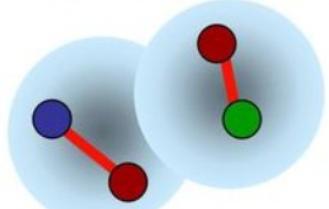
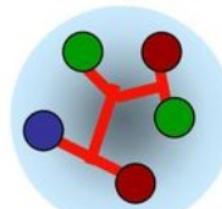
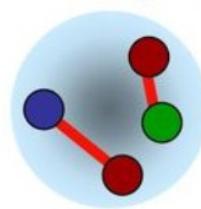
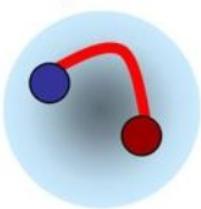


# Спектроскопия легких мезонов и поиск экзотических состояний КХД



Леонид Кардапольцев

ИЯФ СО РАН

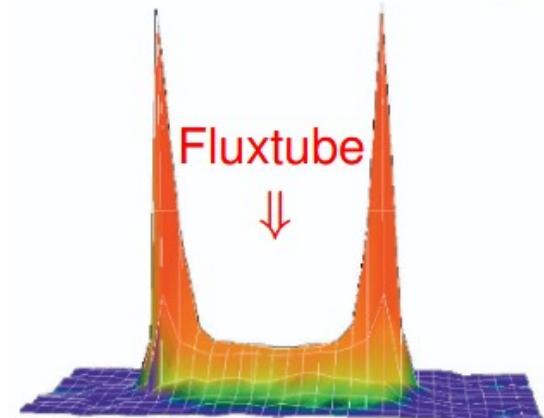
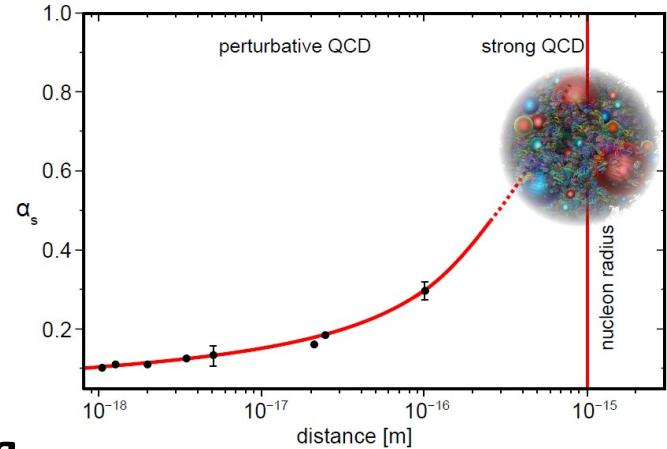
18 декабря, 2025

# Актуальные вопросы КХД

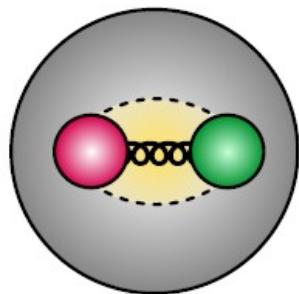
- ВЭПП-6 это **фабрика легких адронов**
  - $e^+e^- \rightarrow hadrons$  от  $\phi$  до  $J/\psi$
  - Распады  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$
- Массы легких  $u,d,s$  кварков  $< \Lambda_{QCD} \approx 300$  МэВ
  - Легкие адроны идеально подходят для изучения **непертурбативных эффектов**
- КХД на решетке – бурно развивающаяся область знания
  - **Интерпретация результатов с ВЭПП-6**

## Актуальные вопросы КХД

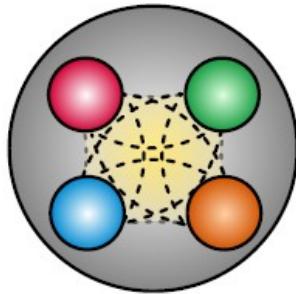
- Механизм генерации **динамической массы** в КХД
- Конфайнмент КХД – свойства струны, натянутой между кварками



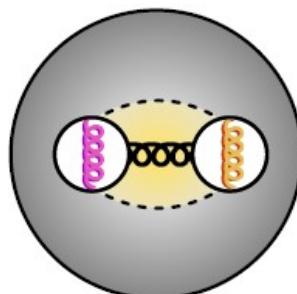
# Актуальные вопросы КХД



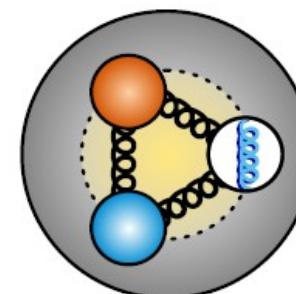
Meson



Tetraquark



Glueball



Hybrid

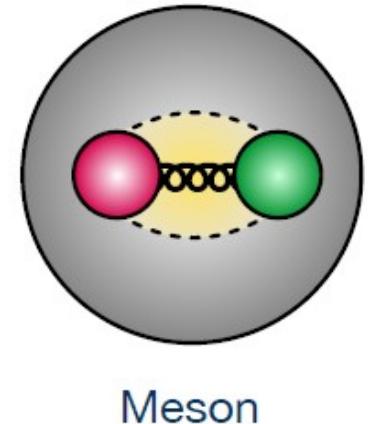
Экспериментальная информация, способная помочь найти ответы на эти вопросы

- **Изучение экзотических состояний КХД с возбужденной глюонной компонентой**
- **Изучение свойств возбужденных легких мезонов**

