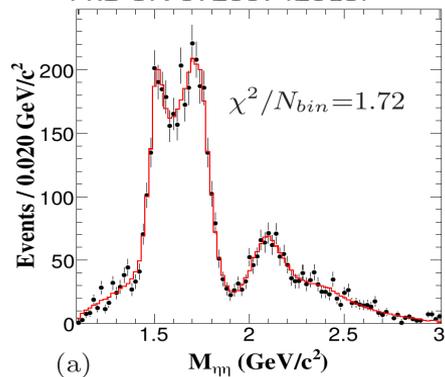
- Unquenched LQCD: $M=1795\pm 60$ МэВ
- Инстантонные вычисления для гамильтониана КХД в кулоновской калибровке: $M=1980$ МэВ
- Уравнения Дайсона-Швингера и Бете-Солпитера: $M=1850\pm 130$ МэВ
- дуальные модели: $M\sim 1920$ МэВ
- ...

Радиационные распады J/ψ идеально подходят для поиска глюболов.

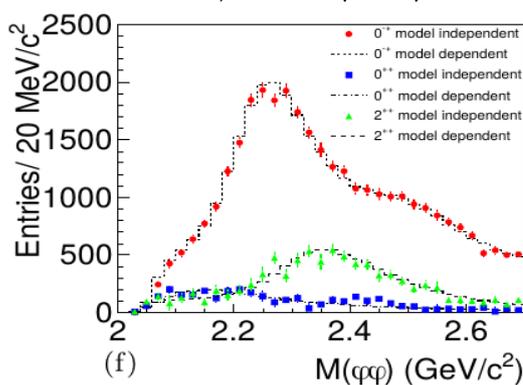


J/ψ → γPP, γVV at BESIII

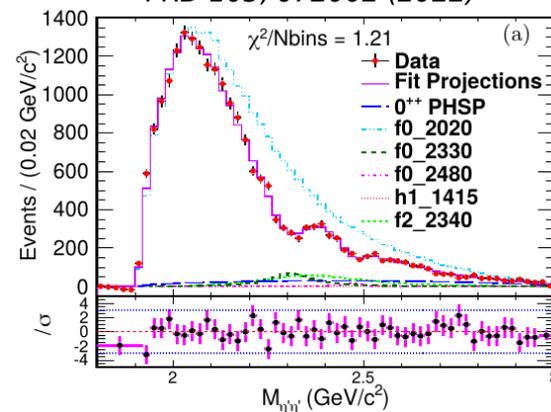
J/ψ → γηη
PRD 87, 092009 (2013)



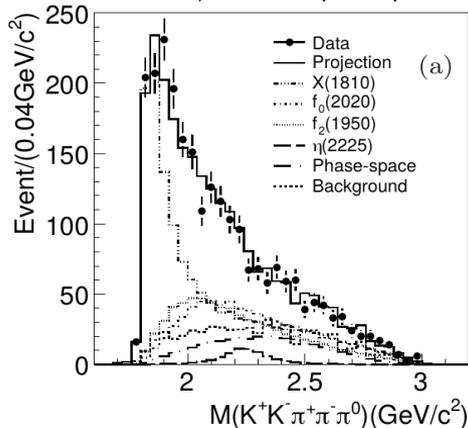
J/ψ → γφφ
PRD 93, 112011 (2016)



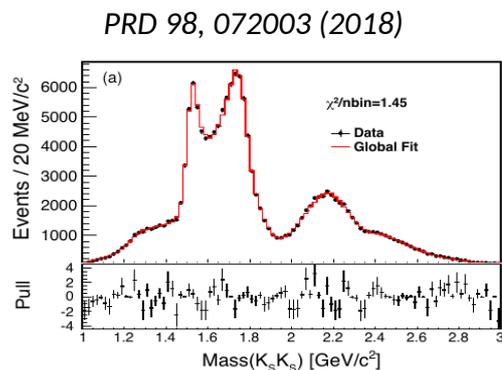
J/ψ → γη'η'
PRD 105, 072002 (2022)



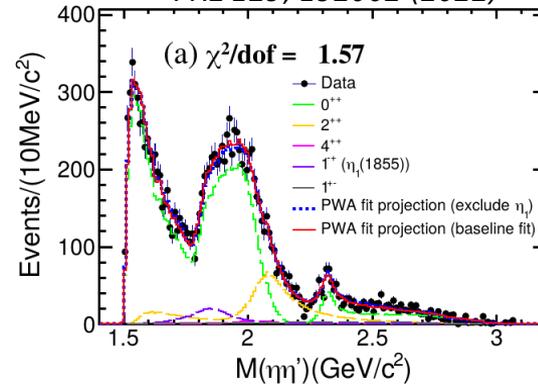
J/ψ → γωφ
PRD 87, 032008 (2013)



J/ψ → γK_S K_S
PRD 98, 072003 (2018)

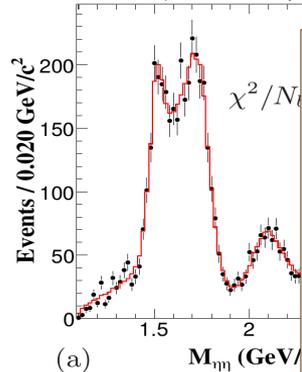


J/ψ → γηη'
PRL 129, 192002 (2022)



$J/\psi \rightarrow \gamma PP, \gamma VV$ at BESIII

$J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta$
PRD 87, 092009 (2013)

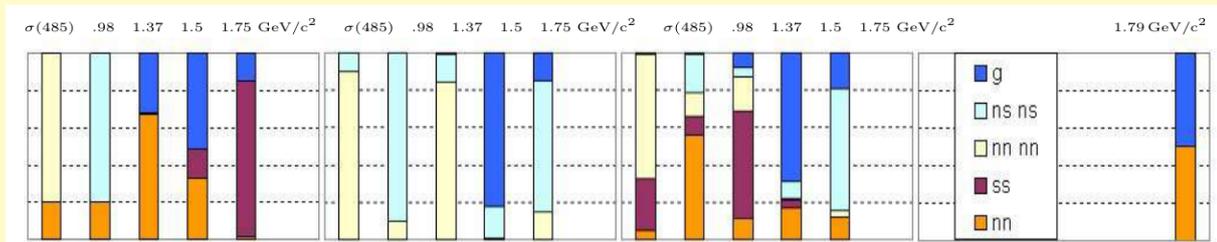


$J/\psi \rightarrow \gamma \phi \phi$
PRD 93, 112011 (2016)

