

Изучение лёгких состояний.

Ачасов М.Н.

ИЯФ СО РАН

Введение.

На супер c – τ фабрике должно быть произведено много $c\bar{s}$ мезонов с массой меньше, чем $2m_D$.

В частности, количество J/ψ составит 1 000 000 000 000 штук.

$J/\psi \rightarrow \gamma^* \rightarrow$ адроны, $J/\psi \rightarrow 3g$, $J/\psi \rightarrow \gamma gg$ (88%)

Такие $c\bar{s}$ мезоны будут распадаться в адроны, состоящие из лёгких u , d и s кварков.

Таким образом, выбирая моды распадов $c\bar{s}$ мезонов, можно изучать лёгкие состояния с практически любыми квантовыми числами.

Лёгкие адроны ($q\bar{q}$ мезоны).

«Кварковая модель».

Мезоны – $q\bar{q}$ состояния, $q = u, d, s$ с квантовыми числами:

$$J^{PC} = 0^{++}, 0^{-+}, 1^{++}, 1^{-}, 1^{+-}, \dots$$

Образуют нонеты.

Примеры нонетов:

| $N^{2S+1}L_J$ | J^{PC} | $I=1$ $u\bar{d}, d\bar{u},$ $(d\bar{d}-u\bar{u})/\sqrt{2}$ | $I=1/2$ $u\bar{s}, s\bar{u},$ $d\bar{s}, s\bar{d}$ | $I=0$ $\cos\alpha(-s\bar{s})+$ $+\sin\alpha(u\bar{u}+d\bar{d})/\sqrt{2}$ | $I=0$ $\sin\alpha(-s\bar{s})+$ $+\cos\alpha(u\bar{u}+d\bar{d})/\sqrt{2}$ |
|---------------|----------|--|--|--|--|
| 1^1S_0 | 0^{-+} | $\pi(140)$ | $K(500)$ | $\eta(550)$ | $\eta'(960)$ |
| 1^3S_1 | 1^{-} | $\rho(770)$ | $K^*(890)$ | $\phi(1020)$ | $\omega(780)$ |
| 1^3S_1 | 1^{+-} | $b_1(1235)$ | $K_1(1270)$ | $h_1(1380)$ | $h_1(1170)$ |
| 2^3S_0 | 0^{-+} | $\pi(1300)$ | $K(1430)$ | $\eta(1295)$ | $\eta'(1440)$ |

Мезоны, которые не укладываются в «кварковую модель», называется «экзотическими».

Экзотические адроны (глюболы G).

G – связанное состояние 2х gg или 3х ggg глюонов.

Кандидаты в G с «экзотическими»
квантовыми числами

$J^{PC} = 0^{-}, 0_{-}^{+-}, 1^{-+}, 2^{+-}, 3^{-+}$, которые невозможны для $q\bar{q}$ состояний, не наблюдались.

Предсказания масс легчайших G
в решёточных КХД расчётах:

| J^{PC} | 0^{++} | 2^{++} | 0^{-+} |
|--------------------|---------------|----------------|----------------|
| $m_G, \text{ МэВ}$ | 1710 ± 90 | 2390 ± 120 | 2560 ± 120 |

Кандидат в глюболы.

Скалярный нонет:

| $N^{2S+1}L_J$ | J^{PC} | $I=1$ | $I=1/2$ | $I=0$ |
|---------------|----------|-------------|-------------|-----------------------------------|
| 1^3P_0 | 0^{++} | $a_0(1450)$ | $K^*(1430)$ | $f_0(1710), f_0(1500), f_0(1370)$ |

Избыток мезонов с $I=0$, т.е. возможно существует скалярный мезон вне «кварковой модели» кандидат в G .

Трудности в определении G :

- Свойства G и $q\bar{q}$ состояний не должны иметь крайних различий, поэтому их трудно отличить друг от друга.
- G и $q\bar{q}$ состояния с близкими массами могут смешиваться.

Некоторые признаки G :

- Отсутствие распада $G \rightarrow \eta\eta'$.
- Малая $\Gamma(G \rightarrow \gamma\gamma)$.
- Большая величина отношения

$$S = [\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma X) \times W(X \rightarrow \gamma\gamma)] / [\Gamma(X \rightarrow \gamma\gamma) \times W(J/\psi \rightarrow \gamma X)]$$
 в случае G по сравнению с $q\bar{q}$ состоянием.

Экзотические адроны (гибриды H).

Гибридный мезон H – $q\bar{q}g$ состояние.

H и $q\bar{q}$ мезоны могут смешиваться, поэтому определить H сложно, если он не имеет экзотических квантовых чисел.

Решёточные расчёты КХД, модель потоковой трубки и др. предсказывают, что самый лёгкий H-мезон:

$$m_H = 1,9 \text{ МэВ}, J^{PC} = 1^{-+}.$$

Основные распады: $H \rightarrow b_1(1235)\pi, f_1(1285)\pi, \dots$

Подавлены распады: $H \rightarrow \pi\pi, \pi\eta, \pi\rho, \dots$

$$\Gamma(H \rightarrow b_1\pi) > \Gamma(H \rightarrow f_1\pi) > \Gamma(H \rightarrow \rho\pi) > \\ > \Gamma(H \rightarrow KK^*) > \Gamma(H \rightarrow \eta'\pi) > \Gamma(H \rightarrow \eta\pi)$$

Кандидаты в H-мезоны:

$$I(J^{PC}) = 1^-(1^{-+}) \pi_1(1400), \pi_1(1600).$$

Экзотические адроны ($qq\bar{q}\bar{q}$ мезоны).

Кандидаты в 4-х кварковые состояния.

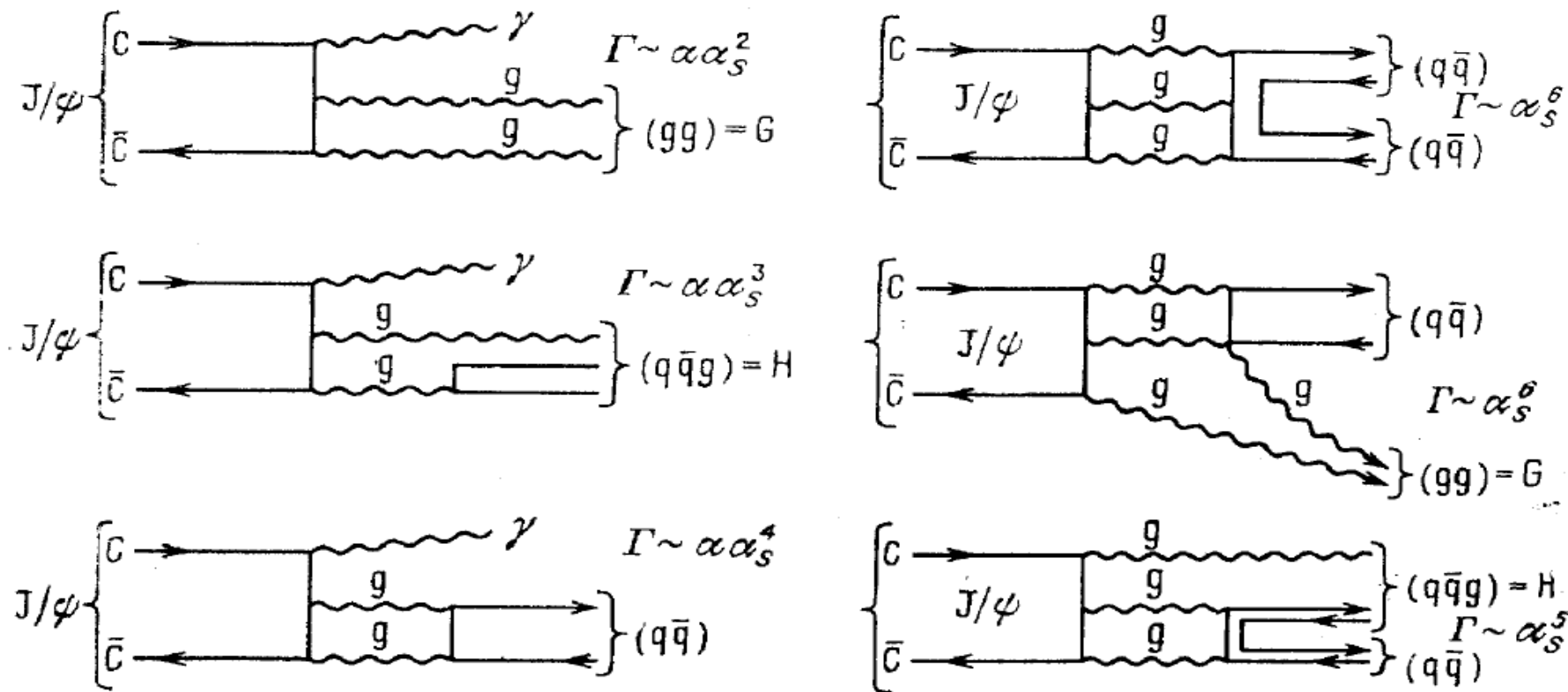
Нонет лёгких скаляров:

| $N^{2S+1}L_J$ | J^{PC} | $I=1$ $d\bar{s}s\bar{u}$, $u\bar{s}s\bar{d}$, $s\bar{s}(u\bar{u}-d\bar{d})$ | $I=1/2$ $u\bar{d}s\bar{u}$, $u\bar{s}u\bar{d}$, $u\bar{d}s\bar{d}$, $s\bar{d}u\bar{d}$ | $I=0$ $s\bar{s}(u\bar{u}+d\bar{d})$ | $I=0$ $u\bar{d}u\bar{d}$ |
|---------------|----------|---|---|--|-----------------------------|
| 1^3P_0 | 0^{++} | $a_0(980)$ | $K^*_0(800) / \kappa$ | $f_0(980)$ | $f_0(600) / \sigma$ |

$qq\bar{q}\bar{q}$ состояния должны иметь большие ширины. Они могут наблюдаться экспериментально, если их масса находится вблизи порога рождения распадных адронов.

Иначе они могут оказаться слишком широкими и неотлечимы от нерезонансного фона.

Распады J/ψ .



Диаграммы радиационных и двухмезонных распадов J/ψ .

$$\Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma G) > \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma H) > \Gamma(J/\psi \rightarrow \gamma |qq\rangle),$$

$$\Gamma(J/\psi \rightarrow H |qq\rangle) > \Gamma(J/\psi \rightarrow G |qq\rangle) \sim \Gamma(J/\psi \rightarrow |qq\rangle |qq\rangle)$$

Исследование лёгких мезонов на супер с-τ фабрике.

На супер с-τ в распадах J/ψ (10^{12} штук) можно с высокой точностью измерить параметры уже известных лёгких мезонных резонансов, обнаружить их распады, найти новые резонансы.

В настоящее время приходят результаты обработки эксперимента BESIII на коллайдере BEPC-II, основанные на 10^9 распадов J/ψ .

Исследования η' и η на BESIII.

Обнаружен Далитц распад $\eta' \rightarrow \gamma\gamma^* \rightarrow \gamma e^+ e^-$ и измерен переходной формфактор.

Обнаружены распады:

$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$, $\pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ и $\eta' \rightarrow \omega e^+ e^-$.

Самые точные измерения:

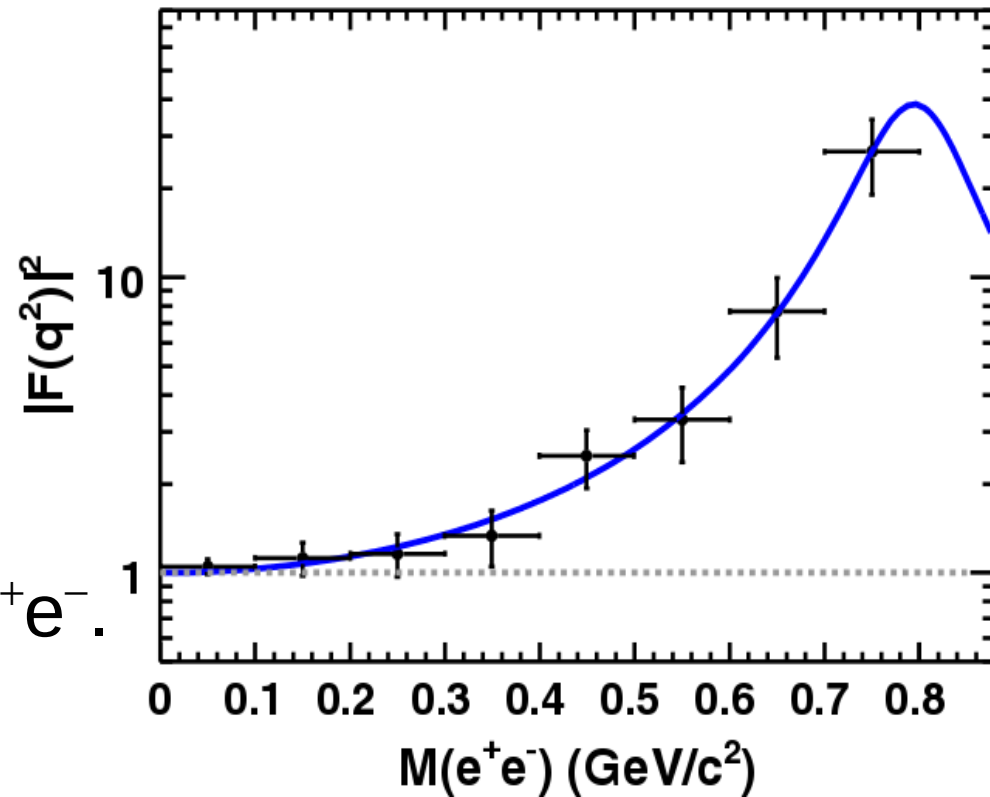
$\eta' \rightarrow \omega \gamma$ и $\pi^+ \pi^- e^+ e^-$.

Изучена динамика распадов:

$\eta / \eta' \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$, $\pi^+ \pi^- \pi^0$, $\eta' \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$ и $\pi^+ \pi^- \gamma$.

Проведён поиск слабых распадов:

$\eta' \rightarrow K\pi$ и $\pi e^- \bar{\nu}_e + \text{с.с.}$



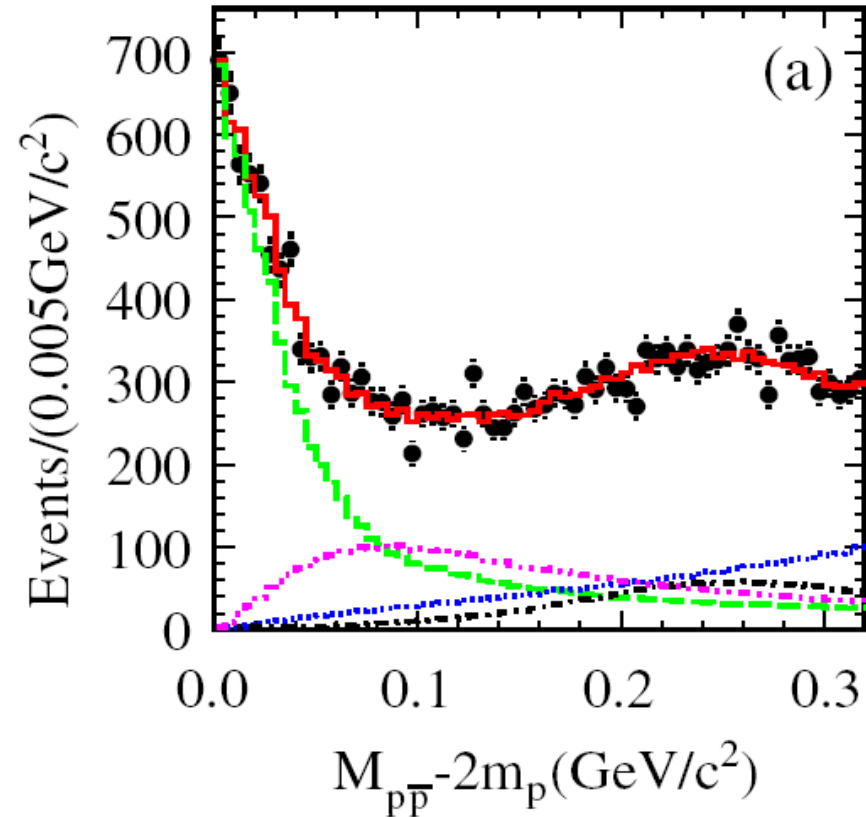
Исследование структуры $X(p\bar{p})$ вблизи порога $p\bar{p}$ на BESIII.