# *Легкие мезоны*

# Мезоны из легких кварков

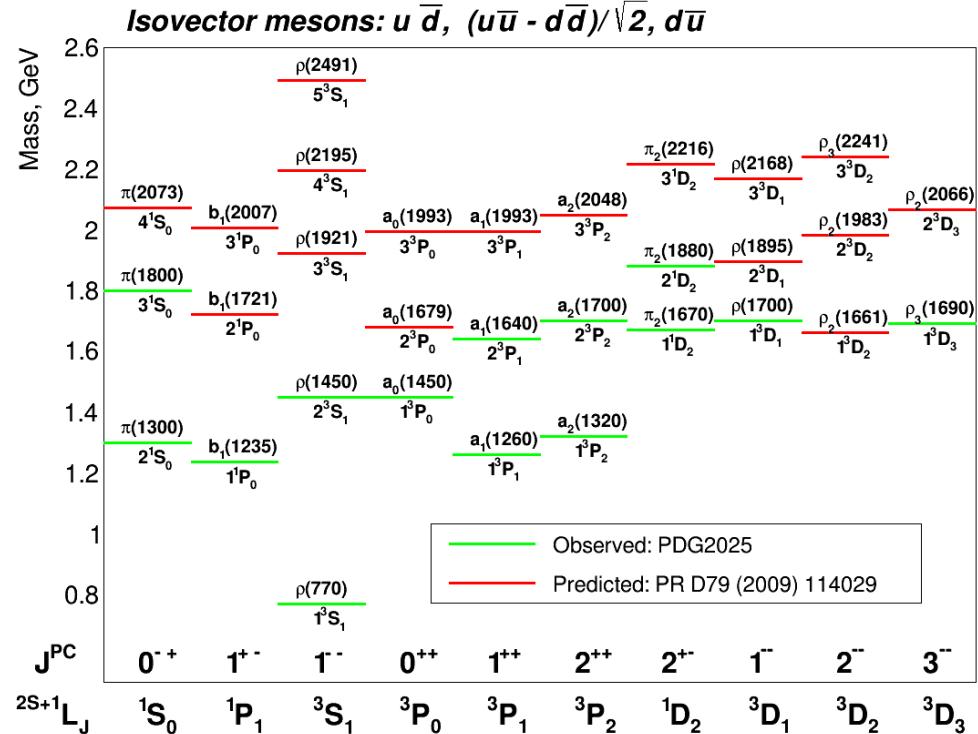
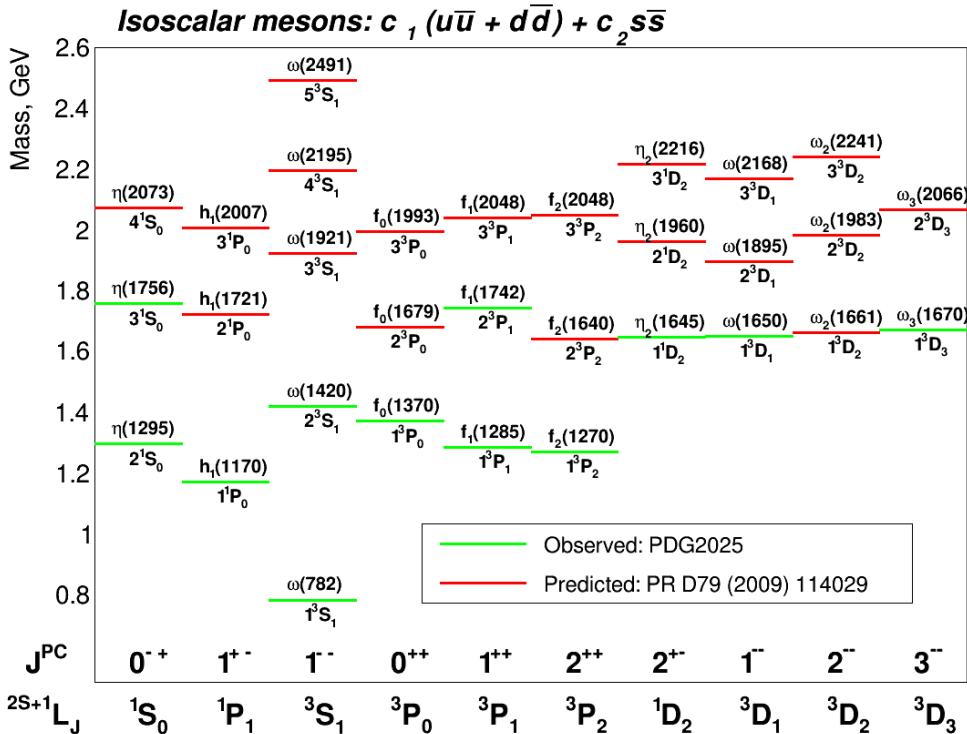
- Мезон – связанное состояние **кварк-антикварковой пары** в **колор синглетном состоянии**
- **Наивная кварковая модель** - стандартная модель для описания мезонов
  - Конституентные кварки ( $m_u \approx 300$  МэВ,  $m_s \approx 500$  МэВ)
  - Радиальное уравнение Шредингера
- **Квантовые числа:**  $P = (-1)^{L+1}$ ,  $C = (-1)^{L+S}$



Резонансы из легких кварков в PDG (все/установленные/мезоны)

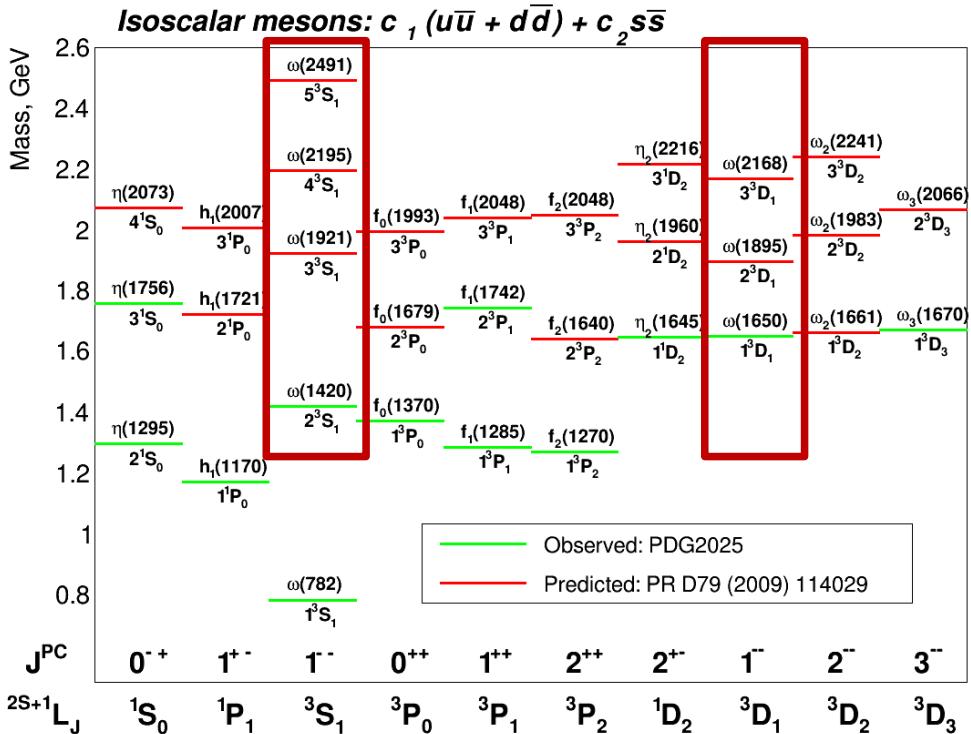
- Без аромата: 85 / 53 / 44
- С открытой странностью: 28 / 20 / 16
- **Много работы для ВЭПП-6 !**