$J/\psi \rightarrow \gamma \eta' \eta'$
PRD 105, 072002 (2022)

Problems:

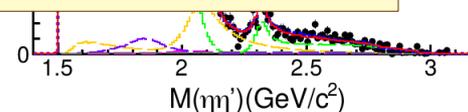
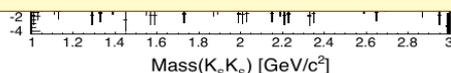
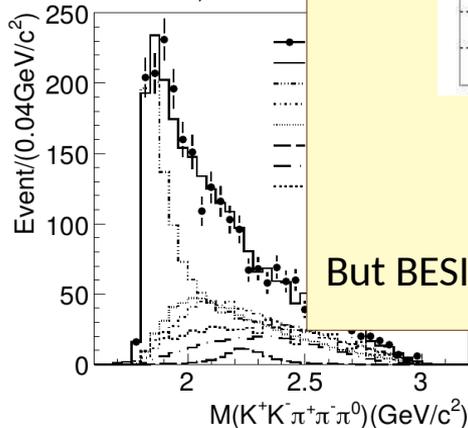
- single channel fit: fits are not constraint by other data
- piling-up BW functions violates unitarity
- poor understanding of f_0 meson spectra



Klemp, Zaitsev, 2007

But BESIII published partial wave intensities for $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0$ and $J/\psi \rightarrow \gamma K_S K_S$

$J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta'$
PRD 87, 032008



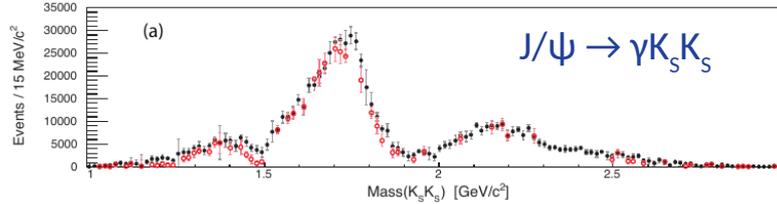
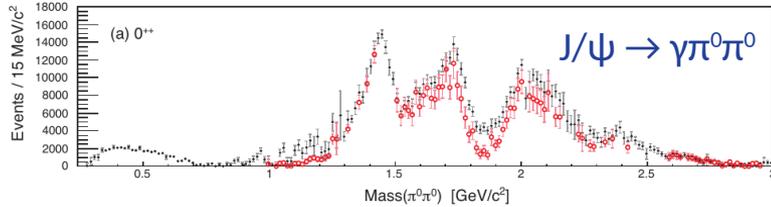
Combined N/D fit with $J/\psi \rightarrow \gamma PP$

Данные BESIII

Phys.Lett.B 816 (2021) 136227

PRD 92, 052003 (2015)

PRD 98, 072003 (2018)



а также

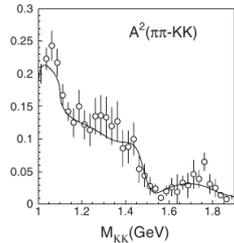
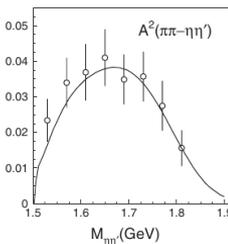
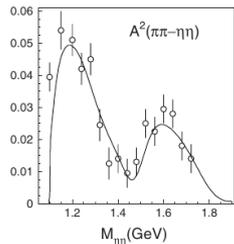
- $J/\psi \rightarrow \gamma \eta \eta$
- $J/\psi \rightarrow \gamma \omega \varphi$

PRD87, 092009(2013)

PRD87, 032008(2013)

другие данные как в предыдущем анализе Phys. Rev. D 84, 076001 (2011)

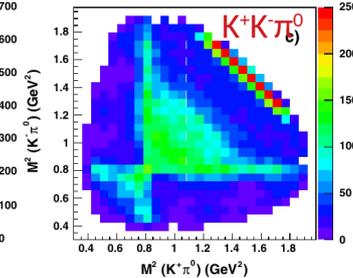
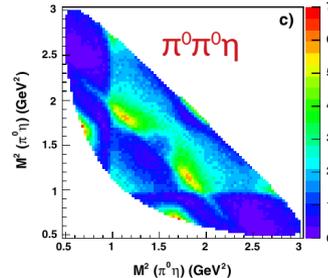
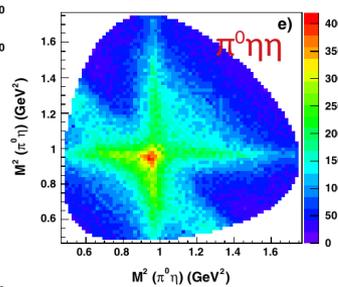
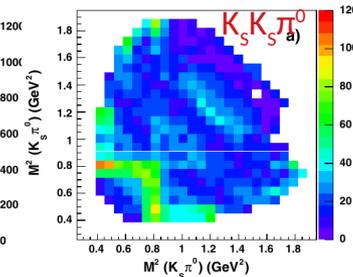
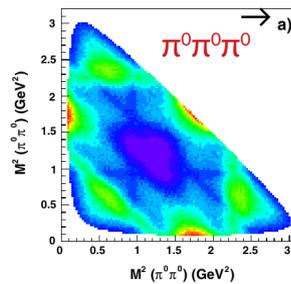
перерассеяние