Структура $X(p\bar{p})$ была обнаружена на BESII вблизи порога $p\bar{p}$ в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma p\bar{p}$.

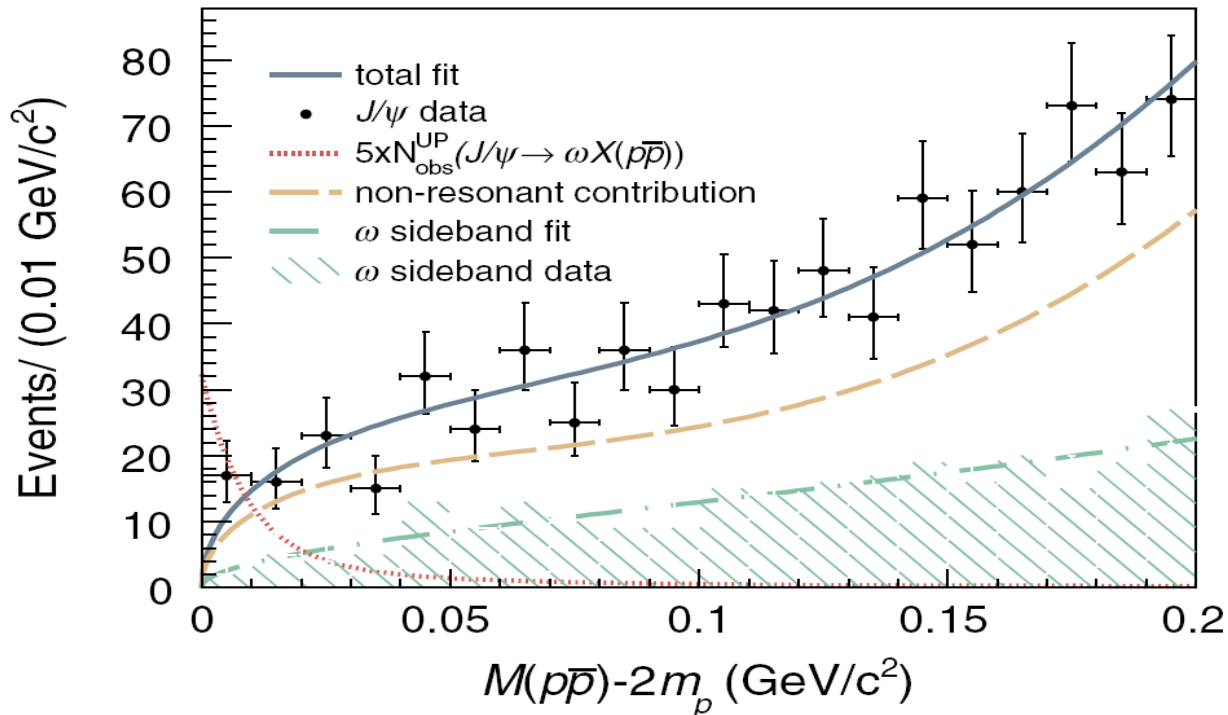
Многокварковый резонанс, барионий ($p\bar{p}$ связанное состояние), взаимодействие в конечном состоянии (FSI), ... ?

ПВА анализ $p\bar{p}$ системы показал, что $J^{PC} = 1^{-+}$, $m_{X(p\bar{p})} = 1832 \pm 20$ МэВ, $\Gamma_{X(p\bar{p})} < 76$ МэВ.

Также потребовались вклады $f_0(2100)$, $f_2(1910)$, 0^{++} фаз объём (ФО)



В распадах $J/\psi \rightarrow \omega p\bar{p}$ и $\phi p\bar{p}$ $X(p\bar{p})$ не наблюдается, что свидетельствует в пользу FSI.

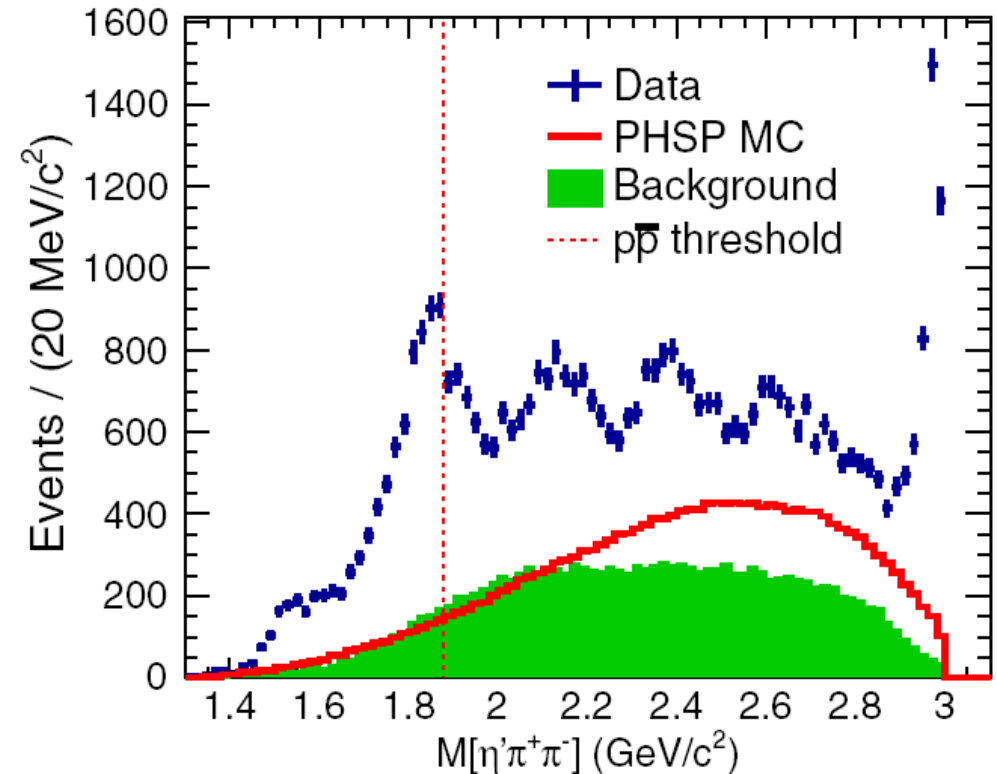
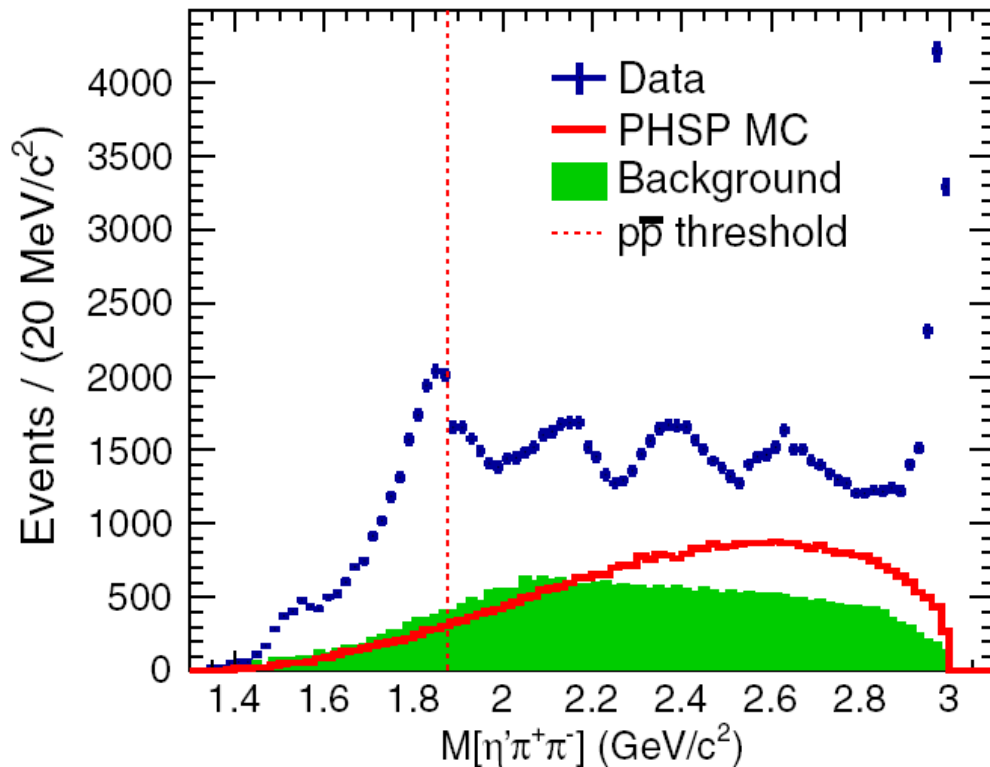


Исследование структуры $X(1835)$ в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'\pi^+\pi^-$.

