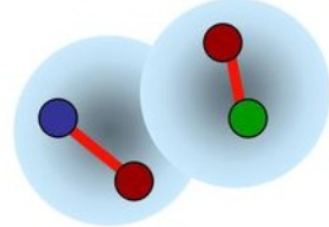
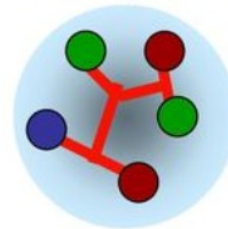
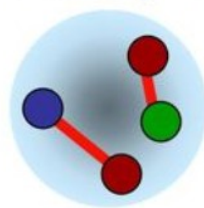
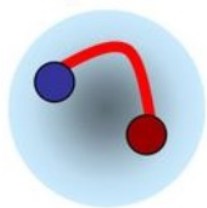


Спектроскопия легких мезонов и поиск экзотических состояний КХД



Леонид Кардапольцев

ИЯФ СО РАН

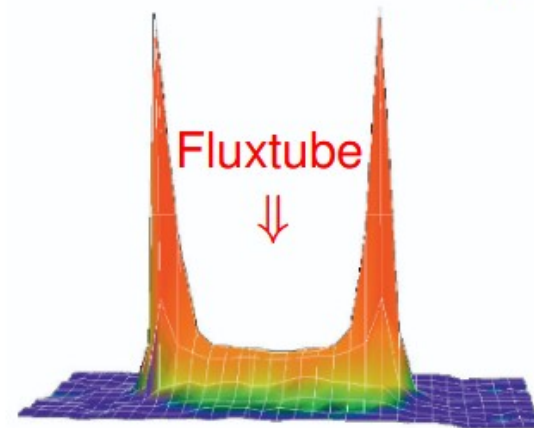
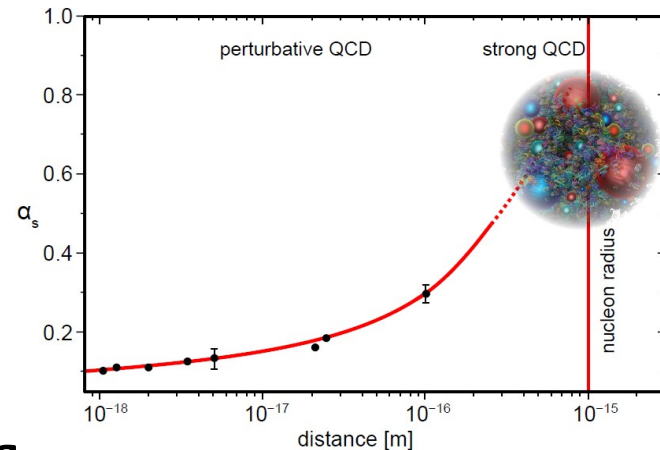
18 декабря, 2025

Актуальные вопросы КХД

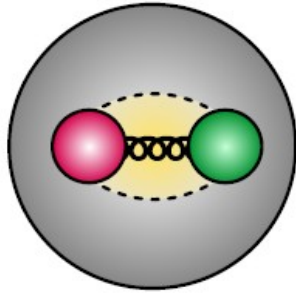
- **ВЭПП-6** это **фабрика легких адронов**
 - $e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$ от ϕ до J/ψ
 - Распады J/ψ и $\psi(2S)$
- Массы легких u, d, s кварков $< \Lambda_{\text{QCD}} \approx 300 \text{ МэВ}$
 - Легкие адроны идеально подходят для изучения **непертурбативных эффектов**
- **КХД на решетке**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

Актуальные вопросы КХД

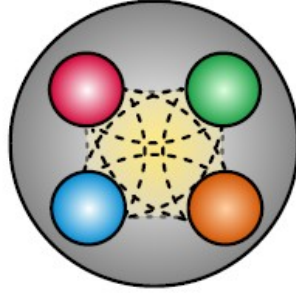
- Механизм генерации **динамической массы в КХД**
- **Конфайнмент КХД** – свойства струны, натянутой между кварками



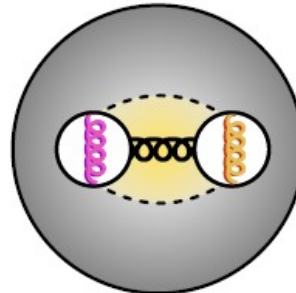
Актуальные вопросы КХД



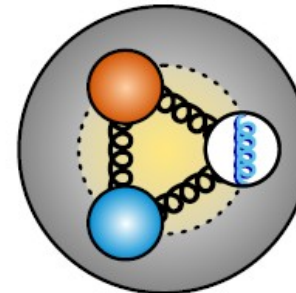
Meson



Tetraquark



Glueball



Hybrid

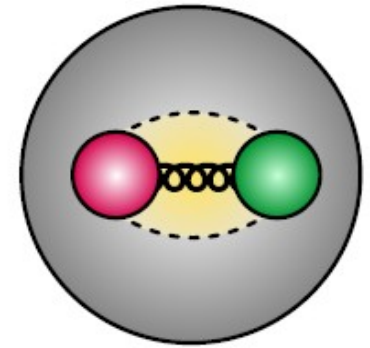
Экспериментальная информация, способная помочь найти ответы на эти вопросы

- 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 **кolor 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**: $P = (-1)^{L+1}$, $C = (-1)^{L+S}$