Также

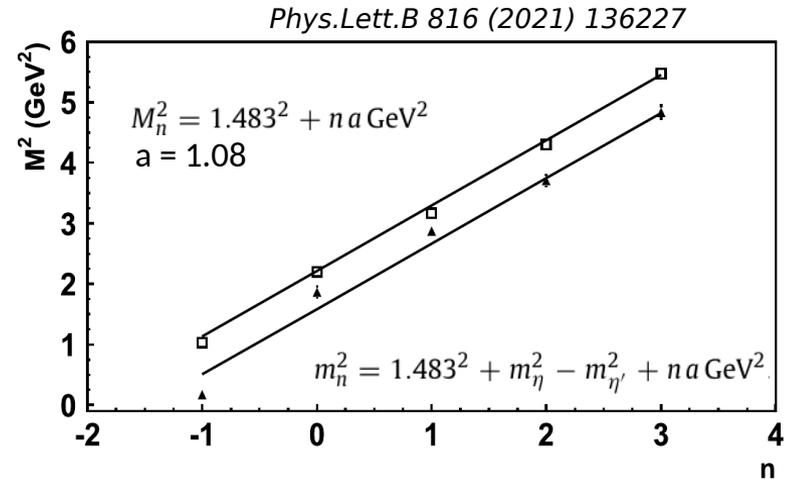
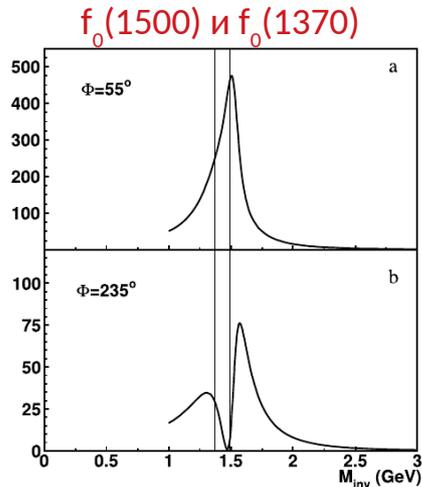
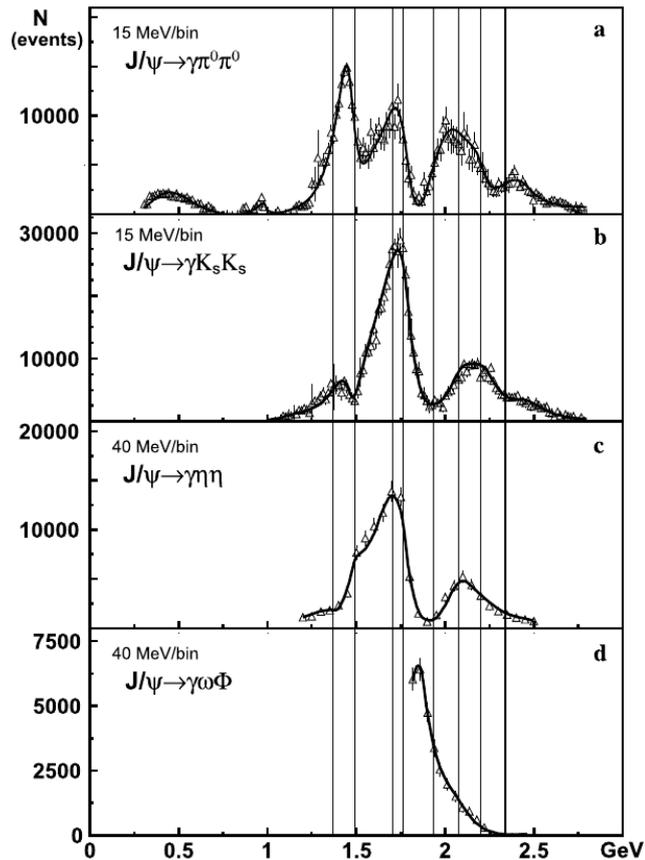
- $\pi\pi \rightarrow \pi^+\pi^-$, Cern-Munich
- $\pi\pi \rightarrow \pi^0\pi^0$, GAMS
- фаза упругого $\pi\pi$ рассеяния, K_{e4}

$\bar{p}p$ (жидкая мишень)



+ $\bar{p}p$ аннигиляция (газовая мишень)
и $p\bar{p}$ аннигиляция

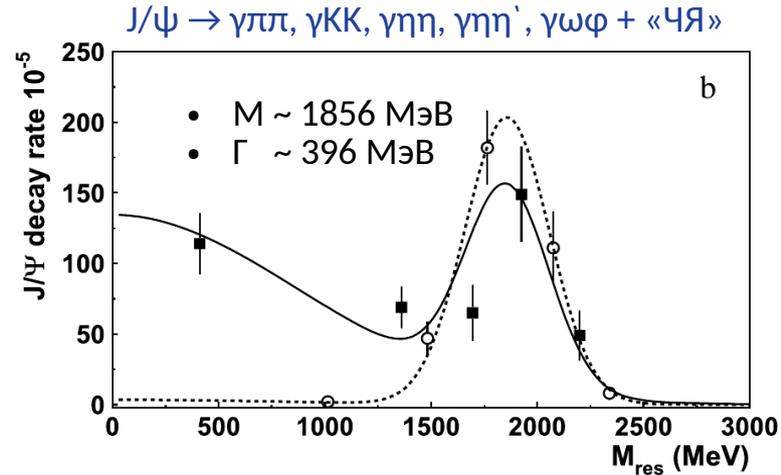
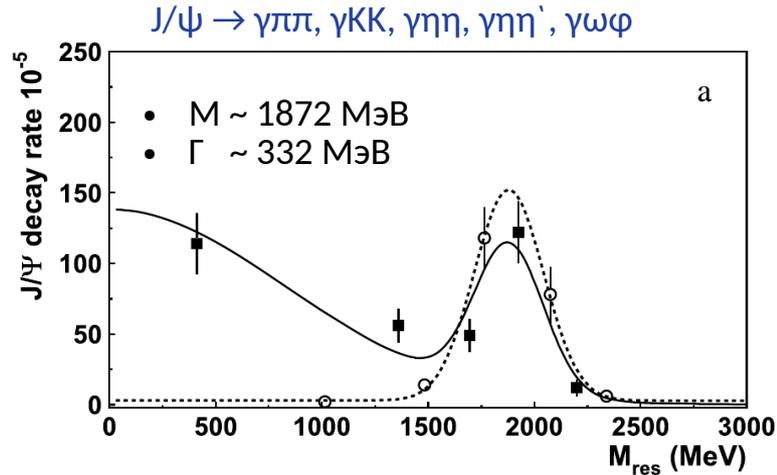
J/ψ → γPP. Флейворная структура



- Флейворные синглет и октет:
 - ▷ $\frac{1}{\sqrt{3}}(u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s})$
 - ▷ $\frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s})$
- Пары ($f_0(1370)$, $f_0(1500)$) и ($f_0(1710)$, $f_0(1770)$) разная интерференция в лл и КК
- Oller, 2003: угол смешивания для $f_0(500)$ и $f_0(980)$ составляет $(19 \pm 5)^\circ$
- **Интерпретация:** $f_0(500)$, $f_0(1370)$, $f_0(1710)$, $f_0(2020)$ и $f_0(2200)$ – преимущественно **синглетные** состояния, $f_0(980)$, $f_0(1500)$, $f_0(1770)$, $f_0(2100)$ $f_0(2330)$ – преимущественно **октетные**.
- $J/\psi \rightarrow \gamma \omega \phi$: тетракварковая компонента в $f_0(1770)$