# Спектр легких мезонов ( $u, d$ кварки)

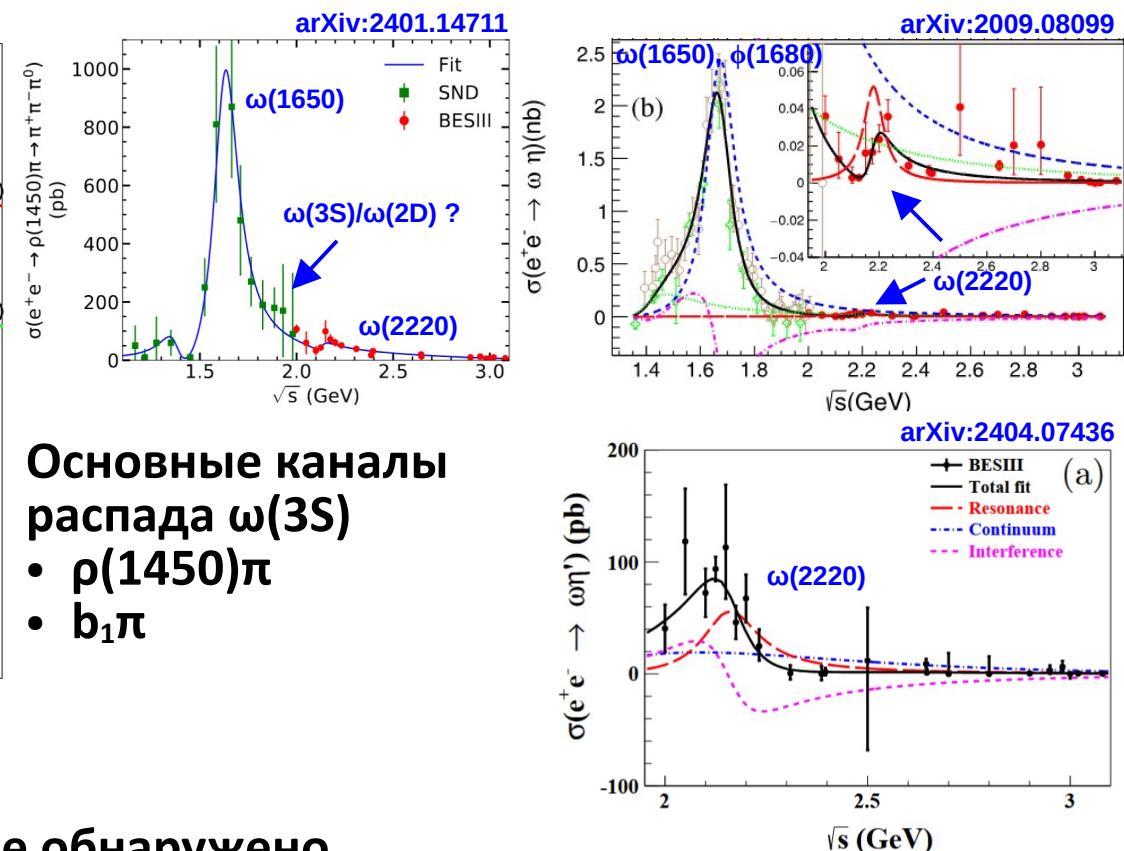


- Спектр высших возбуждений мезонов **все еще плохо изучен**
- ВЭПП-6 идеально подходит для изучения этого спектра **в прямом сканировании и в распадах  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$**

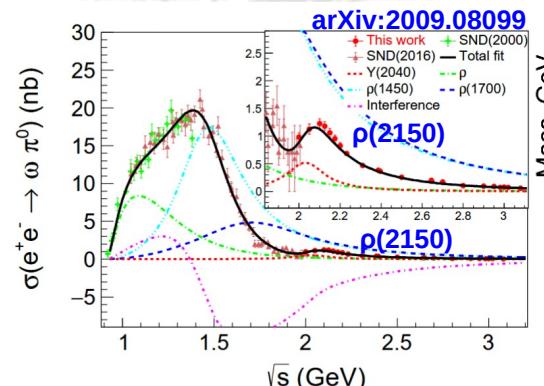
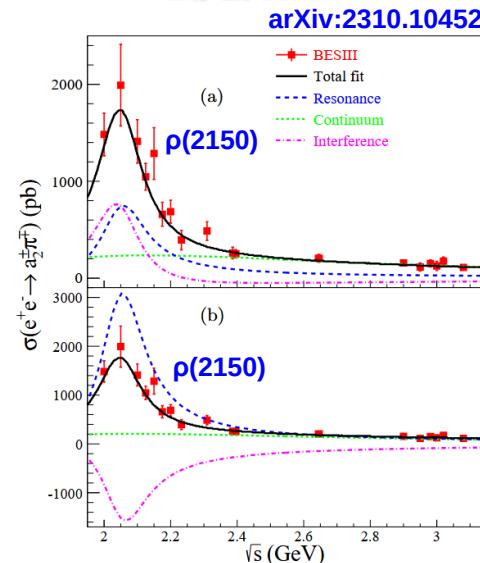
# Спектр легких мезонов ( $u, d$ кварки)



- Выше 2 ГэВ виден резонанс  $\omega(2220)$
- Состояний вблизи 1.9 ГэВ до сих пор не обнаружено