В распаде $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'\pi^+\pi^-$ наблюдаются вклады $f_1(1510) 1^{++}$, η_c ,

а также новых структур $X(1835)$, $X(2120)$, $X(2370)$, $X(2600)$.

Распределение γ в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma X(1835)$ соответствует $J^P = 0^-$.

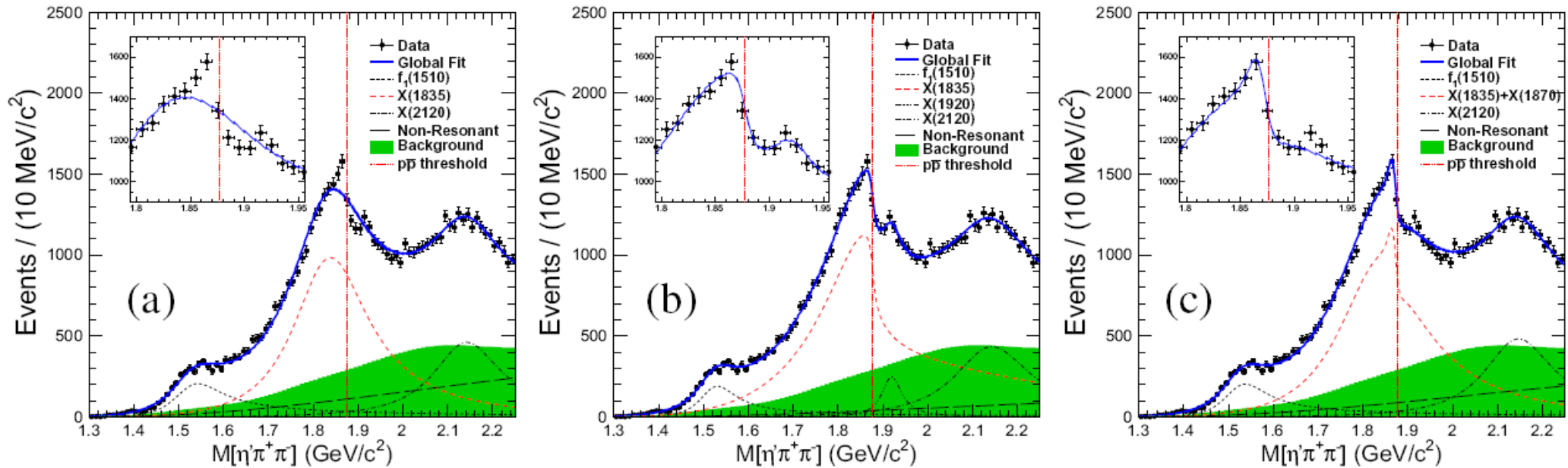


Спектр масс $\eta'\pi^+\pi^-$ ($\eta' \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ и $\eta' \rightarrow \eta\pi^+\pi^-$, $\eta \rightarrow \gamma\gamma$).

Наклон резонансной кривой $X(1835)$ резко меняется на пороге $p\bar{p}$, что может указывать на открытие канала распада $X(1835) \rightarrow p\bar{p}$.

Исследование структуры X(1835) в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma \eta' \pi^+ \pi^-$.

Подгонка спектра масс $\eta' \pi^+ \pi^-$.



(a) Б-В резонансы $f_1(1510)$, X(1835), X(2120) + ФО, – не описывает данные.

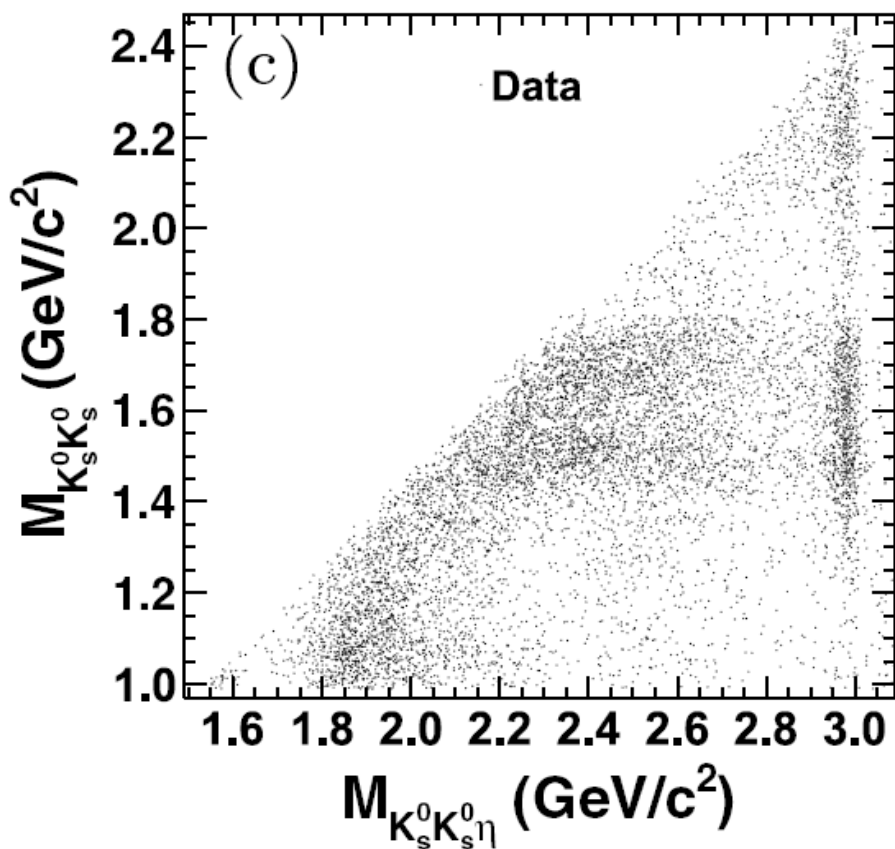
(b) Если X(1835) связан с $\rho\bar{\rho}$, то форма линии должна меняться на пороге. Флатте X(1835) + Б-В $f_1(1510)$, X(2120) + ФО + Б-В резонанс «X(1920)».

(c) Б-В $f_1(1510)$, X(1835), X(2120) + ФО + узкий Б-В резонанс «X(1870)».

X(1835): $m \approx 1825$ МэВ $\Gamma \approx 245$ МэВ X(1870): $m \approx 1870$ МэВ $\Gamma \approx 13$ МэВ.

Существует ли широкое состояние связанное с $\rho\bar{\rho}$ или узкое состояние под порогом $\rho\bar{\rho}$... ? Связанное или молекулярное состояние $\rho\bar{\rho}$?

Исследование структуры $X(1835)$ в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma K_s K_s \eta$.