J/ψ → γPP. Парциальные ширины рождения мезонов

Phys.Lett.B 816 (2021) 136227



Наилучшая оценка $M_G = (1865 \pm 25^{+10}_{-30})$ MeV $\Gamma_G = (370 \pm 50^{+30}_{-20})$ MeV

Непертурбативный подход	Работа	Предсказания массы глюбола (МэВ)
Unquenched LQCD	JHE1210, 170(2012)	1795±60
Инстантонные вычисления	PLB577,61(2003)	~1980
Уравнение Дайсона-Швингера и Бете-Солпетера	EPJC80,1077(2020)	1850±130
Дуальные модели	PRD104,034016(2021)	~1920

Парциальная ширина рождения

$$B_{J/\psi \rightarrow \gamma G} = (5,8 \pm 1,0) \times 10^{-3}$$

Решеточные вычисления

(PRL110, 021601 (2013))

$$B_{J/\psi \rightarrow \gamma G} = (3,8 \pm 0,9) \times 10^{-3}$$

Избранные результаты LHCb

Выделение первичных и вторичных вершины / распределение по времени распада / первичные и вторичные очарованные адроны

Точка взаимодействия протонов

Особенность сечения рождения очарованных и прелестных адронов на БАК: такие адроны вылетают преимущественно в область малых углов

$$\sigma(IP) \approx 20 \mu\text{m}$$
$$\delta p/p = 0.4 - 0.6 \%$$
$$\epsilon_{track} > 96 \%$$

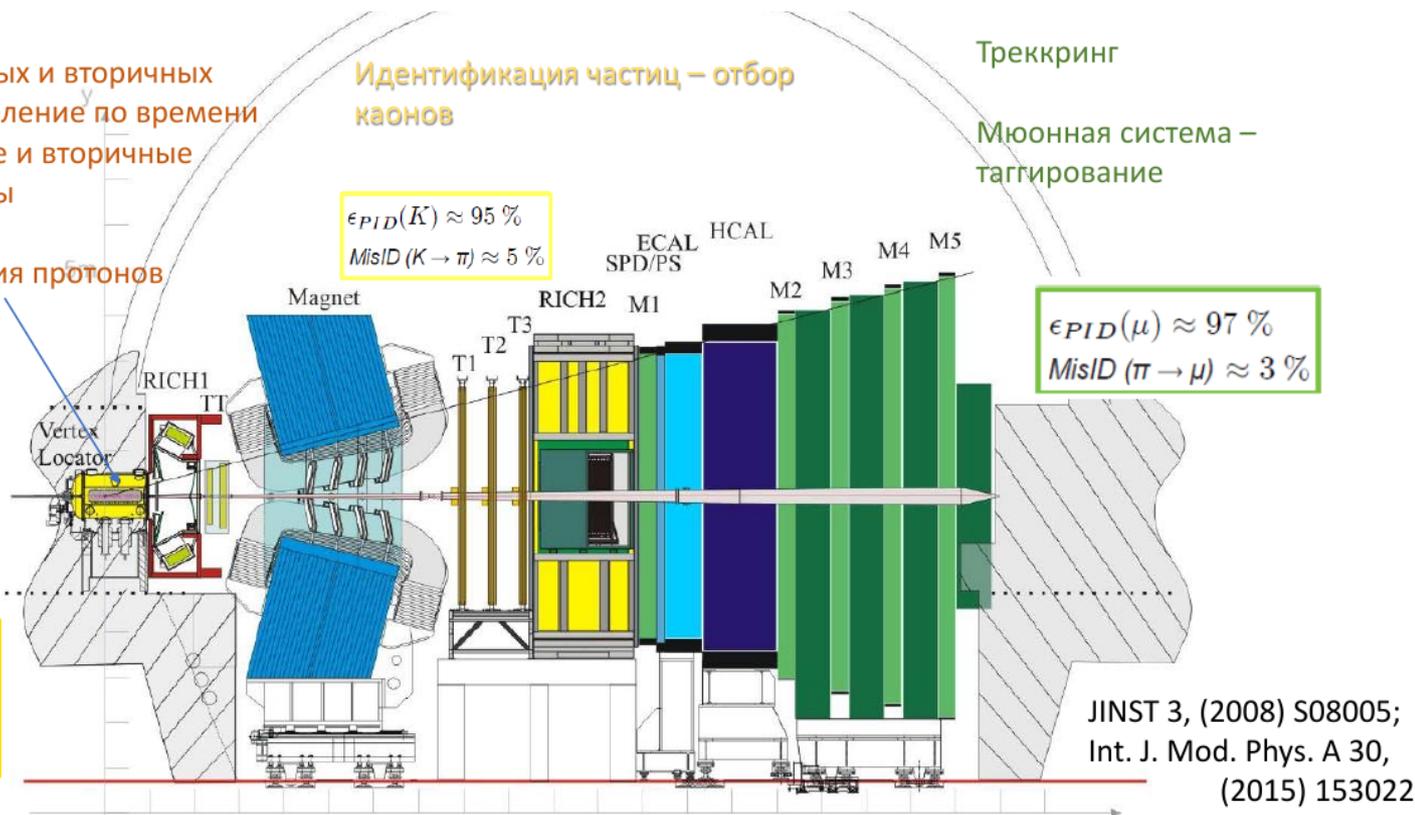
Идентификация частиц – отбор каонов

$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95 \%$$
$$MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5 \%$$

Треккинг

Мюонная система – таггирование

$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97 \%$$
$$MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3 \%$$