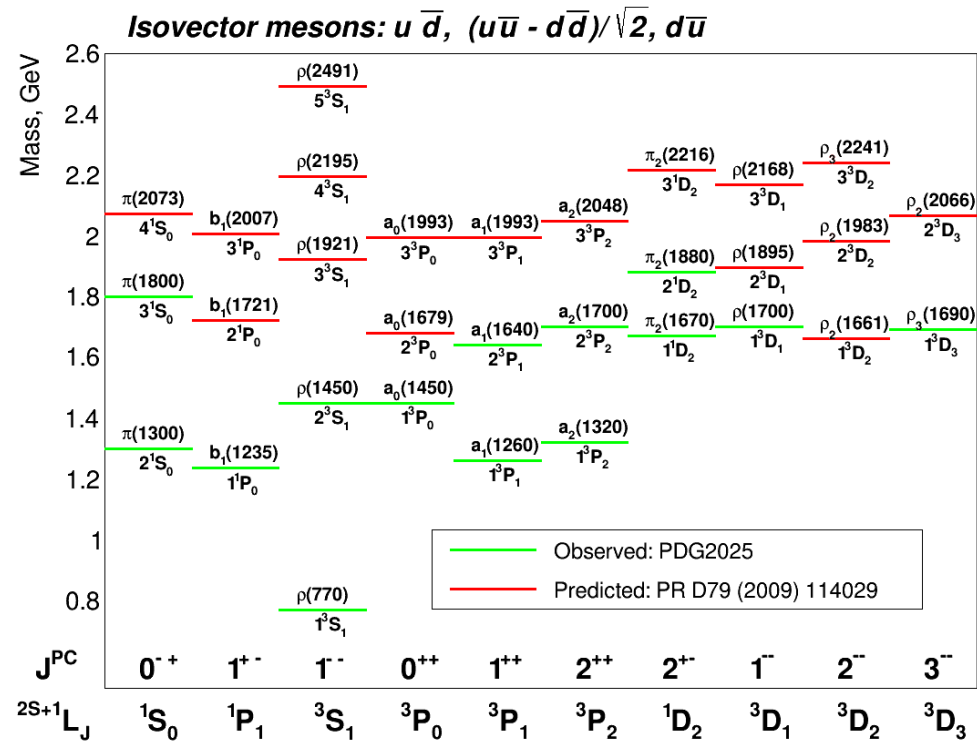
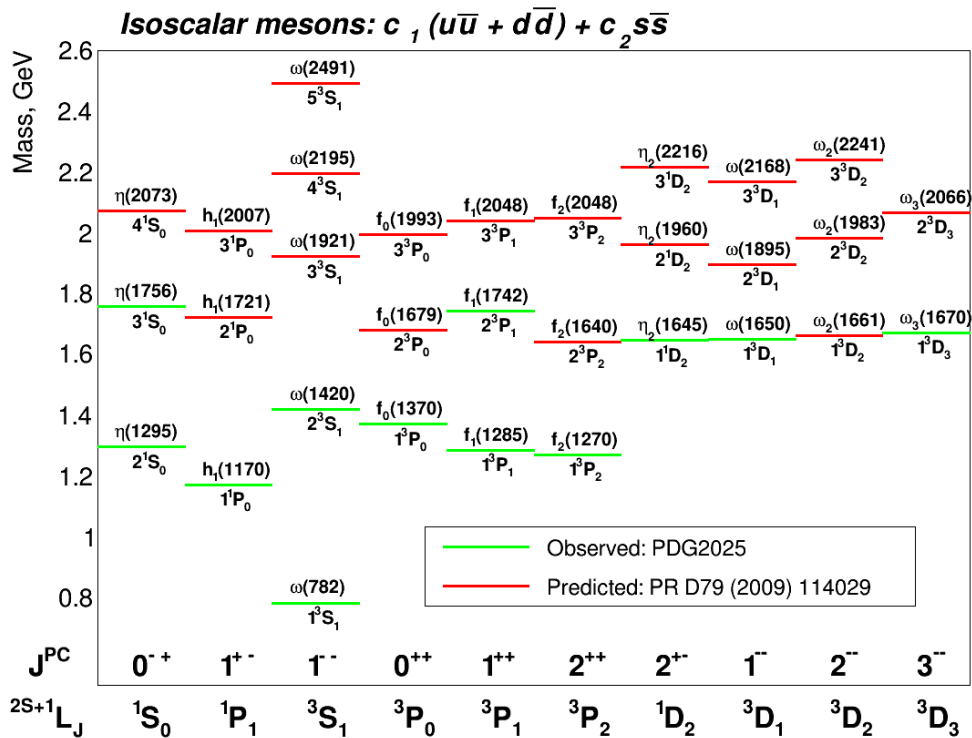


Meson

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

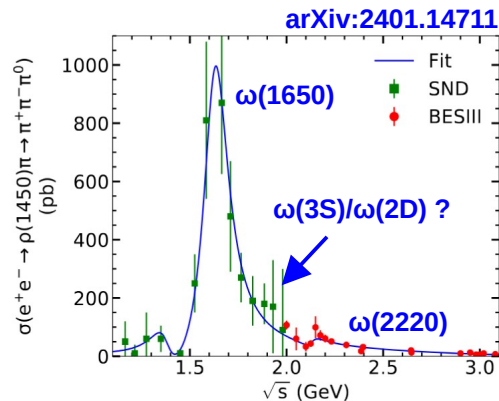
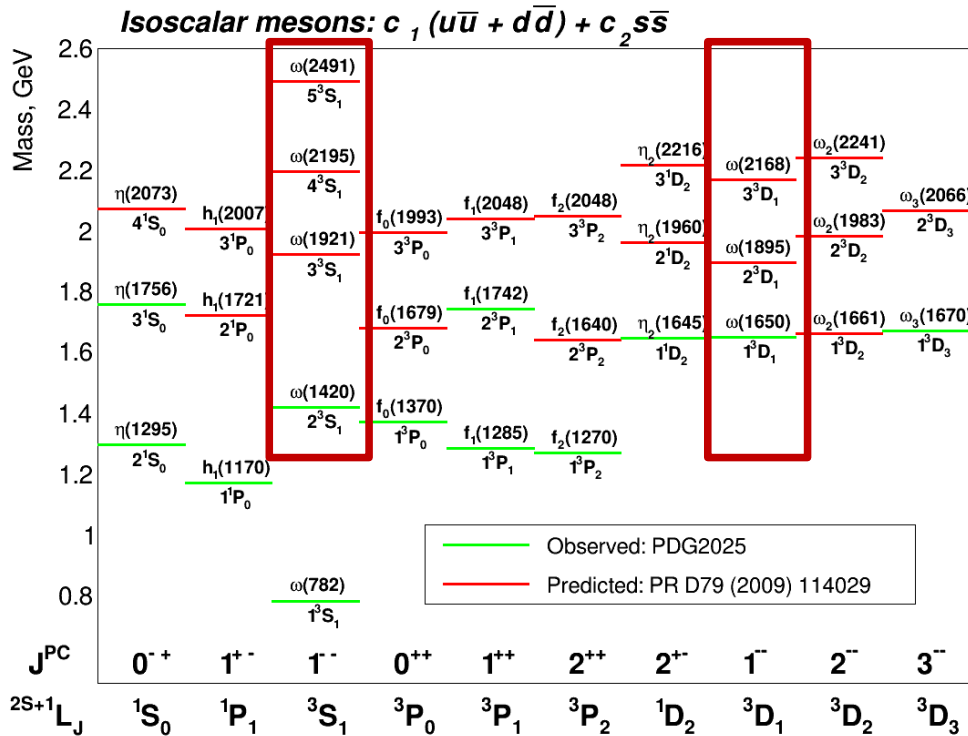
- Без аромата: 85 / **53** / **44**
- С открытой странностью: 28 / **20** / **16**
- **Много работы для ВЭПП-6 !**