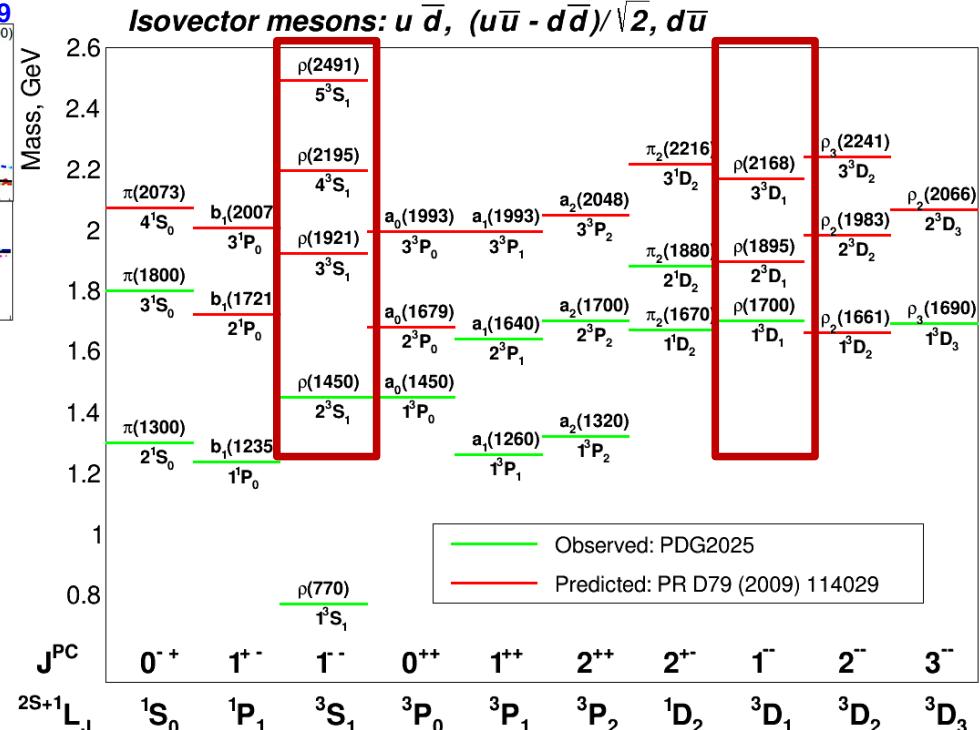


# Спектр легких мезонов ( $u, d$ кварки)



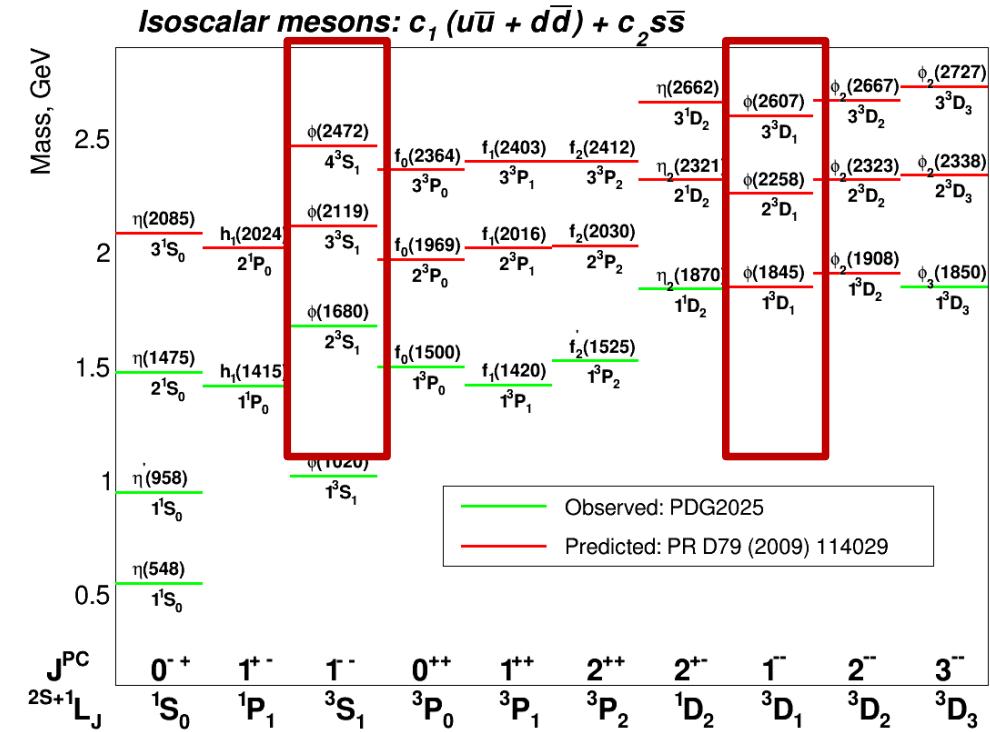
## Основные каналы распада $\rho(3S)$

- $\rho\rho$
- $\pi(1300)\pi$
- $\omega(1420)\pi$

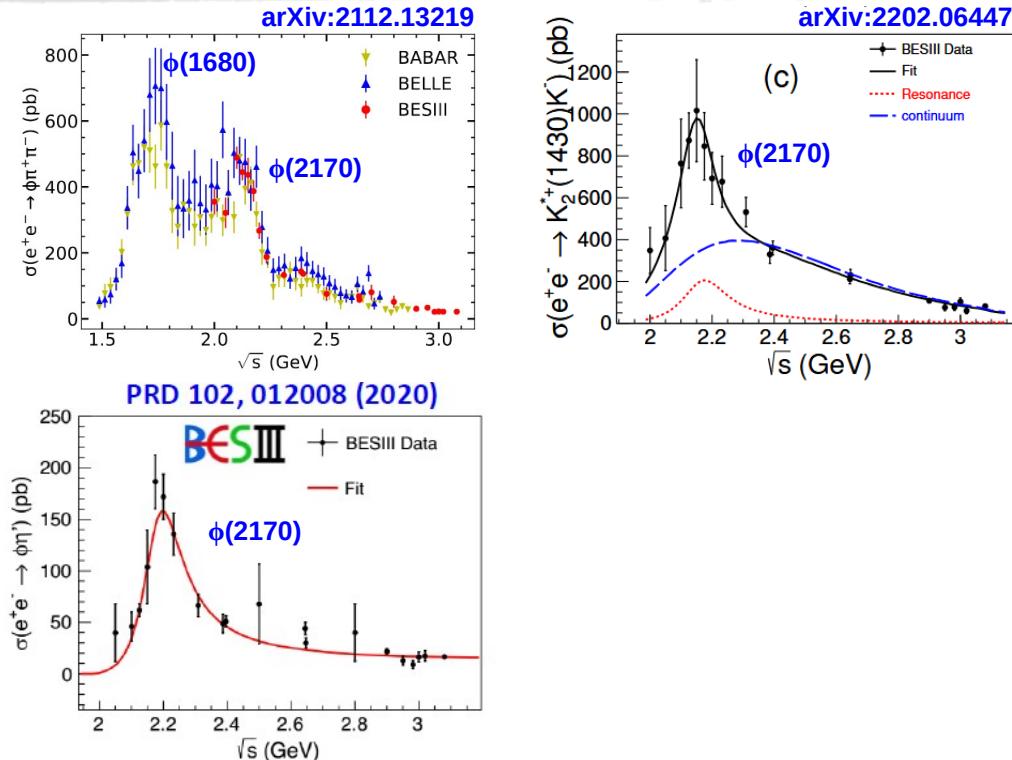


- Выше 2 ГэВ виден резонанс  $\rho(2150)$
- Состояний вблизи 1.9 ГэВ до сих пор не обнаружено