Слайд: А. Дзюба

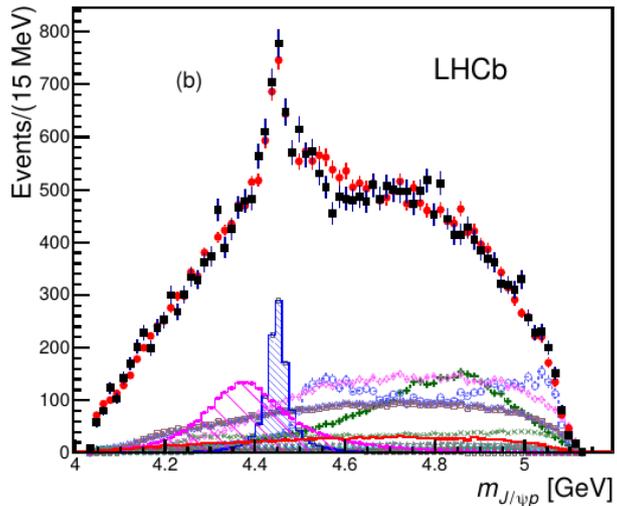
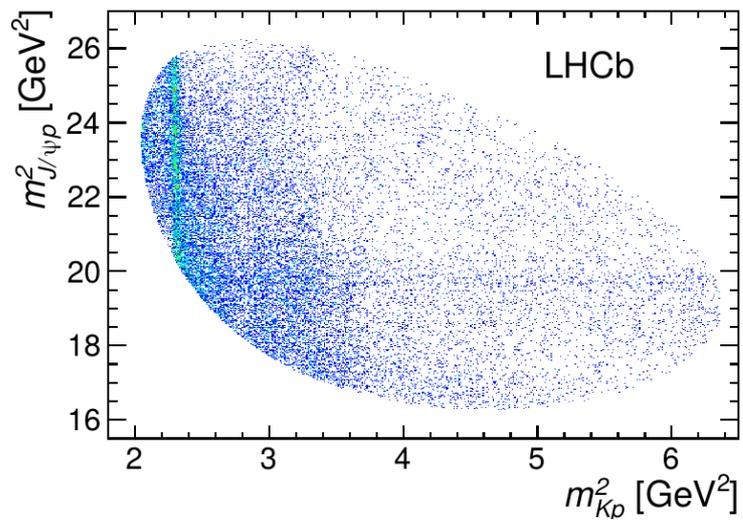
- Тетракварки предлагается обозначать буквой T , а пентакварки буквой P ;
- К этим символам должны добавляться:
 - верхние и нижние индексы,
 - масса (в скобках, в единицах $\text{МэВ}/c^2$),
 - электрический заряд (верхний индекс после массы);
- Верхним индексом обозначается изотопический спин состояния, а также четность и G -четность, причем обозначения соответствуют мезонным и барионным состояниям
- Нижний индекс описывает кварковый состав экзотического адрона.
 - Символы Y , ψ и ϕ добавляются для состояний со скрытой прелестью, очарованием и странностью, соответственно.
 - Символы b , c и s добавляются для состояний с открытой прелестью, очарованием и странностью.
 - Для тетракварков в нижний индекс добавляется также значение спина адрона.

$T_{c\bar{s}0}^a(2900)^{++}$

Pentaquarks

$P_\psi(4380)$ and $P_\psi(4450)$

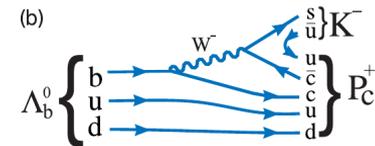
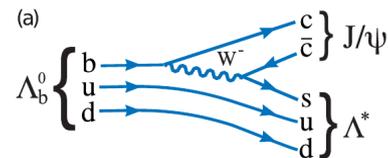
Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 072001



Run 1 data:

- two states $P_\psi(4380)$ and $P_\psi(4450)$ observed in $J/\psi p$ invariant mass spectrum;
- opposite parity and spins 3/2 and 5/2 are preferred

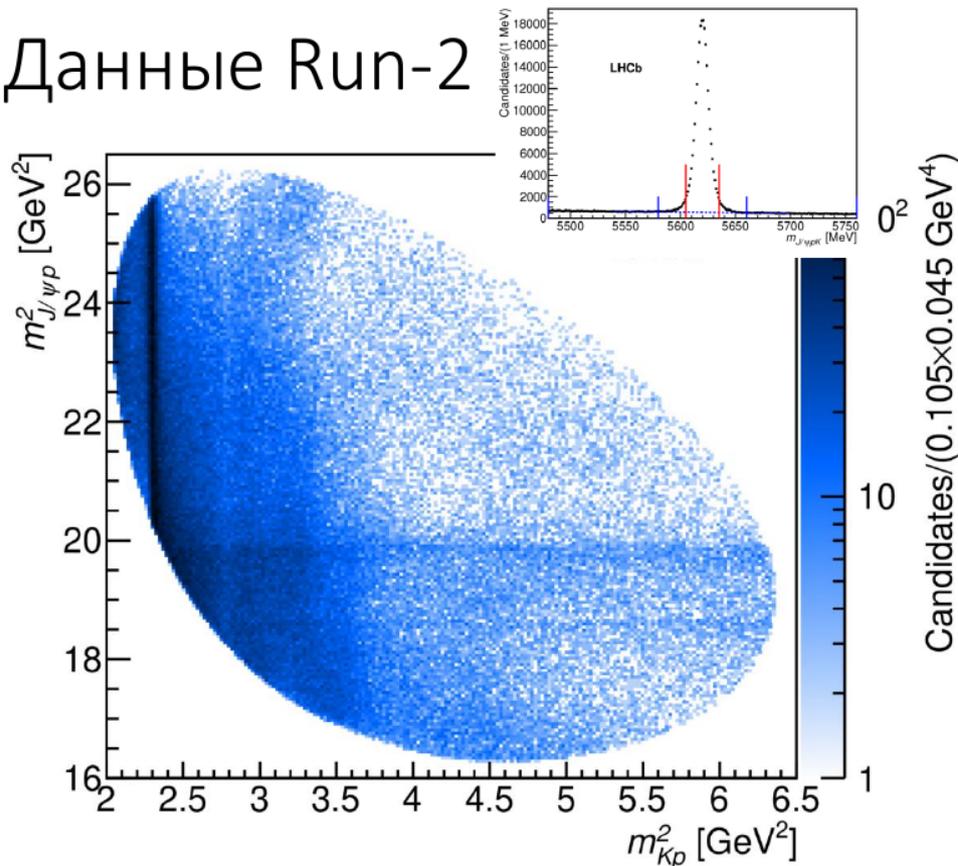
State	Mass (MeV)	Width (MeV)	Fit fraction (%)	Significance
$P_c(4380)^+$	$4380 \pm 8 \pm 29$	$205 \pm 18 \pm 86$	$8.4 \pm 0.7 \pm 4.2$	9σ
$P_c(4450)^+$	$4449.8 \pm 1.7 \pm 2.5$	$39 \pm 5 \pm 19$	$4.1 \pm 0.5 \pm 1.1$	12σ



$P_\psi(4312)$ and $P_\psi(4450)$ split to two states

PAPER-2019-014
arXiv:1904.03947

Данные Run-2

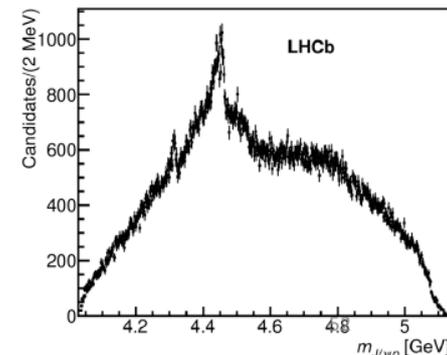


Статистика в Run-2 увеличена в 9 раз (относительно Run-1):