Спектр легких мезонов (u, d кварки)



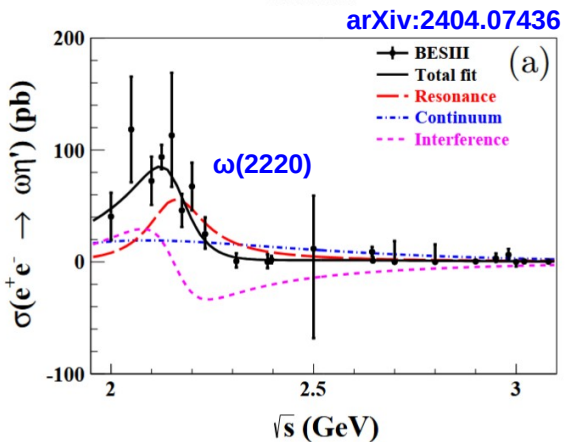
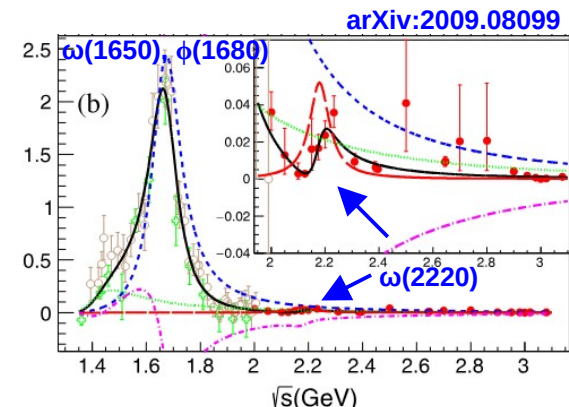
- Спектр высших возбуждений мезонов **все еще плохо изучен**
- ВЭПП-6 идеально подходит для изучения этого спектра **в прямом сканировании и в распадах J/ψ и ψ(2S)**

Спектр легких мезонов (u, d кварки)



Основные каналы распада $\omega(3S)$

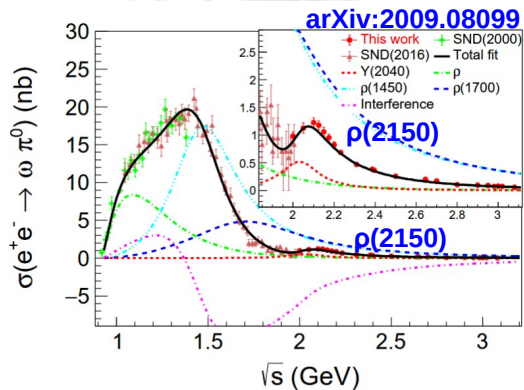
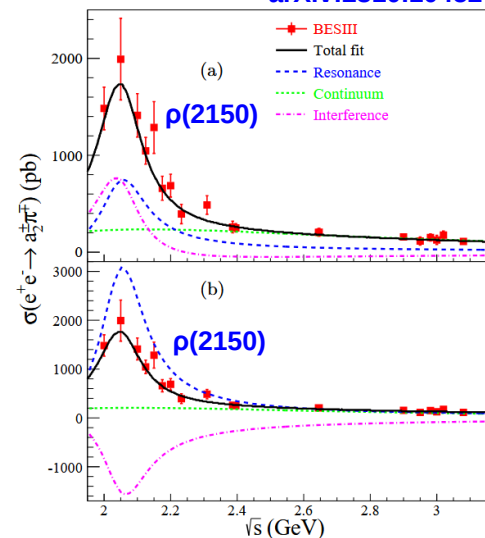
- $\rho(1450)\pi$
- $b_1\pi$



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

Спектр легких мезонов (u, d кварки)