# Спектр легких мезонов (s кварт)



- Выше 2 ГэВ виден резонанс  $\phi(2170)$
- Кандидат в странный гибрид

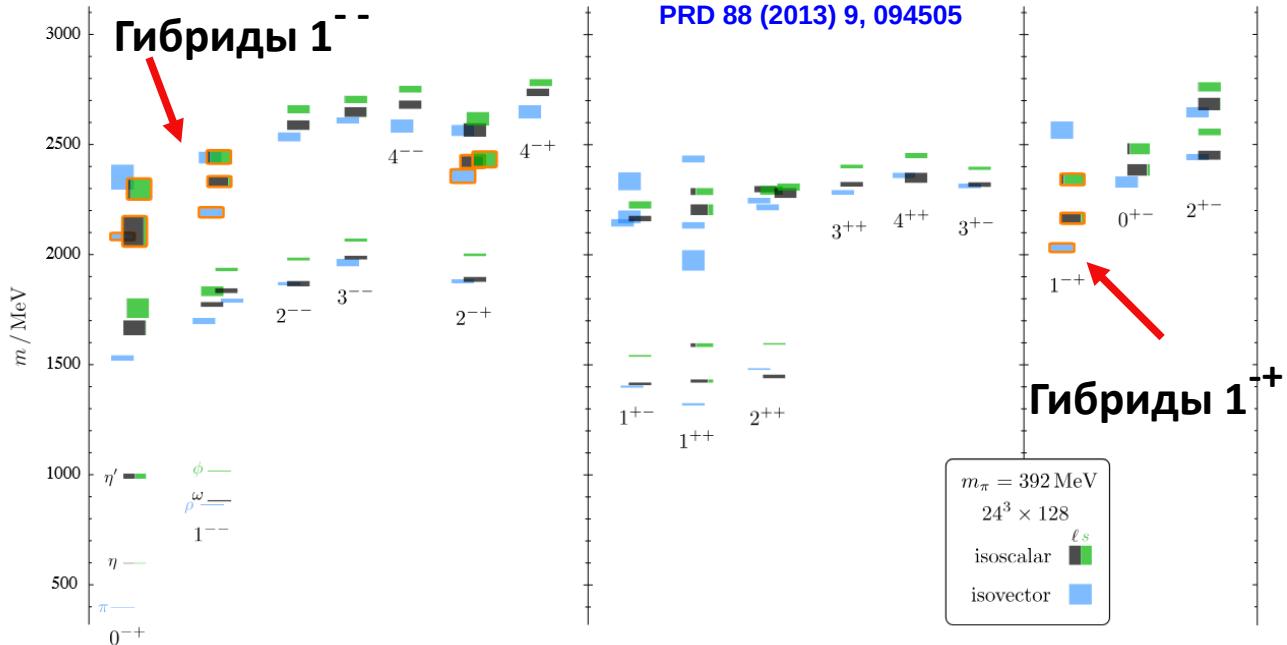


$$e^+e^- \Rightarrow \begin{cases} Y(2175) \rightarrow \phi(1020)\pi^+\pi^- \\ Y(4260) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^- \\ Y(10860) \rightarrow \Upsilon(1S, 2S)\pi^+\pi^- \end{cases}$$

strange, charm, bottom,

# Легкие гибриды

# Предсказания КХД на решетке



- Получен спектр легких мезонов для  $m_\pi = 392$  МэВ
- Природа полученных состояний анализируется по величине матричных элементов вида  $\langle n | \mathcal{O}^\dagger | 0 \rangle$
- Оранжевым отмечены состояния, для которых доминируют матричные элементы, моделирующие хромомагнитные возбуждения

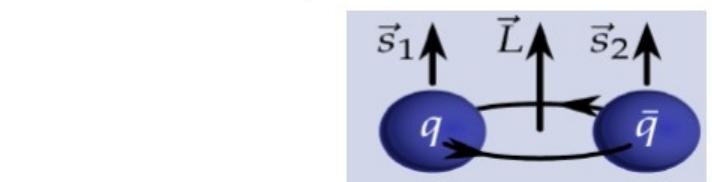
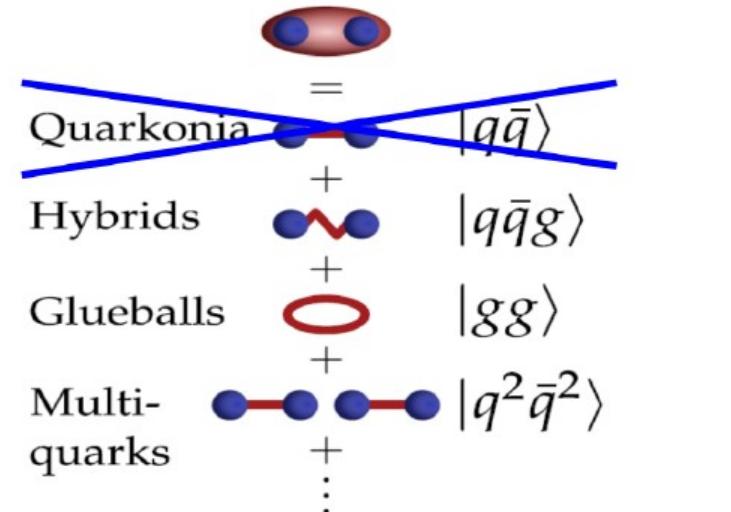
- Гибрид это связанное состояние хромомагнитного глюонного возбуждения ( $J^{PC} = 1^{+-}$ ) и  $q\bar{q}$  пары в  $S$  волне и колор октетном состоянии
- $L=0, S=0: J^{PC} = 1^{--}$
- $L=0, S=1: J^{PC} = 0^{-+}, 1^{-+}, 2^{-+}$

# Легкие адроны с экзотическими $J^{PC}$

- В фермион-антифермионной системе запрещены квантовые числа  $0^{--}$ , (четный) $^{+-}$ , (нечетный) $^{-+}$
- Обнаружение адрона с этими квантовыми числами будет однозначно указывать на его экзотическую природу

Так как глюонное возбуждение не влияет на флейворную часть волновой функции, то каждому  $J^{PC}$  должен соответствовать нет гибридов

$$\pi_1 I^G(J^{PC}) = 1^-(1^{-+})$$
$$\eta_1 I^G(J^{PC}) = 0^+(1^{-+})$$
$$\eta'_1 I^G(J^{PC}) = 0^+(1^{-+})$$



$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \quad P = (-1)^{L+1} \quad C = (-1)^{L+S}$$

Allowed  $J^{PC}$ :  $0^{-+}, 0^{++}, 1^{--}, 1^{+-}, 2^{++}, \dots$

# Легкий гибрид $J^{PC} = 1^{-+}$

## $1^{-+}$ изовектор $\pi_1(1600)$

- Виден в распадах на  $\eta'\pi$ ,  $\rho\pi$ ,  $b_1\pi$ ,  $f_1\pi$  ( $\rho\pi$  и  $\eta\pi$ )
- На ВЭПП-6 может быть изучен в распаде  $\chi_{c1} \rightarrow \pi_1(1600)\pi$