Улучшение отбора данных (x2),
интегральная светимость (x3) и
увеличившееся сечение (x1.5)

246k Λ_p сигнал \ 6.4% фон

Разрешение по массе $J/\psi p$ 2.3-
2.7 MeV (RMS) для диапазона 4.3-
4.6 GeV



17.03.2023

А.Дзюба @ Зимняя школа ПИЯФ

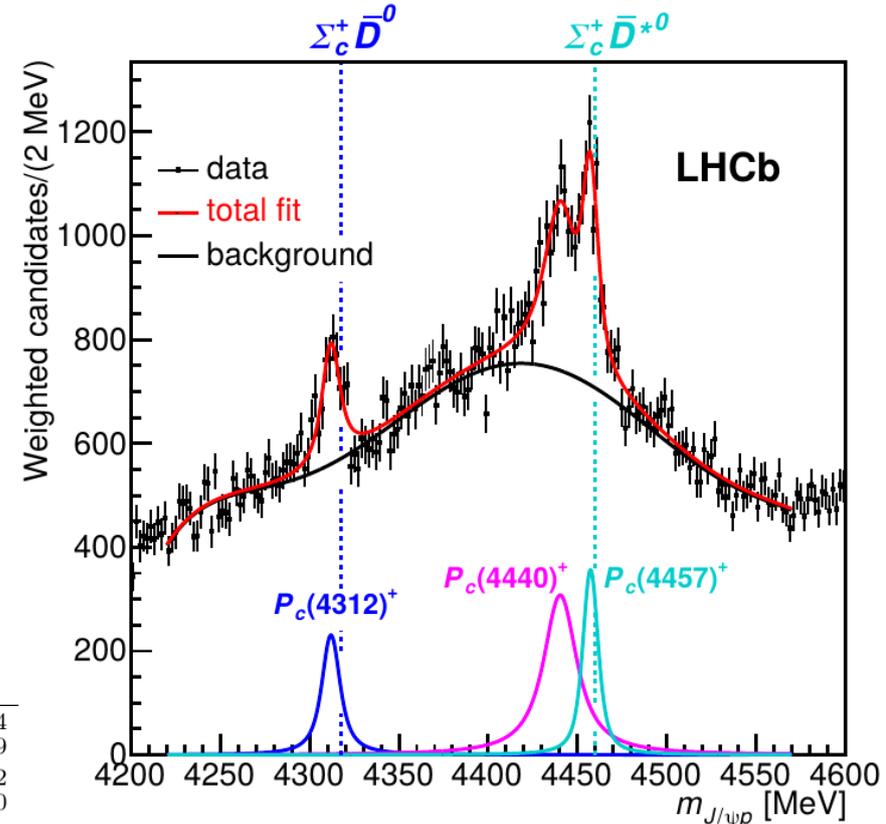
$P_\psi(4312)$ and $P_\psi(4450)$ split to two states

Phys. Rev. Lett. 122, 222001 (2019)

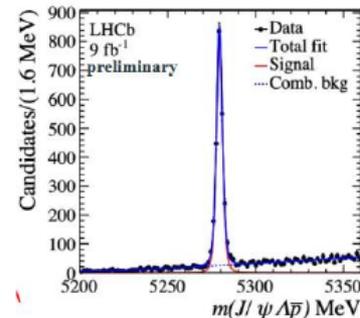
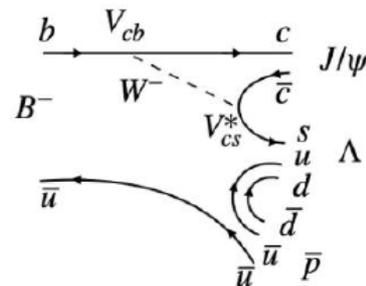
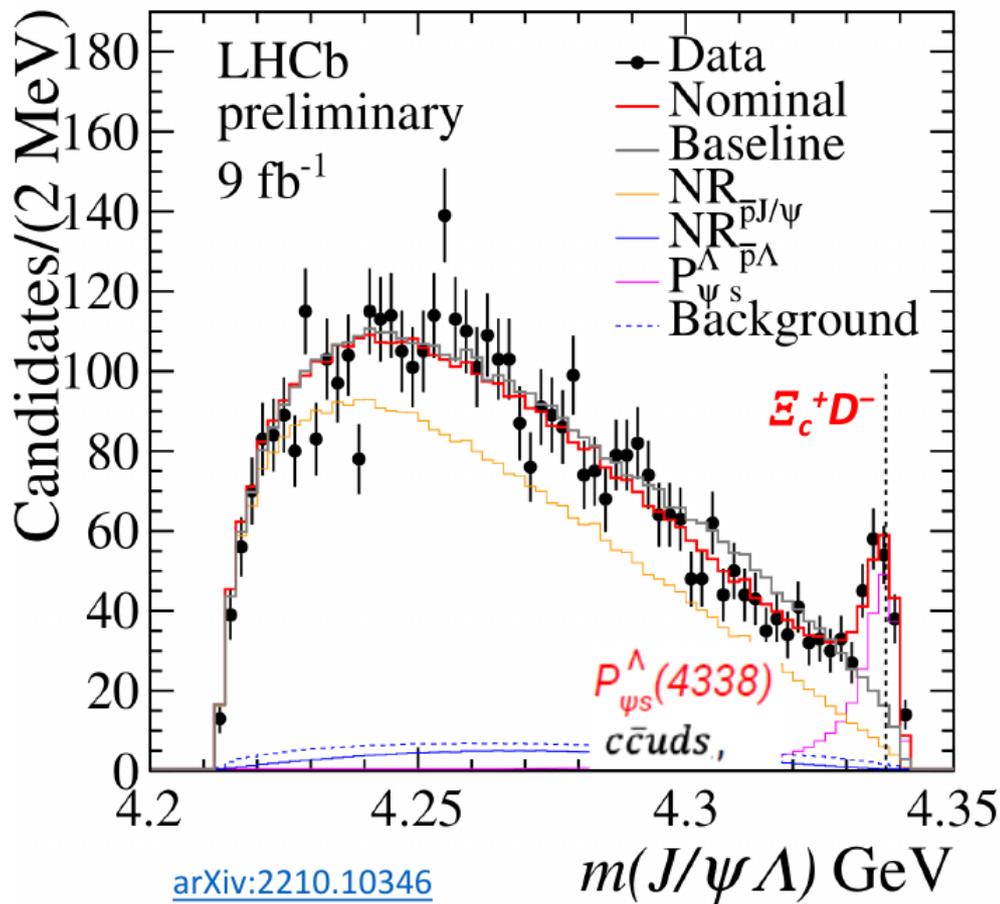
Run 2 data:

- fit of the $M(J/\psi p)$ line shape, **not the amplitude analysis**
- a new state $P_\psi(4312)$ is observed in $J/\psi p$ invariant mass spectrum;
- $P_\psi(4450)$ splits to two narrow overlapping peaks $P_\psi(4440)$ and $P_\psi(4457)$
- Confirmation of $P_\psi(4380)$ requires full amplitude analysis

State	M [MeV]	Γ [MeV]	(95% CL)	\mathcal{R} [%]
$P_c(4312)^+$	$4311.9 \pm 0.7^{+6.8}_{-0.6}$	$9.8 \pm 2.7^{+3.7}_{-4.5}$	(< 27)	$0.30 \pm 0.07^{+0.34}_{-0.09}$
$P_c(4440)^+$	$4440.3 \pm 1.3^{+4.1}_{-4.7}$	$20.6 \pm 4.9^{+8.7}_{-10.1}$	(< 49)	$1.11 \pm 0.33^{+0.22}_{-0.10}$
$P_c(4457)^+$	$4457.3 \pm 0.6^{+4.1}_{-1.7}$	$6.4 \pm 2.0^{+5.7}_{-1.9}$	(< 20)	$0.53 \pm 0.16^{+0.15}_{-0.13}$



Новое пентакварковое состояние $P_{\psi_s}^{\Lambda}(4338)^0$



- 4600 событий-кандидатов
- Пик в распределении $J/\psi\Lambda$
- Значимость $>10\sigma$
- Нельзя объяснить $K^{*}_{2,3,4}$

$$M_{P_{\psi_s}^{\Lambda}} = 4338.2 \pm 0.7 \pm 0.4 \text{ MeV}$$

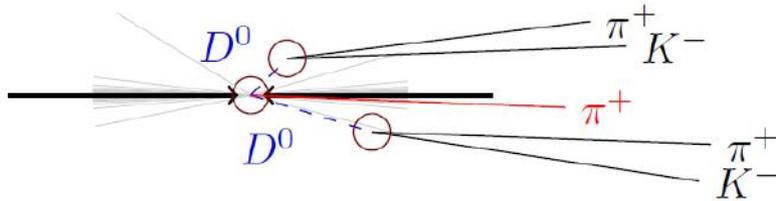
$$\Gamma_{P_{\psi_s}^{\Lambda}} = 7.0 \pm 1.2 \pm 1.3 \text{ MeV} \quad J^P = 1/2^-$$

Слайд: А. Дзюба

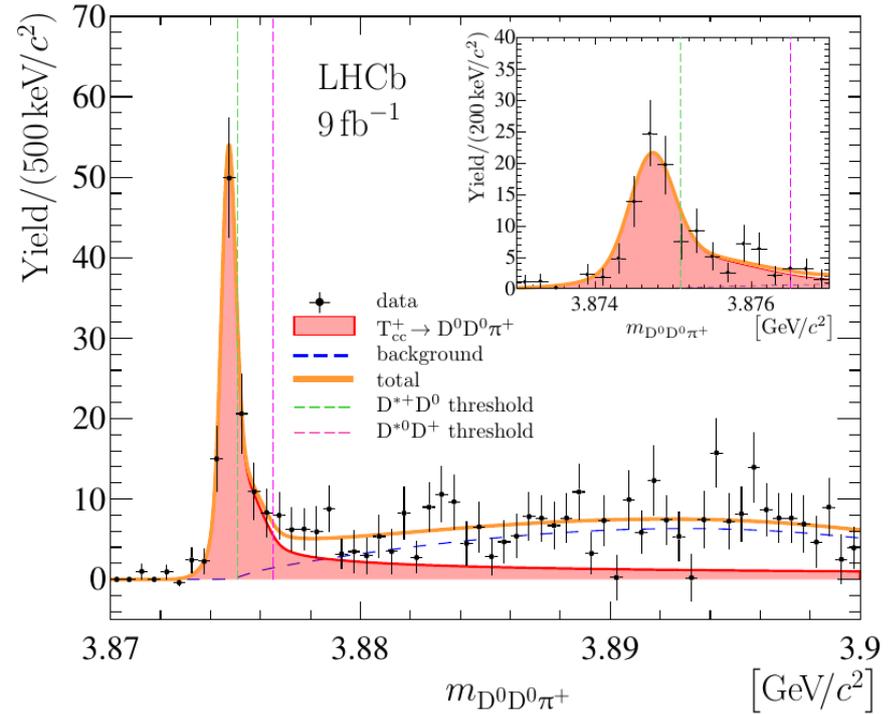
Doubly charmed tetraquark

Тетракварк с двойным очарованием (T_{cc}^+)

Nature Communications, 13, 3351 (2022)



- Узкий резонанс обнаружен в системе $D^0 D^0 \pi^+$ мезонов.
- Экзотический резонанс с двойным очарованием имеет массу чуть ниже порога $D^{*+} D^0$ масс и минимальный кварковый состав $ccud$.



Спектр масс системы $D^0 D^0 \pi^+$ и его аппроксимация. На врезке показана область сигнала от распадов T_{cc}^+ . Вертикальные линии обозначают кинематические пороги для пар $D^+ D^{*0}$ и $D^0 D^{*+}$