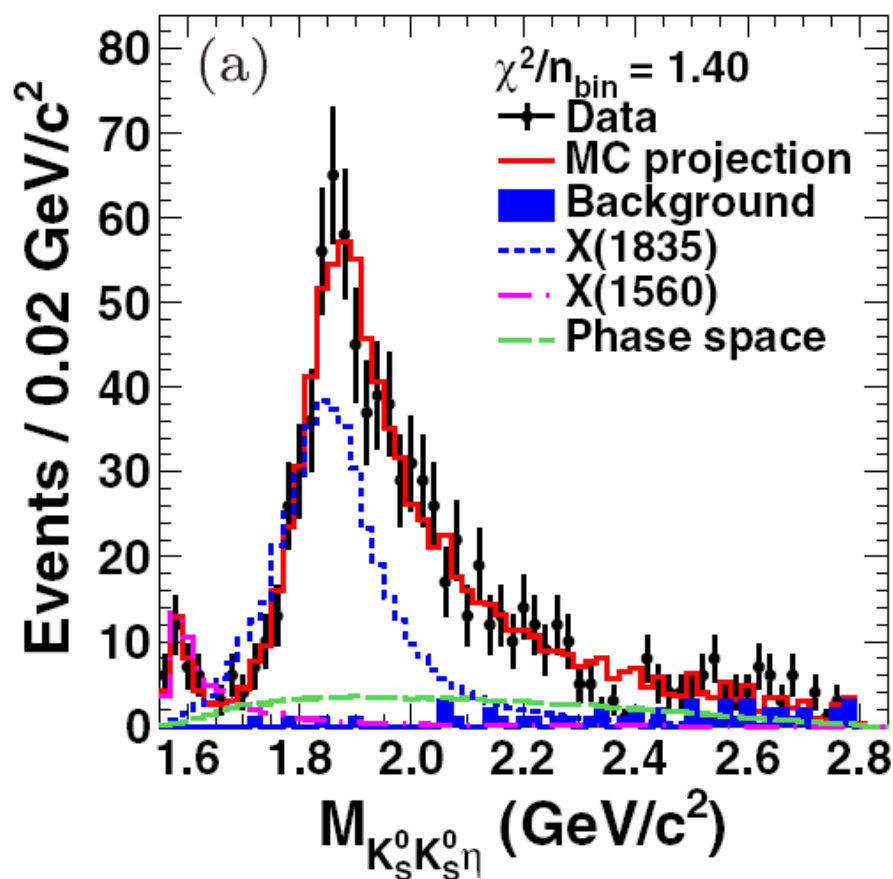


Сгущение событий в области $m_{K_s K_s \eta} \sim 1,85$ ГэВ, $m_{K_s K_s} \sim 1$ ГэВ.

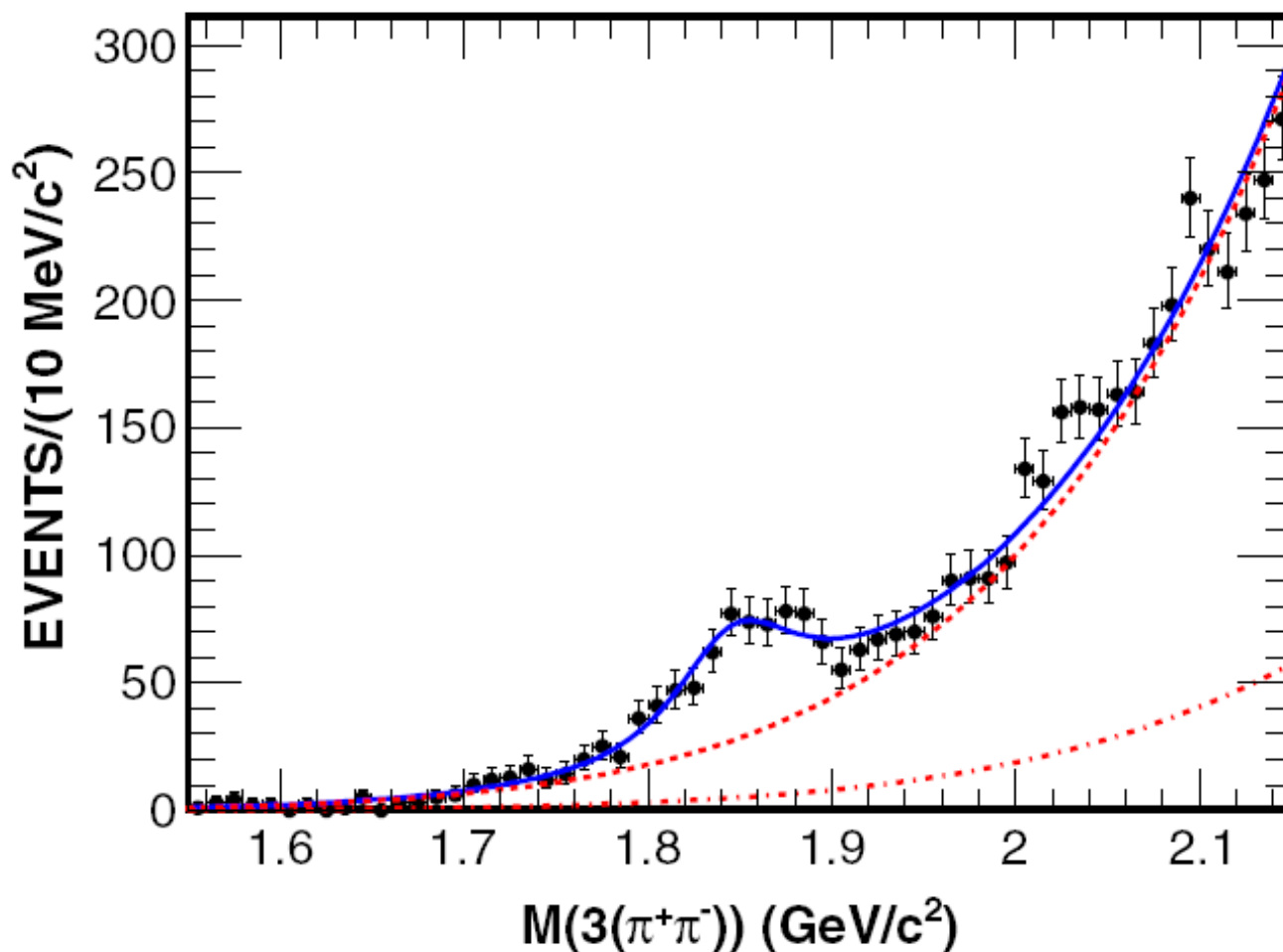
$X(1835) \rightarrow f_0(980)\eta$.

ПВА для событий с $m_{K_s K_s} < 1,1$ ГэВ.

Данные можно описать вкладом:
 $X(1835) \rightarrow f_0(980)\eta$, $X(1560) \rightarrow f_0(980)\eta$ и
нерезонансным $f_0(1560)\eta$; $J^{PC} = 0^{-+}$.
 $X(1835)$: $m \approx 1844$ МэВ, $\Gamma \approx 192$ МэВ.