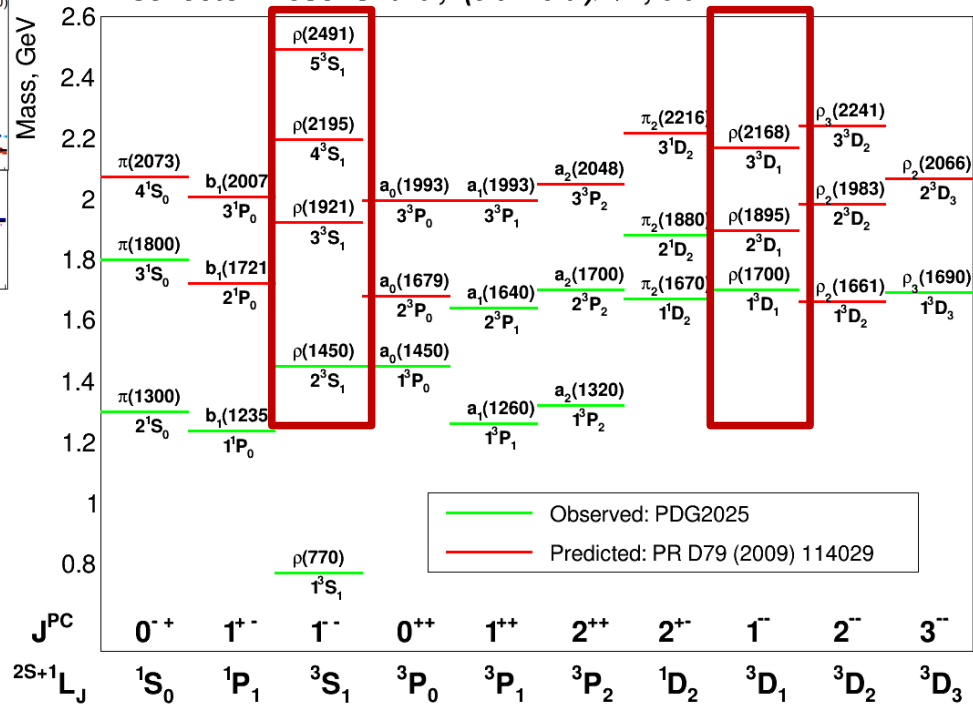
arXiv:2310.10452



Основные каналы распада $\rho(3S)$

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

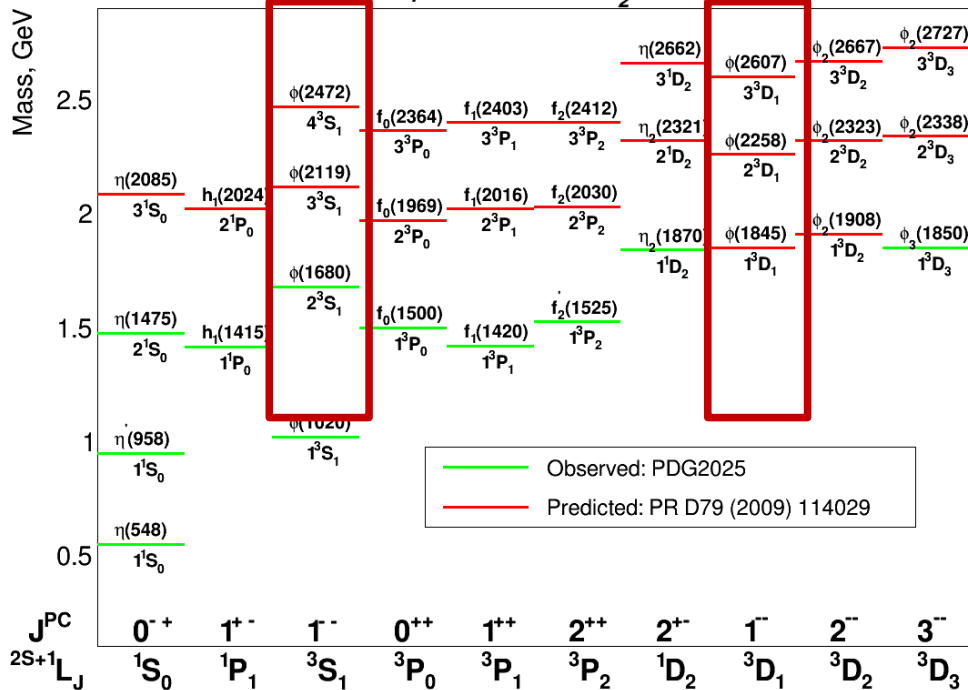
Isovector mesons: $u\bar{d}$, $(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$, $d\bar{u}$



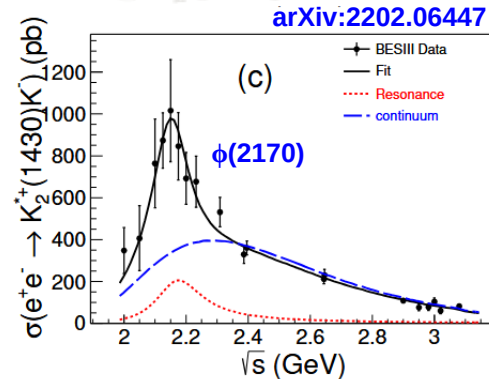
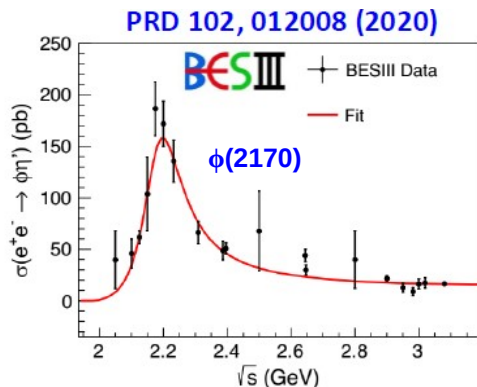
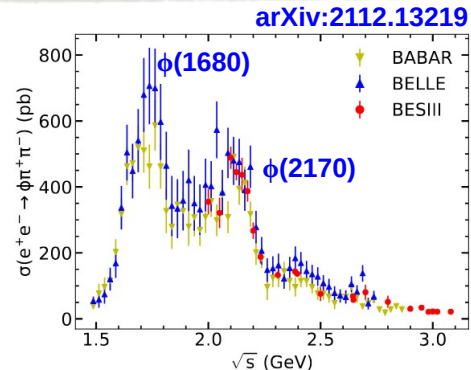
- Выше 2 ГэВ виден резонанс $\rho(2150)$
- Состояний вблизи 1.9 ГэВ до сих пор не обнаружено