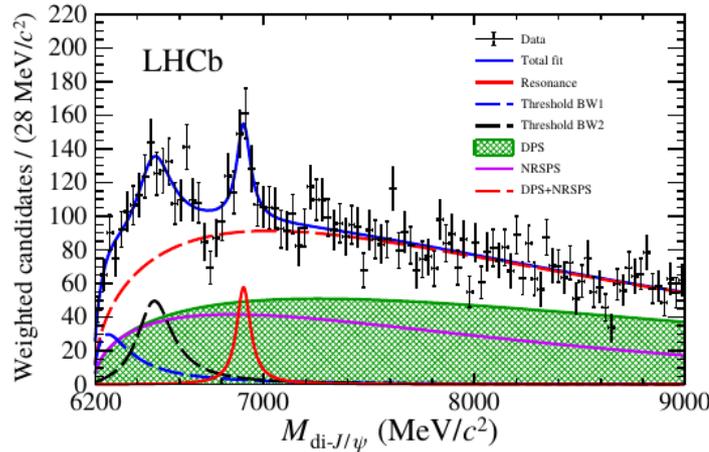
48

Слайд: А. Дзюба

Tetraquark with double hidden charm

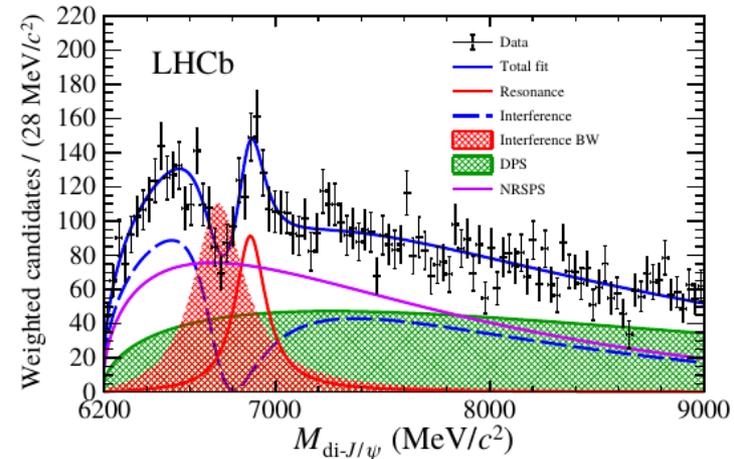
Science Bulletin 65 (2020) 1983

- A narrow structure $T_{\psi\psi}(6900)$ in $M(J/\psi J/\psi)$ is observed
- notable p_T dependence
- The data fitted under two assumptions:
 - 3 resonance fit
 - interference between $T_{\psi\psi}(6900)$ and NRSPS



$$m[X(6900)] = 6905 \pm 11 \pm 7 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Gamma[X(6900)] = 80 \pm 19 \pm 33 \text{ MeV},$$



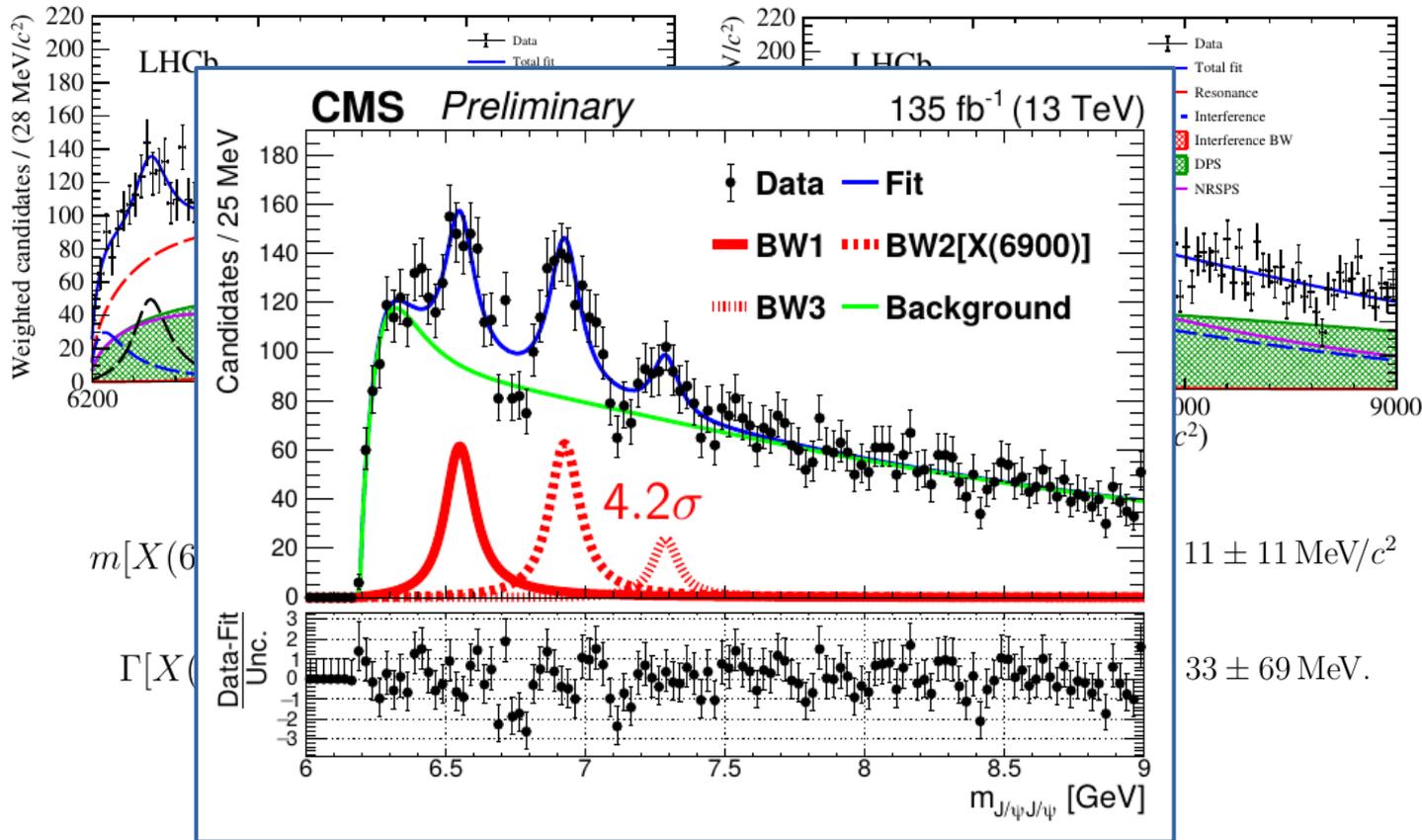
$$m[X(6900)] = 6886 \pm 11 \pm 11 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Gamma[X(6900)] = 168 \pm 33 \pm 69 \text{ MeV}.$$

$T_{\psi\psi}(6900)$

Science Bulletin 65 (2020) 1983

- A narrow structure $T_{\psi\psi}(6900)$ in $M(J/\psi J/\psi)$ is observed
- notable p_T dependence
- The data fitted under two assumptions:
 - 3 resonance fit
 - interference between $T_{\psi\psi}(6900)$ and NRSPS



- В адронной спектроскопии за последние 20 лет получен большой набор новых **неожиданных** результатов. К настоящему моменту не получена их надежная интерпретация
- Эта область ФВЭ в ближайшее время будет активно развиваться как со стороны теории, так и со стороны эксперимента. Возможно, эти результаты будут ключом к улучшению нашего понимания КХД в режиме сильной связи.

Спасибо за внимание!