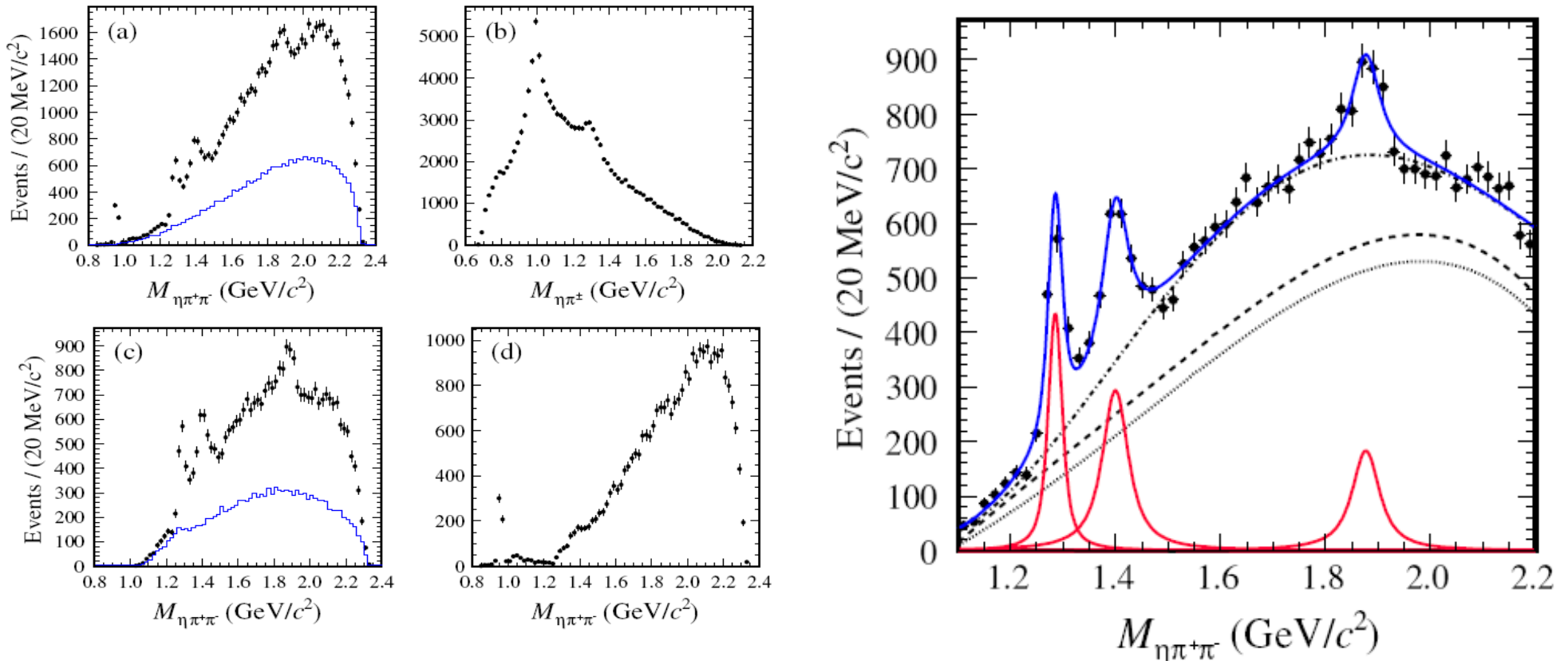


Структура $X(1840)$ в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma 3(\pi^+\pi^-)$.



$X(1840)$: $m \approx 1842 \text{ MeV}$, $\Gamma \approx 83 \text{ MeV}$.

Структура $\chi(1870)$ в распаде $J/\psi \rightarrow \omega\eta\pi^+\pi^-$.



Процесс $J/\psi \rightarrow \omega a_0 \pi^-$, $\chi(1870)$ – глюбол ?

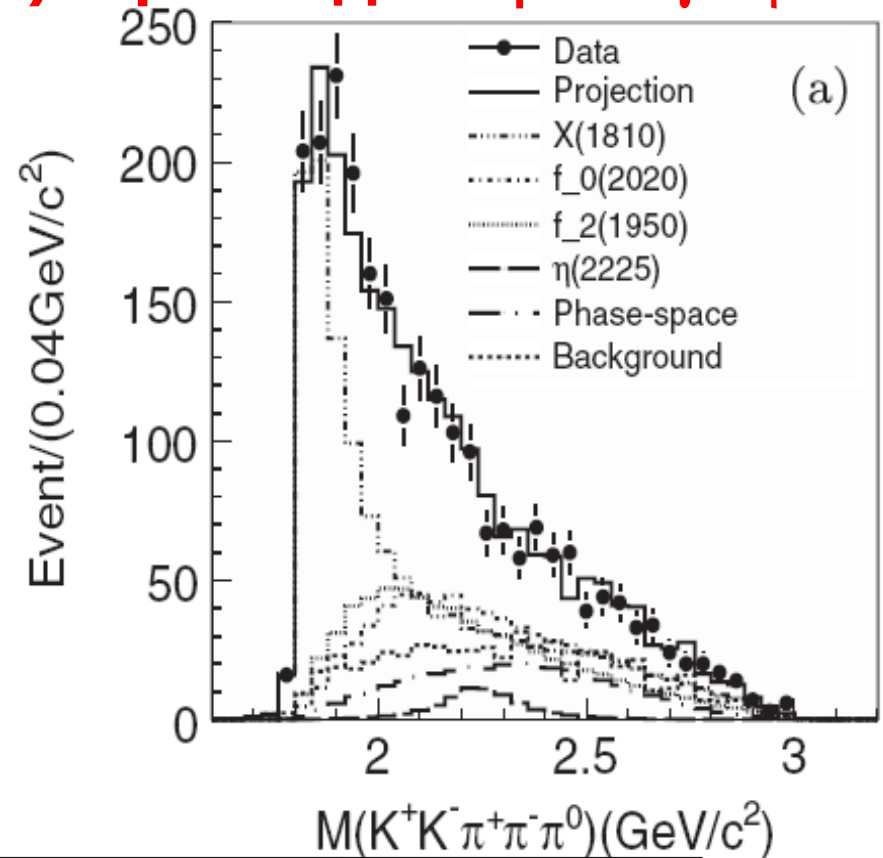
| | J^{PC} | m , МэВ | Γ , МэВ | $\text{Br} \times 10^4$ |
|--------------|----------|-----------|----------------|-------------------------|
| $f_1(1285)$ | 1^{++} | 1285 | 22 | 1,3 |
| $\eta(1405)$ | 0^{-+} | 1400 | 53 | 1,9 |
| $\chi(1810)$ | | 1877 | 57 | 1,5 |

Исследования структуры X(1810) в распаде $J/\psi \rightarrow \gamma\omega\phi$.

Вблизи порога
наблюдается структура.

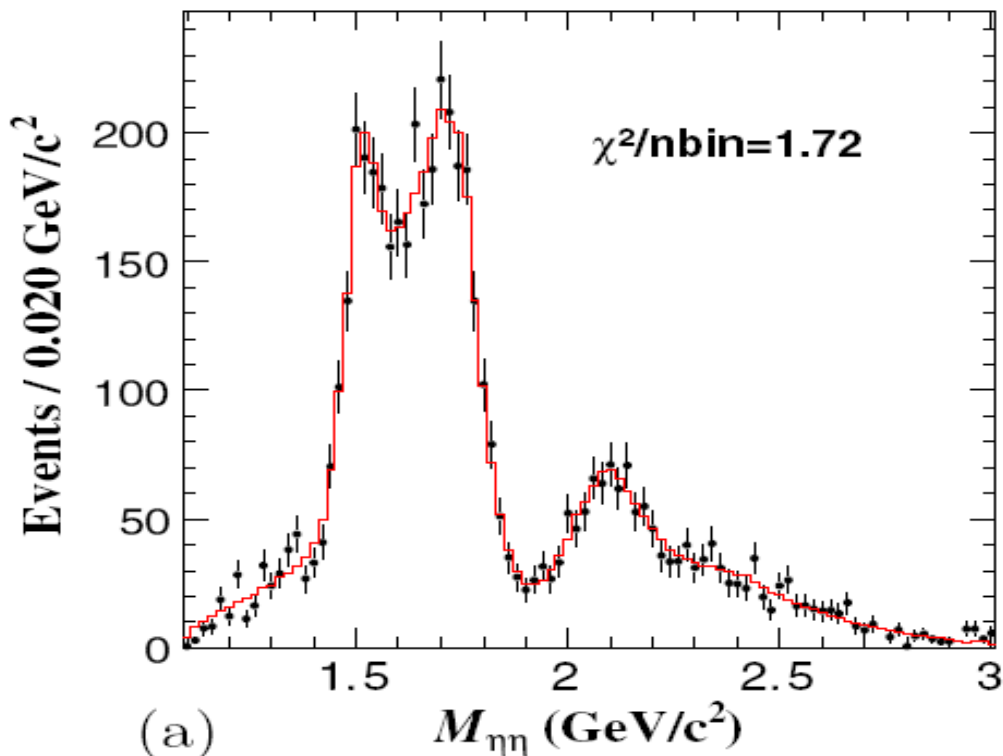
X(1810).
4q, H, G, FSI, ... ?