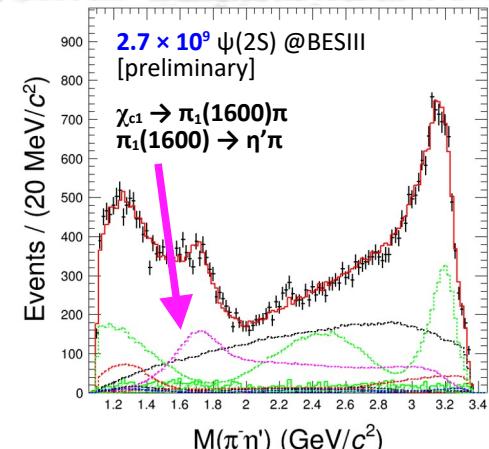
Изоскаляр  $1^{-+}$   $\eta_1(1855)$  был обнаружен в распаде  $J/\psi \rightarrow \eta'\eta\gamma$

$$M = (1855 \pm 9^{+6}_{-1}) \text{ MeV}/c^2, \Gamma = (188 \pm 18^{+3}_{-8}) \text{ MeV}/c^2$$

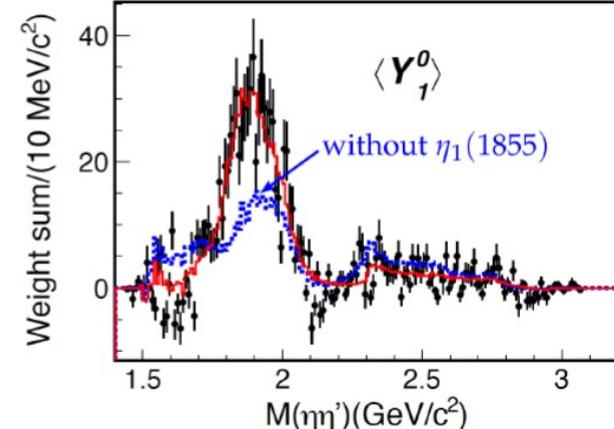
$$B(J/\psi \rightarrow \gamma\eta_1(1855) \rightarrow \gamma\eta\eta') = (2.70 \pm 0.41^{+0.16}_{-0.35}) \times 10^{-6}$$

Критически важна независимая проверка этих результатов

Поиск второго изоскаляра в нонете



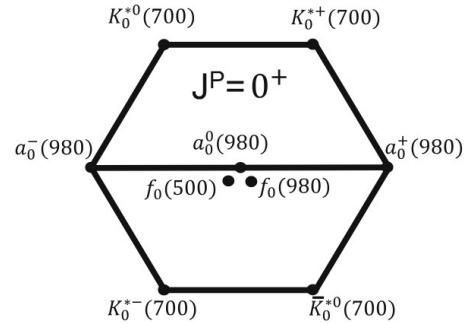
PRL 129 192002(2022)  $J/\psi \rightarrow \eta'\eta\gamma$



# Четырехкварковые состояния

# Легкие четырех夸克овые состояния

Но не легчайших скаляров являются кандидатами в четырех夸克овые состояния [1]

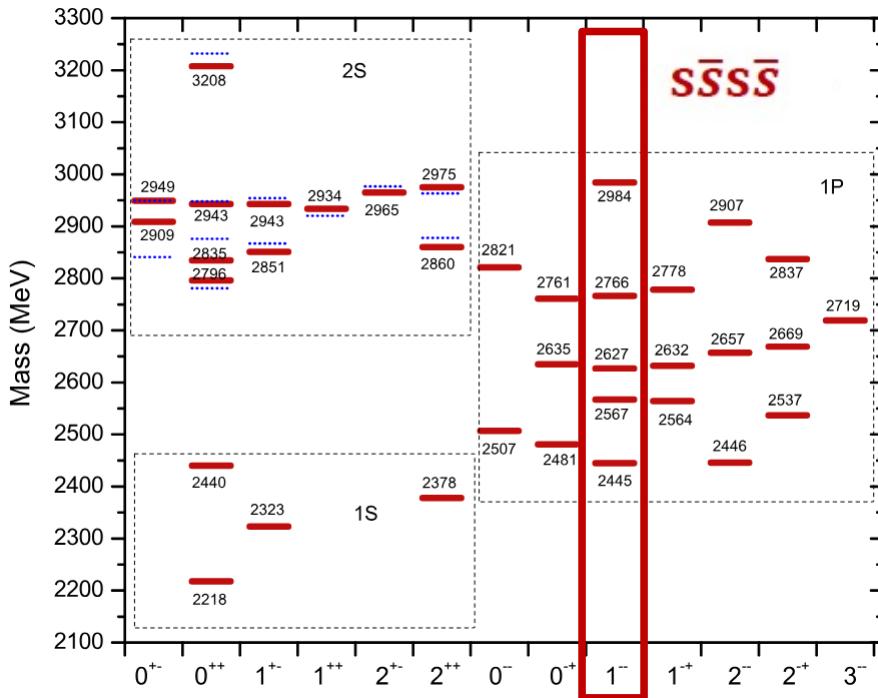


[1] Eur. Phys. J. C 60 (2009) 273  
[2] Phys. Rev. D 103 (2021) 016016

Противоречие с  $q\bar{q}$  интерпретацией,  $a_0(980)$  на 200 МэВ тяжелее  $K^*_0(700)$

$f_0(500)$ :  $(q\bar{q})(\bar{q}\bar{q})$   
 $f_0(980), a_0(980)$ :  $(q\bar{s})(\bar{q}\bar{s})$   
 $K^*_0(700)$ :  $(q\bar{q})(\bar{s}\bar{q})$

Состояния с дважды скрытой странностью [2] можно искать в прямом сканировании и в распадах  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$



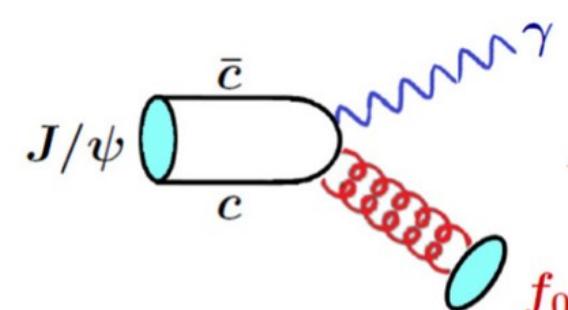
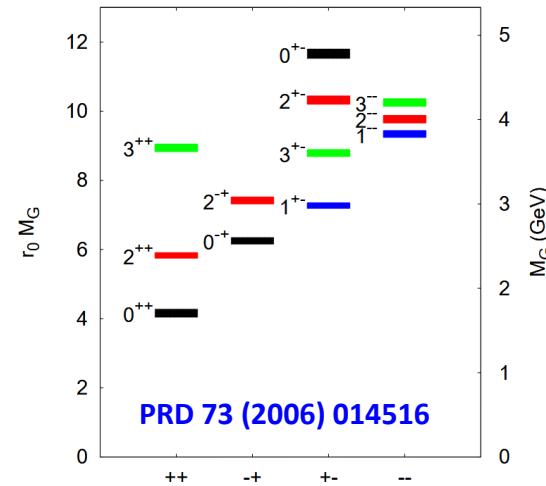
Наиболее интересные процессы для поиска  $e^+e^- \rightarrow \phi\phi, \Xi\Xi, KK$  и т.п.