Спектр легких мезонов (s кварк)

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



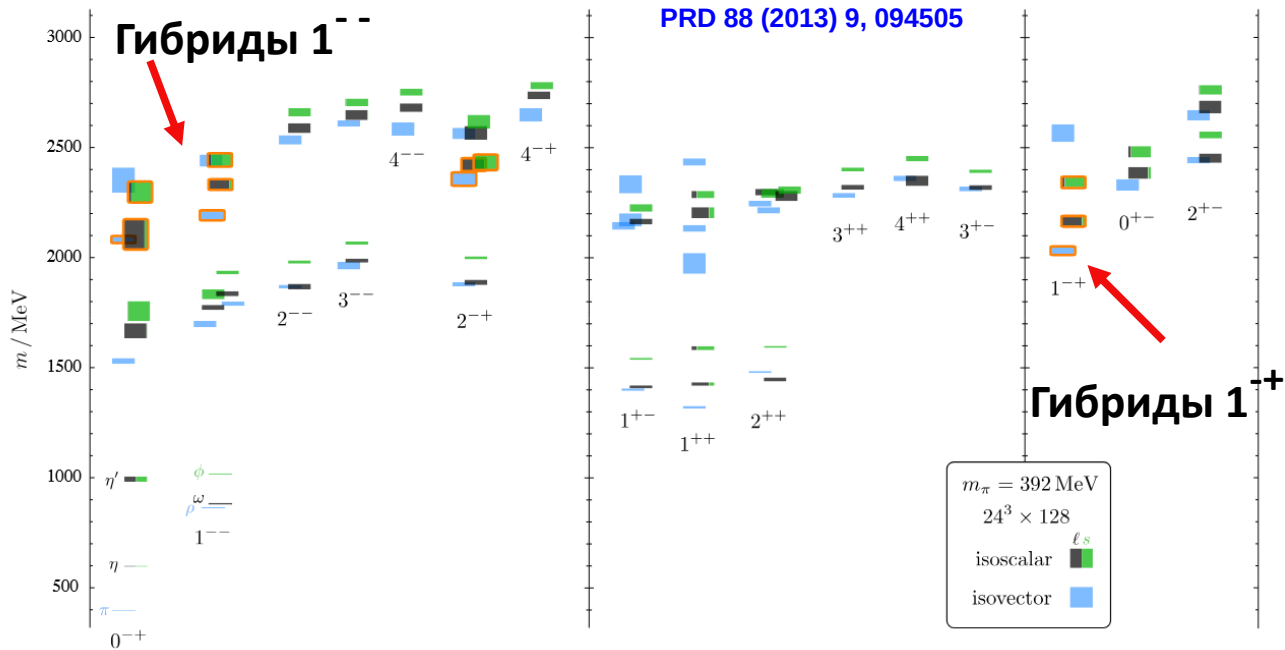
- Выше 2 ГэВ виден резонанс $\phi(2170)$
- Кандидат в странный гибрид



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

Легкие гибриды

Предсказания КХД на решетке



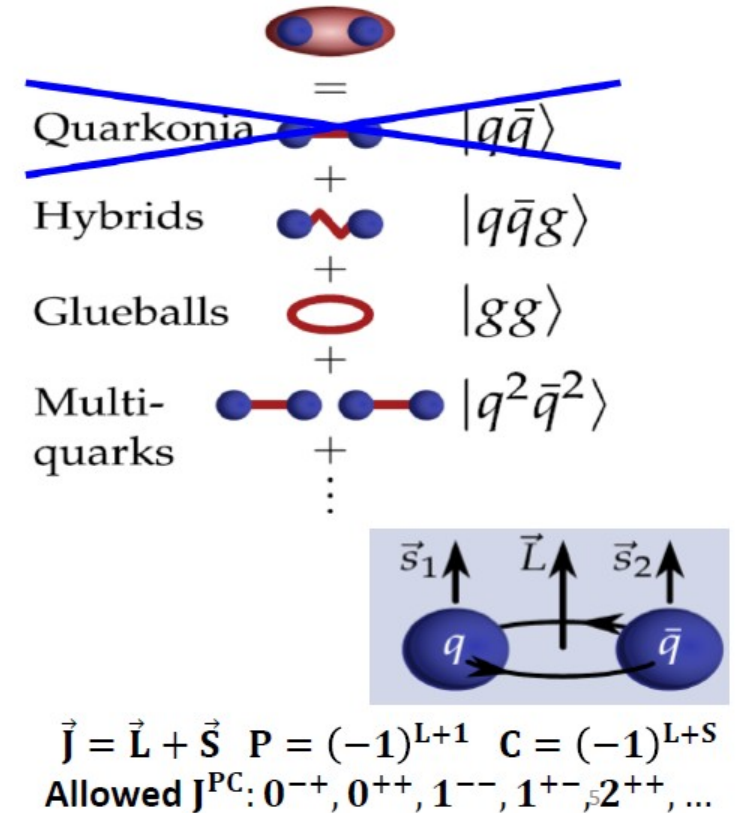
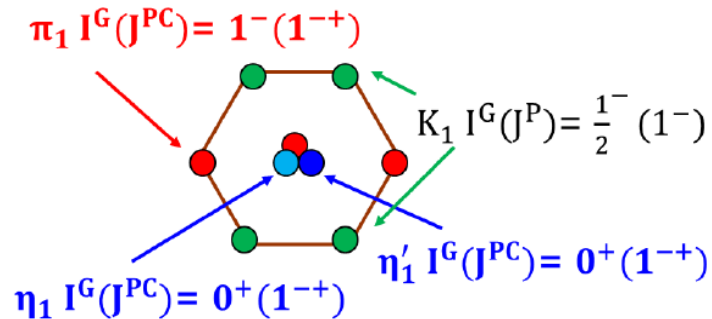
- Получен спектр легких мезонов для $m_\pi=392$ МэВ
- Природа полученных состояний анализируется по величине матричных элементов вида $\langle n | \mathcal{O}^\dagger | 0 \rangle$
- Оранжевым отмечены состояния, для которых доминируют матричные элементы, моделирующие хромоманнитные возбуждения