Результаты ПВА:



| | J^{PC} | m , МэВ | Γ , МэВ |
|---------------------|----------|-----------|----------------|
| X(1810) | 0^{++} | 1795 | 95 |
| $f_2(1950)$ | 2^{++} | 1944 | 472 |
| $f_0(2020)$ | 0^{++} | 1992 | 442 |
| $\eta(2225)$ | 0^{-+} | 2226 | 185 |
| Нерезонансный вклад | 0^{-+} | | |

Исследование распада $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\eta$.

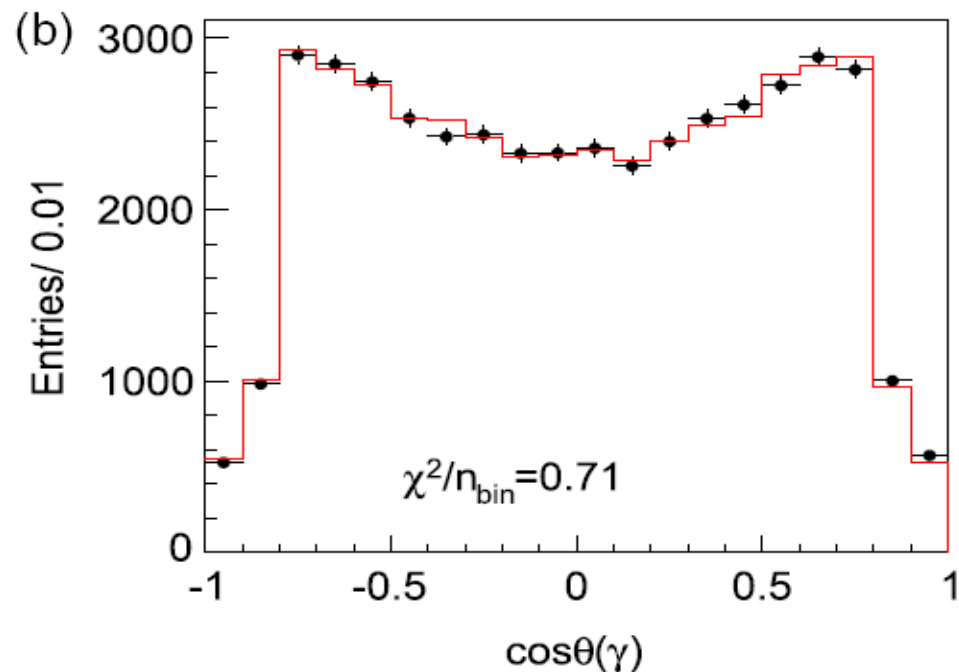
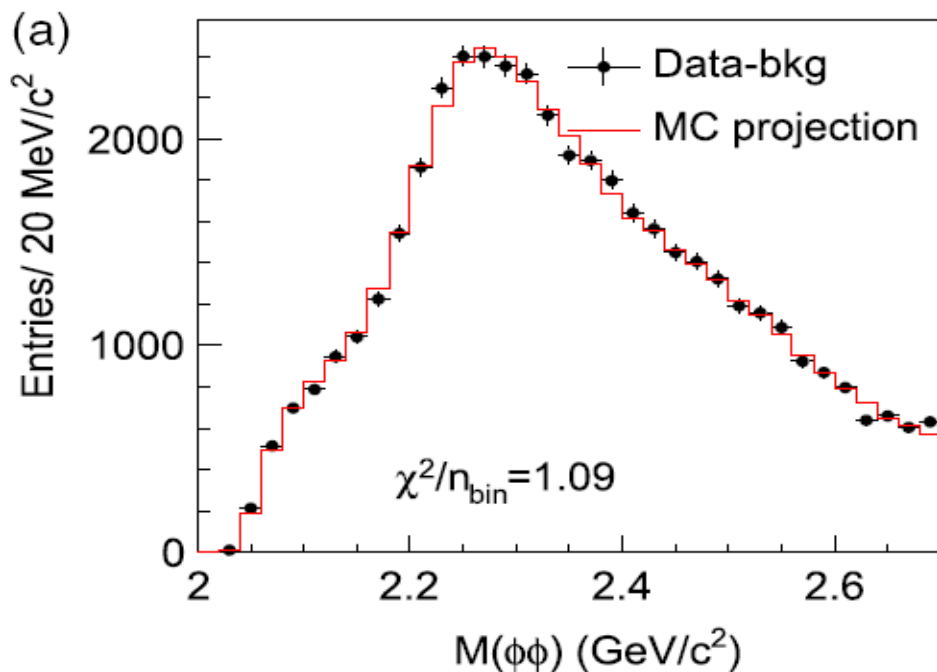


Распад «чувствителен» к G с $J^{PC}=0^{++}, 2^{++}$.

Не наблюдаются $f_0(1370)$, $f_0(1790)$ и $f_J(2220)$.

| | J^{PC} | M , МэВ | Γ , МэВ | $Br(J/\psi \rightarrow \gamma X \rightarrow \gamma\eta\eta) \times 10^5$ |
|--------------|----------|-----------|----------------|--|
| $f_0(1500)$ | 0^{++} | 1468 | 136 | 1,7 |
| $f_0(1710)$ | 0^{++} | 1759 | 172 | 24 |
| $f_0(2100)$ | 0^{++} | 2081 | 273 | 11 |
| $f'_2(1525)$ | 2^{++} | 1513 | 75 | 3,4 |
| $f_2(1810)$ | 2^{++} | 1822 | 229 | 5,4 |
| $f_2(2340)$ | 2^{++} | 2362 | 334 | 5,6 |

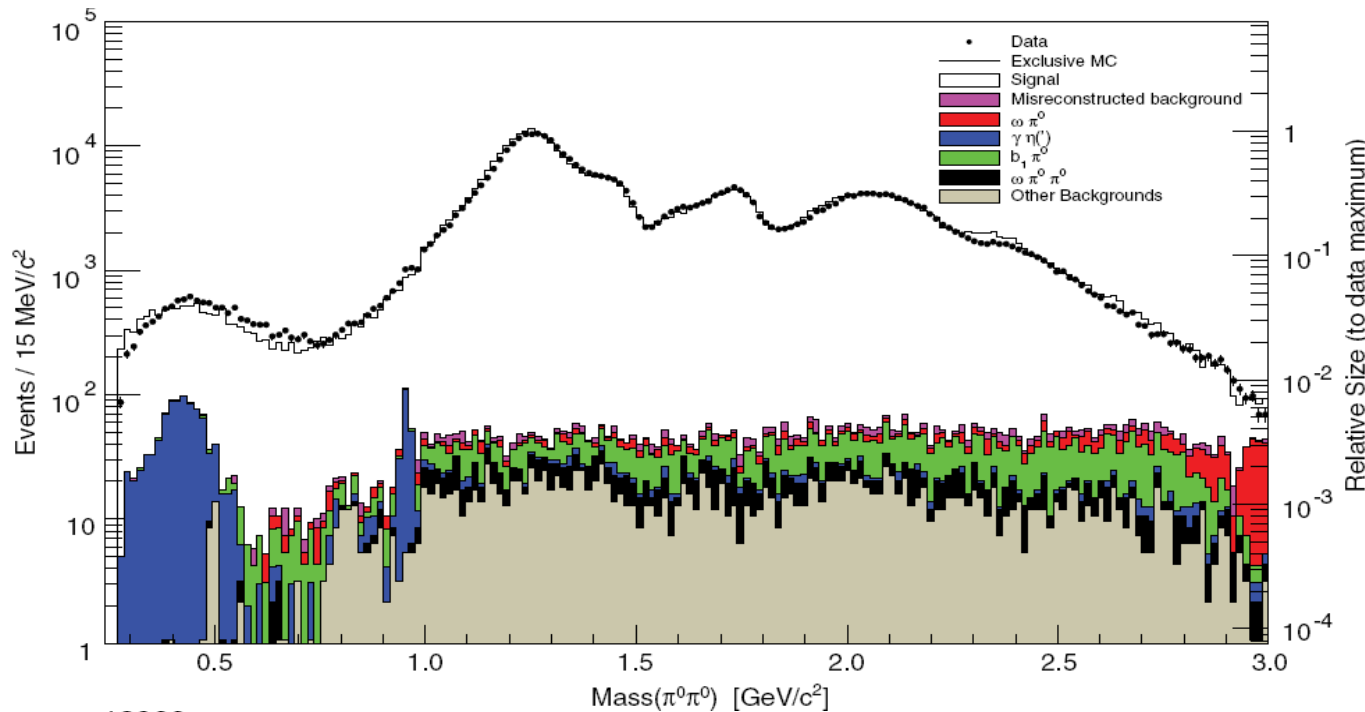
Исследование распада $J/\psi \rightarrow \gamma\phi\phi$.