Только на ВЭПП-6!

# Глюболя

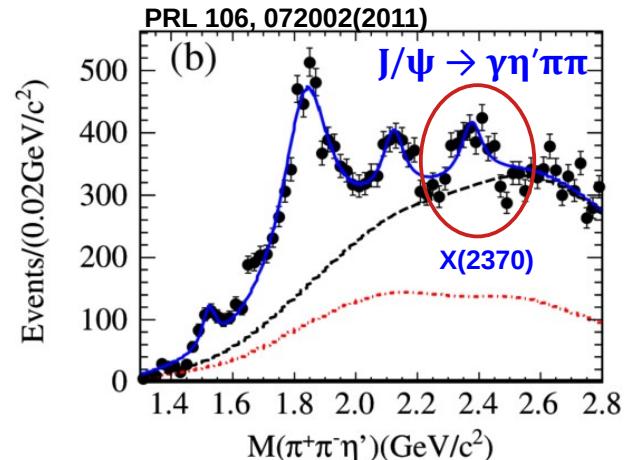
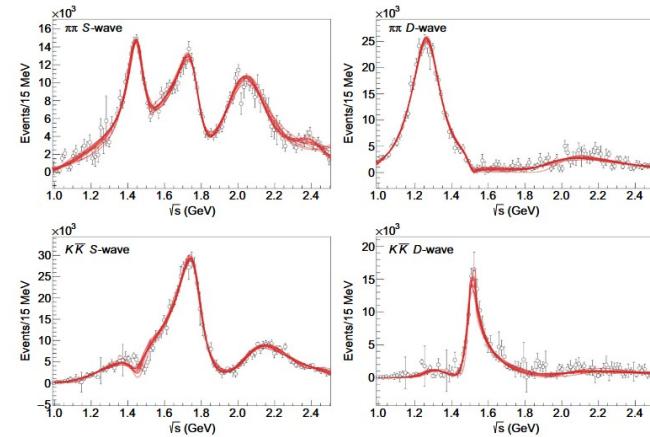
# Глюболы в рад. распадах $J/\psi$ и $\psi(2S)$

- Глюбол – это **связанное состояние только глюонных полей**
- Их изучение **важно для понимания механизма генерации динамической массы**
- **КХД на решетке** предсказывает легчайшие глюболы с квантовыми числами  $0^{++}, 2^{++}, 0^{-}$
- $J/\psi$  и  $\psi(2S)$  радиационно распадается в два глюона, давая **обогащенную глюонами среду**
- Высокая вероятность перехода в состояния с глюонными возбуждениями



# Скалярный и псевдоскалярный глюболовы

- Поиск скалярного ( $0^{++}$ ) глюбала проводился в основном в реакциях  $J/\psi \rightarrow \pi\pi\gamma$ ,  $K_SK_S\gamma$ ,  $\eta\eta\gamma$
- $f_0(1710)$  и  $f_0(1500)$  кандидаты в скалярный глюболов
- Адронизация двух глюонов из распадов  $\chi_{c0}$ 
  - Основные каналы:  $4\pi$ ,  $6\pi$ ,  $KK\pi\pi$
  - Возможно, глюболовы не видны в распадах на  $\pi\pi$ ,  $K_SK_S$ ,  $\eta\eta$
- Основной кандидат в псевдоскалярный ( $0^{-+}$ ) глюболов –  $X(2370)$
- Моды распада  $X(2370)$ :  $\eta'\pi\pi$ ,  $\eta'KK$ ,  $\eta\pi\pi$ ,  $\eta KK$ ,  $\pi^0 KK$ ,  $a_0(980)\pi^0$
- Картина распадов похожа на  $\eta_c$

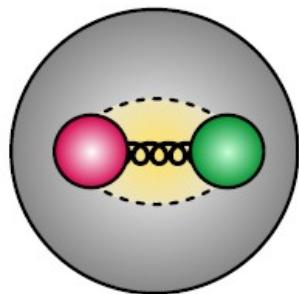


# Заключение

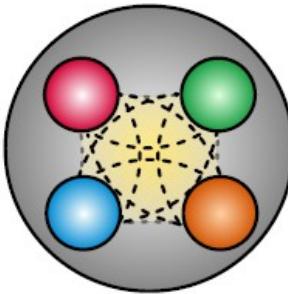
- **Изучение легких мезонов**
  - Треть резонансов в PDG2025 до сих пор плохо изучены
  - Кварковая модель предсказывает много новых частиц
- **Сканирование от 2 до 3.08 ГэВ**
  - LQCD предсказывает странный гибрид с  $J^{PC} = 1^{--}$
  - Поиск четырехварковых состояний
- **Радиационные распады  $J/\Psi$  и  $\Psi(2S)$** 
  - Поиск гибридов
  - Поиск глюболов
- **Что нужно для выполнения этой программы**
  - Универсальный детектор с покрытием телесного угла  $\approx 4\pi$
  - Высокая светимость в диапазоне энергии в с.ц.м **1.5 - 3.7 ГэВ**