- Гибрид это связанное состояние **хромомангнитного 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 $0^{--}, (\text{четный})^{+-}, (\text{нечетный})^{-+}$
- 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 **нонет гибридов**



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 $\chi_{c1} \rightarrow \pi_1(1600)\pi$

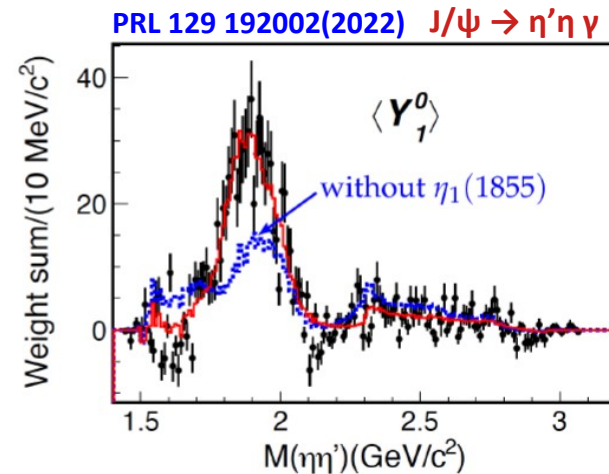
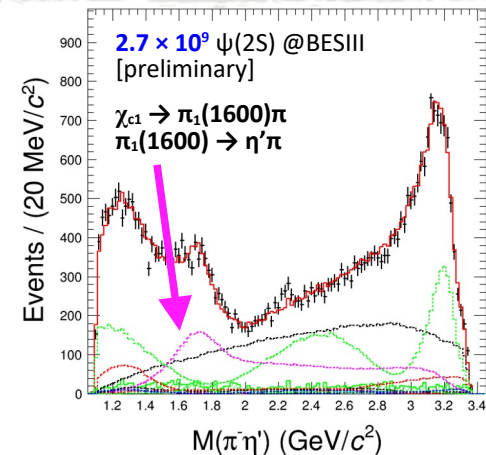
Изоскаляр 1^{-+} $\eta_1(1855)$ был обнаружен в распаде $J/\psi \rightarrow \eta'\eta\gamma$

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

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

Критически важна **независимая проверка этих результатов**

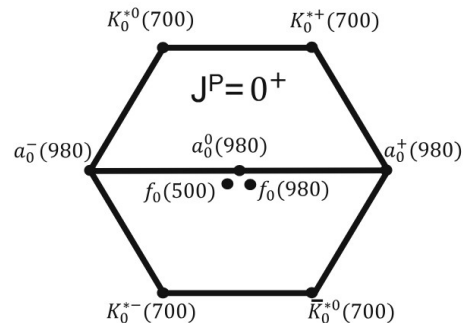
Поиск второго изоскаляра в нонете



Четырехкварковые состояния

Легкие четырехкварковые состояния

Нонет легчайших скаляров являются кандидатами в четырехкварковые состояния [1]

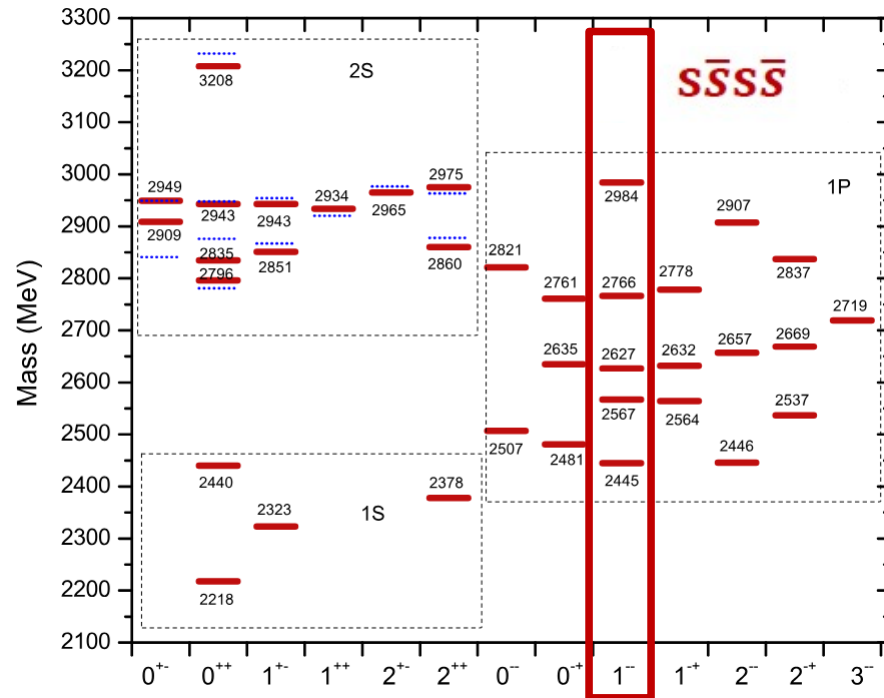


Противоречие с $q\bar{q}$ интерпретацией, $a_0(980)$ на 200 МэВ тяжелее $K_0^*(700)$

$f_0(500)$: $(qq)(\bar{q}\bar{q})$
 $f_0(980), a_0(980)$: $(qs)(\bar{q}\bar{s})$
 $K_0^*(700)$: $(qq)(\bar{s}\bar{q})$