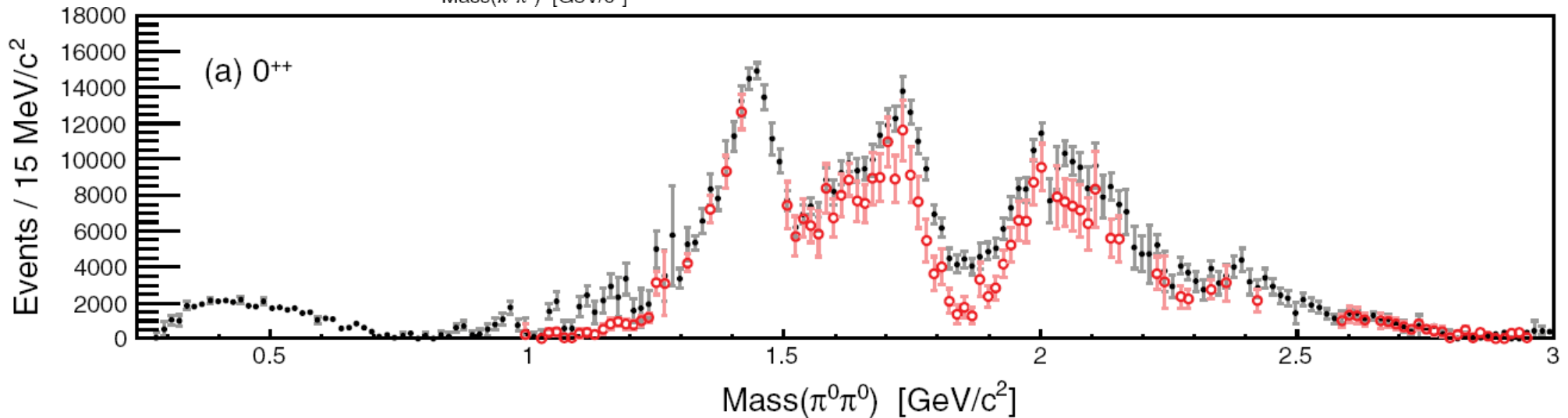
| | J^{PC} | M, МэВ | Γ , МэВ | $\text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma X \rightarrow \gamma\phi\phi) \times 10^4$ |
|--------------|----------|--------|----------------|---|
| $\eta(2225)$ | 0^{-+} | 2216 | 185 | 2,4 |
| $\eta(2100)$ | 0^{-+} | 2050 | 250 | 3,3 |
| $X(2500)$ | 0^{-+} | 2470 | 230 | 0,2 |
| $f_0(2100)$ | 0^{++} | 2101 | 224 | 0,4 |
| $f_2(2010)$ | 2^{++} | 2011 | 202 | 0,4 |
| $f_2(2300)$ | 2^{++} | 2297 | 149 | 0,4 |
| $f_2(2340)$ | 2^{++} | 2339 | 319 | 1,9 |
| ϕ_0 | 0^{-+} | | | 2,7 |

Итоги ПВА:
 Доминируют 0^{-+} .
 Подтверждён $\eta(2225)$.
 Новые состояния:
 $X(2500)$ и $\eta(2100)$

Исследование распада $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0\pi^0$.



Отобрано 500 000 событий.
 Проведён амплитудный анализ внутри интервалов масс $\pi^0\pi^0$.
 Построены интенсивности амплитуд 0^{++} , 2^{++} от массы $\pi^0\pi^0$.
 $\text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0\pi^0) = (1,15 \pm 0,05) \times 10^{-3}$

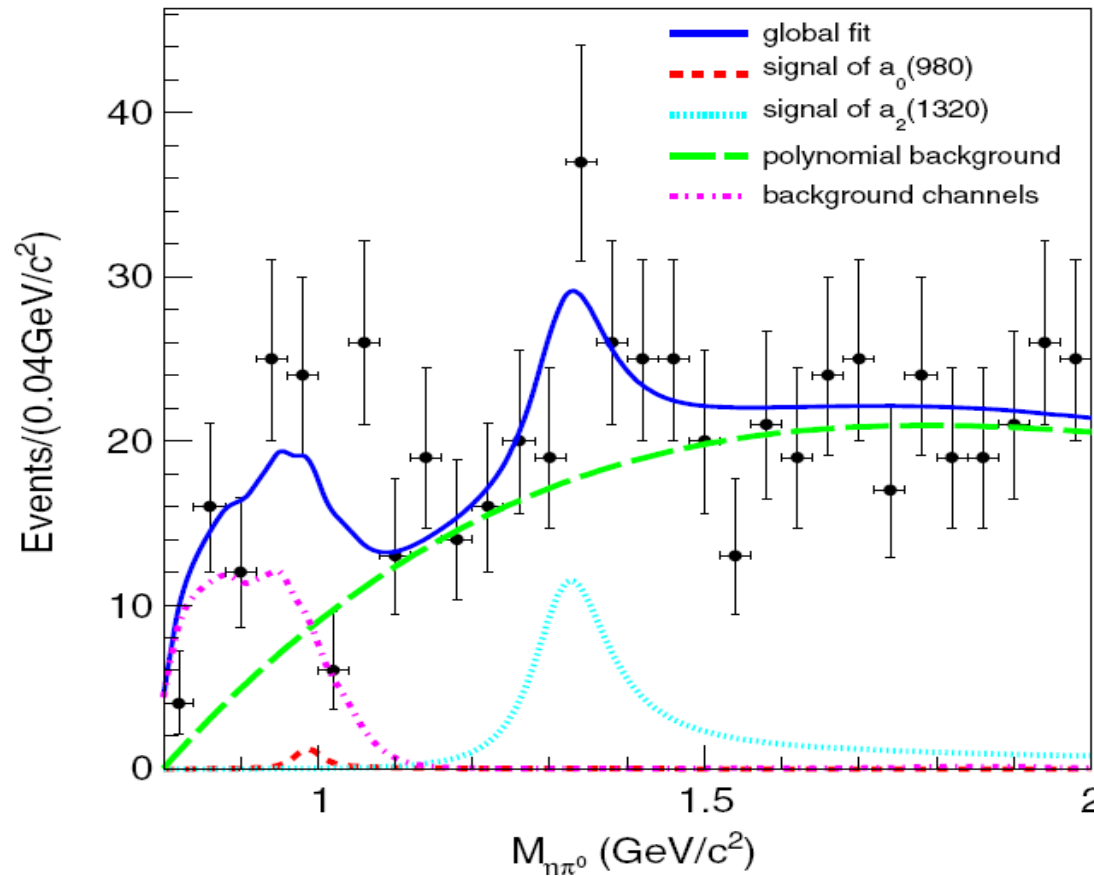


0^{++} . $m = 1,5 - 1,7$ ГэВ $f_0(1370)$, $f_0(1500)$, $f_0(1710)$;
 $m < 1$ ГэВ $f_0(500)$, $f_0(980)$; $m > 2$ ГэВ $f_0(2020)$, $\chi(2400)$.

2^{++} . $f_2(1270)$

Исследование распада $J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi^0$.

Впервые измерен $\text{Br}(J/\psi \rightarrow \gamma\eta\pi^0) = (2,1 \pm 0,3) \times 10^{-5}$.



Система $\eta\pi^0$ не исследована.

Выводы.

Эксперимент BESIII показывает богатую физику резонансов в области масс ниже 3 ГэВ.

Статистика эксперимента не позволяет однозначно объяснить наблюдаемые структуры.

Исследование лёгких состояний останется важной задачей и на супер c - τ фабрике. Необходимо развивать методы анализа многоадронных систем.