# *Спасибо за внимание*

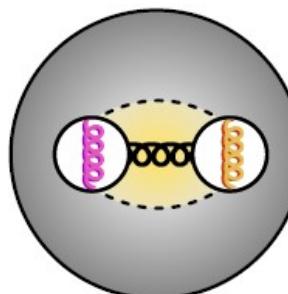
# Поиск экзотических состояний КХД



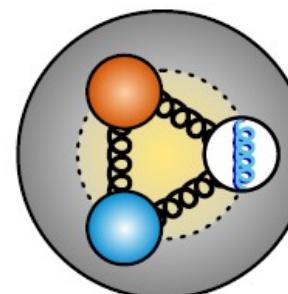
Meson



Tetraquark



Glueball

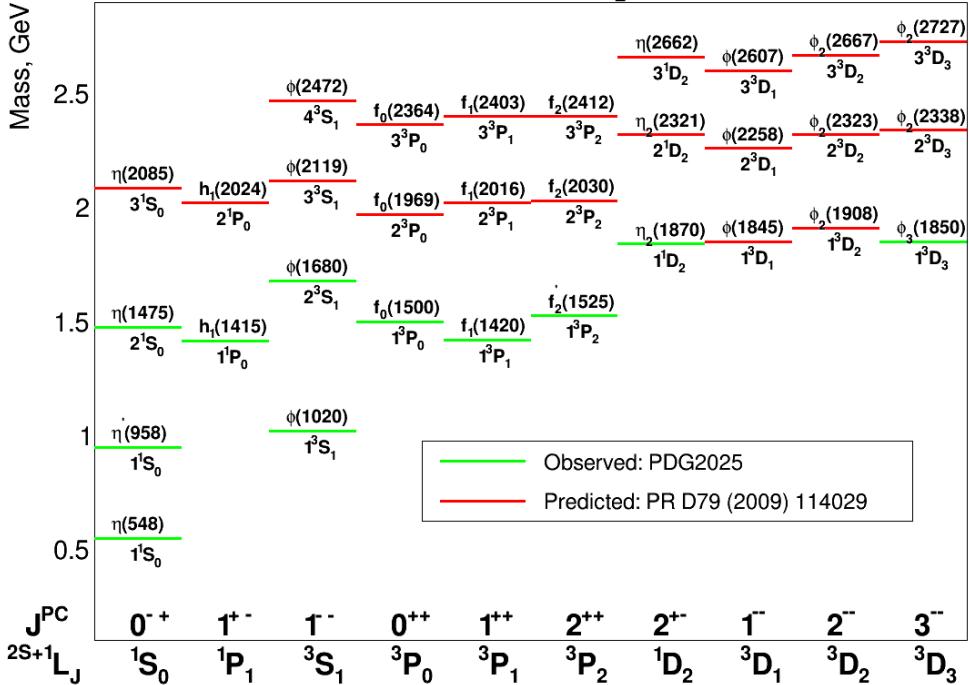


Hybrid

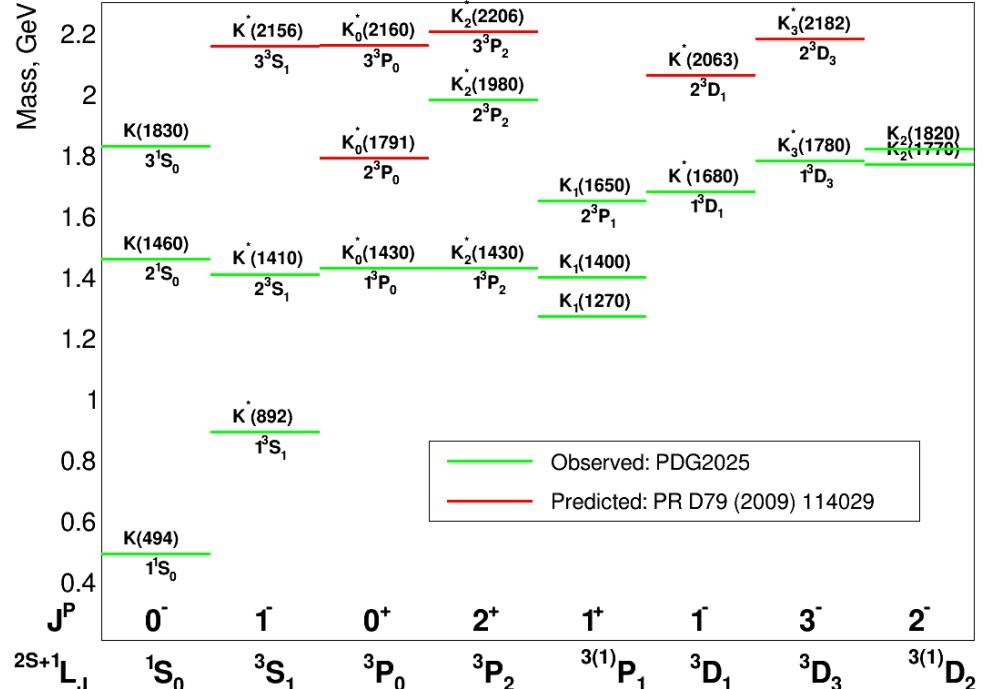
- В **фермион-антифермионной** системе:  $P = (-1)^{L+1}$ ,  $C = (-1)^{L+S}$
- Экзотические квантовые числа:  $0^{+-}$ ,  $0^{--}$ ,  $1^{-+}$ ,  $2^{+-}$ ...
- Экзотические **изотопические** свойства:  $Z_c$ ,  $T_{cc}$ ,  $T_{\psi\psi}$
- **Избыток состояний по сравнению** в ожидаемым  
числом в кварковой модели

# Спектр легких мезонов (*s* кварт)

Isoscalar mesons:  $c_1 (u\bar{u} + d\bar{d}) + c_2 s\bar{s}$



Strange mesons:  $K^+ = u\bar{s}$ ,  $K^0 = d\bar{s}$ ,  $\bar{K}^0 = \bar{d}s$ ,  $K^- = \bar{u}s$



- Спектр высших возбуждений мезонов все еще плохо изучен
- ВЭПП6 идеально подходит для изучения этого спектра в прямом сканировании и в распадах  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$

# Поиски легкого гибрида

За три десятка лет поисков **только 3 кандидата**

**( $1^{-+}$  изовекторы):**

- $\pi_1(1400)$ : виден в распаде на  $\eta\pi$
- $\pi_1(1600)$ : виден в распаде на  $\eta'\pi$ ,  $\rho\pi$ ,  $b_1\pi$ ,  $f_1\pi$
- $\pi_1(2015)$ : виден в распаде на  $b_1\pi$ ,  $f_1\pi$
- $\pi_1(1400)$  и  $\pi_1(1600)$  по видимому являются **одним резонансом**
- $\pi_1(2015)$  требует подтверждения

	Decay mode	Reaction	Experiment
$\pi_1(1400)$	$\eta\pi$	$\pi^- p \rightarrow \pi^- \eta p$	GAMS
		$\pi^- p \rightarrow \pi^0 \eta p$	KEK
		$\pi^- p \rightarrow \pi^- \eta p$	E852
		$\pi^- p \rightarrow \pi^0 \eta p$	E852
		$\bar{p}n \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta$	CBAR
		$\bar{p}p \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$	CBAR
$\pi_1(1600)$	$\rho\pi$	$\bar{p}p \rightarrow 2\pi^+ 2\pi^-$	Obelix
		$\pi^- Be \rightarrow \eta' \pi^- \pi^0 Be$	VES
	$b_1\pi$	$\pi^- p \rightarrow \pi^- \eta' p$	E852
		$\pi^- Be \rightarrow \omega \pi^- \pi^0 Be$	VES
		$\bar{p}p \rightarrow \omega \pi^+ \pi^- \pi^0$	CBAR
$\pi_1(2015)$	$\rho\pi$	$\pi^- p \rightarrow \omega \pi^- \pi^0 p$	E852
		$\pi^- Pb \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- X$	COMPASS
	$f_1\pi$	$\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$	E852
		$\pi^- p \rightarrow p \eta \pi^+ \pi^- \pi^-$	VES
	$f_1\pi$	$\pi^- p \rightarrow \omega \pi^- \pi^0 p$	E852
		$\pi^- p \rightarrow p \eta \pi^+ \pi^- \pi^-$	