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

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



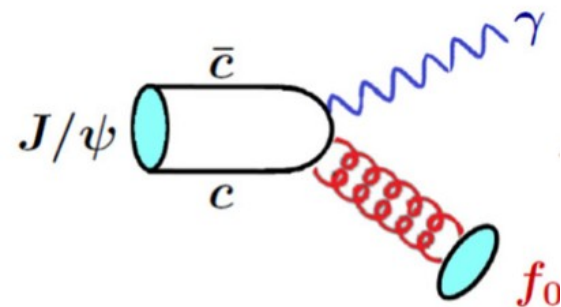
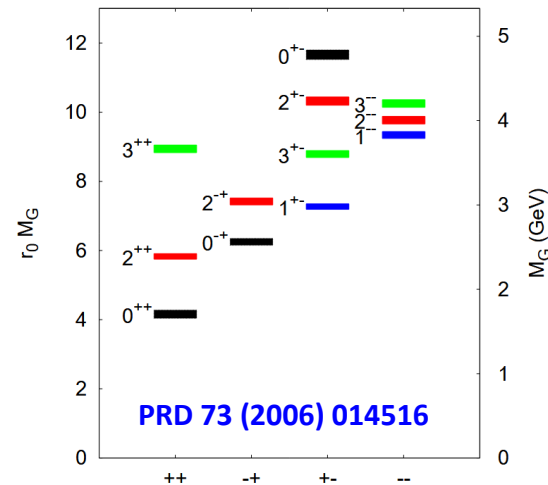
Наиболее интересные процессы для поиска $e^+e^- \rightarrow \phi\phi, \Xi\Xi, KK$ и т.п.

Только на ВЭПП-6!

Глюболы

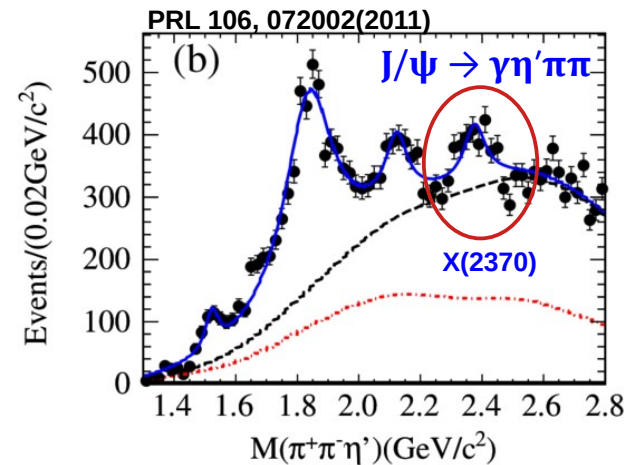
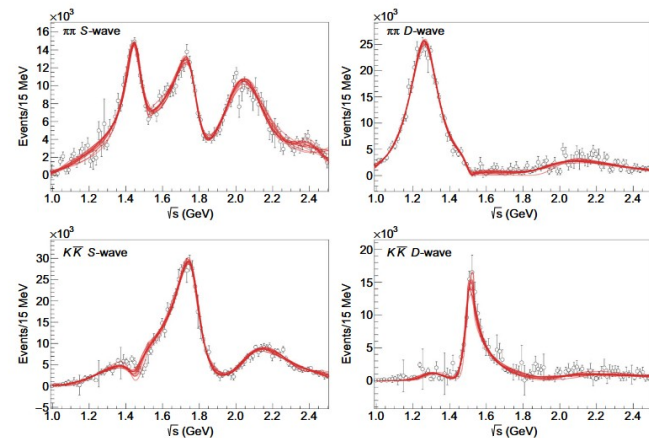
Глюболы в рад. распадах J/ψ и $\psi(2S)$

- 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/ψ и $\psi(2S)$ **радиационно распадается** в два глюона, давая **обогащенную глюонами среду**
- Высокая вероятность перехода в состояния **с глюонными возбуждениями**



Скалярный и псевдоскалярный глюболы

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

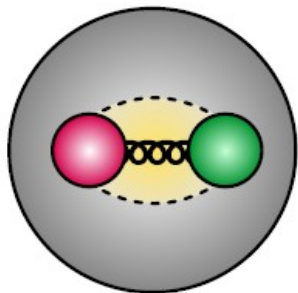


Заключение

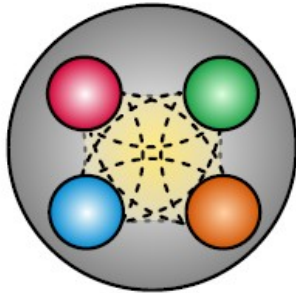
- Изучение **легких мезонов**
 - **Треть резонансов в PDG2025** до сих пор **плохо изучены**
 - **Кварковая модель** предсказывает много **новых частиц**
- **Сканирование от 2 до 3.08 ГэВ**
 - LQCD предсказывает **странный гибрид** с $J^{PC} = 1^{--}$
 - Поиск **четырёхкварковых состояний**
- **Радиационные распады J/ψ 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

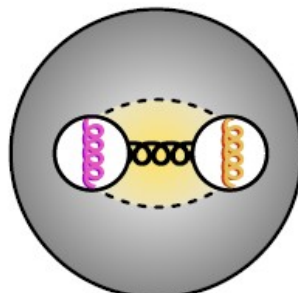
Поиск экзотических состояний КХД



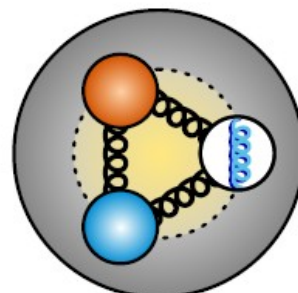
Meson



Tetraquark



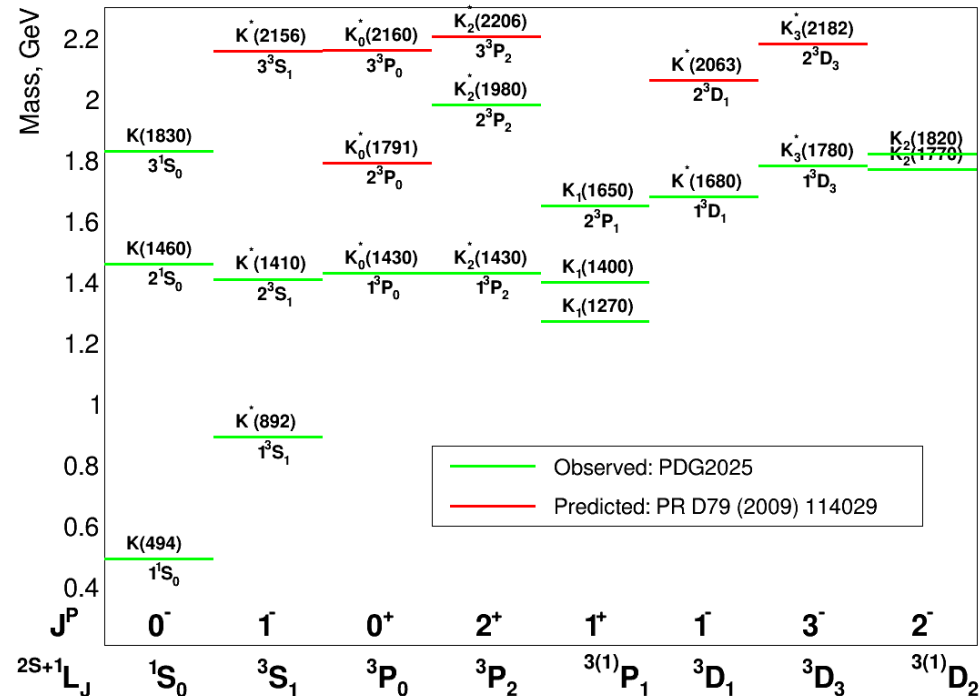
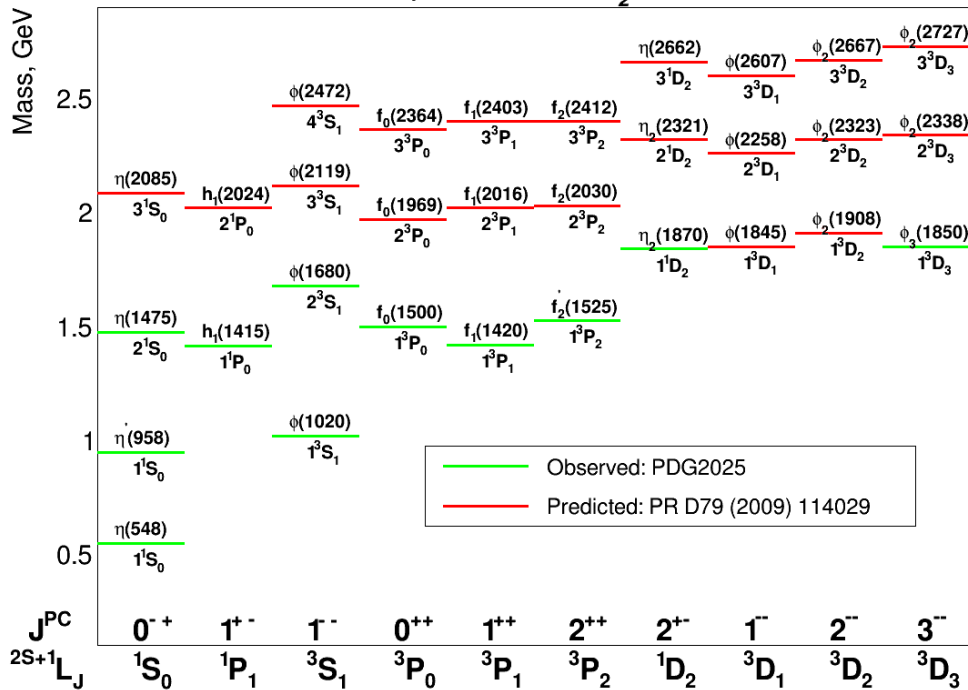
Glueball



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 кварк)



- Спектр высших возбуждений мезонов все еще плохо изучен
- ВЭППб идеально подходит для изучения этого спектра в прямом сканировании и в распадах J/ψ 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
$\pi_1(1400)$	$\eta\pi$	$\pi^-p \rightarrow \pi^- \eta p$ $\pi^-p \rightarrow \pi^0 \eta n$ $\pi^-p \rightarrow \pi^- \eta p$ $\pi^-p \rightarrow \pi^0 \eta n$ $\bar{p}n \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta$ $\bar{p}p \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$	GAMS KEK E852 E852 CBAR CBAR
	$\rho\pi$	$\bar{p}p \rightarrow 2\pi^+ 2\pi^-$	Obelix
$\pi_1(1600)$	$\eta'\pi$	$\pi^- Be \rightarrow \eta' \pi^- \pi^0 Be$ $\pi^- p \rightarrow \pi^- \eta' p$	VES E852
	$b_1\pi$	$\pi^- Be \rightarrow \omega \pi^- \pi^0 Be$ $\bar{p}p \rightarrow \omega \pi^+ \pi^- \pi^0$ $\pi^- p \rightarrow \omega \pi^- \pi^0 p$	VES CBAR E852
	$\rho\pi$	$\pi^- Pb \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- X$ $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- p$	COMPASS E852
	$f_1\pi$	$\pi^- p \rightarrow p \eta \pi^+ \pi^- \pi^-$ $\pi^- A \rightarrow \eta \pi^+ \pi^- \pi^- A$	E852 VES
$\pi_1(2015)$	$f_1\pi$	$\pi^- p \rightarrow \omega \pi^- \pi^0 p$	E852
	$b_1\pi$	$\pi^- p \rightarrow p \eta \pi^+ \pi^- \pi^-$	