

Поиск экзотических состояний КХД

Леонид Кардапольцев

База отдыха «Разлив»

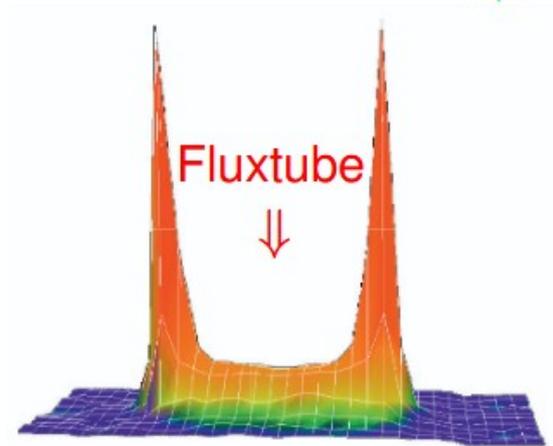
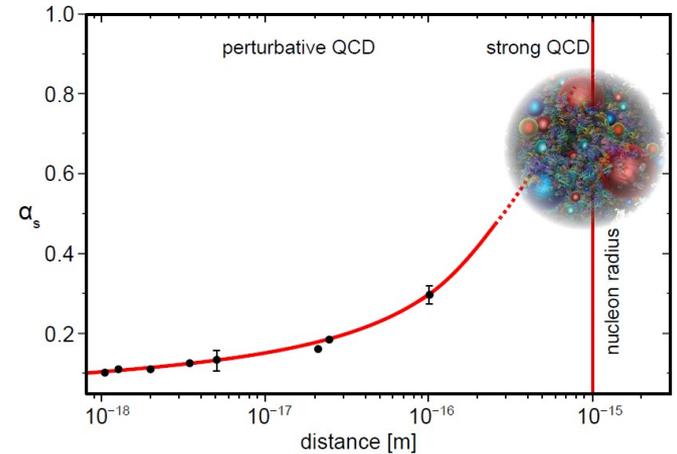
Выездное собрание «Дискуссионного клуба»

22-25 июля, 2025

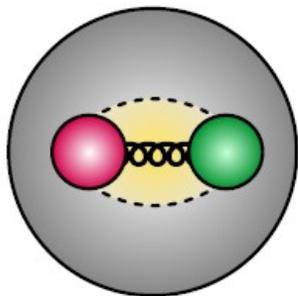
Нерешенные вопросы КХД

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

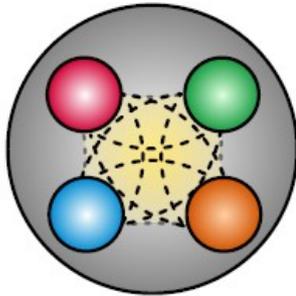
- Массы легких u, d, s кварков $< \Lambda_{\text{QCD}} \approx 300 \text{ МэВ}$
- Ключевую роль играют **непертурбативные эффекты**
- Очень сложно описать теоретически
 - Вычисления на решетках **вычислительно затратны**
 - Модельные подходы **не дают полной ясности**



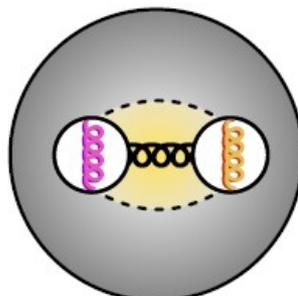
Нерешенные вопросы КХД



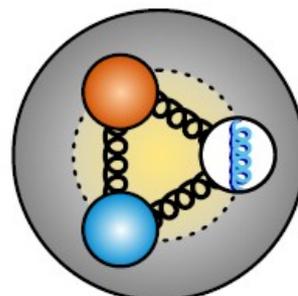
Meson



Tetraquark



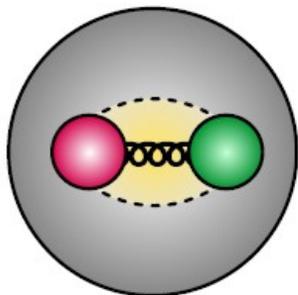
Glueball



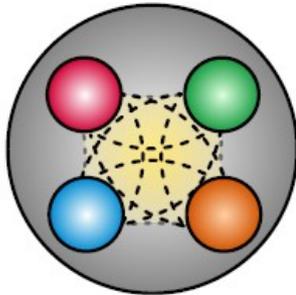
Hybrid

Изучение экзотических состояний КХД может помочь найти ответы на эти вопросы

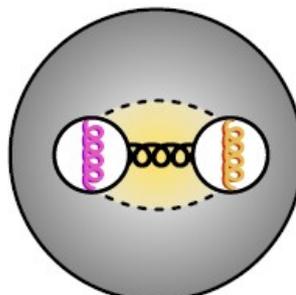
Поиск экзотических состояний КХД



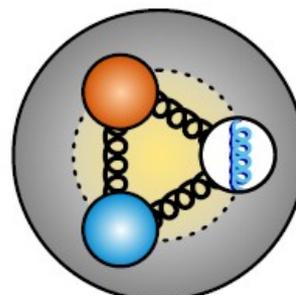
Meson



Tetraquark



Glueball

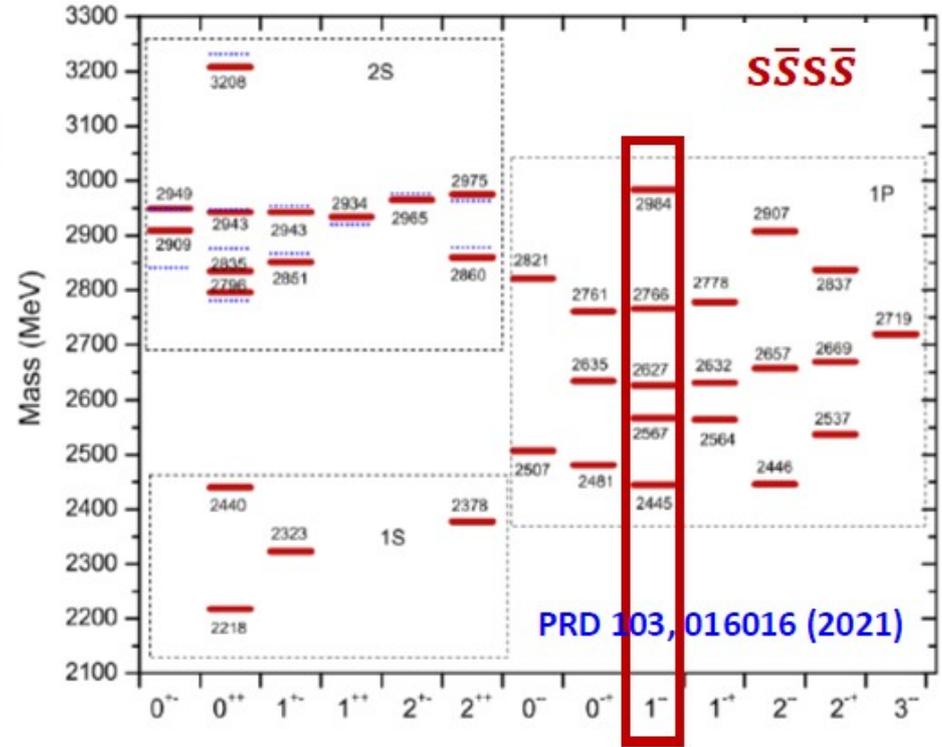
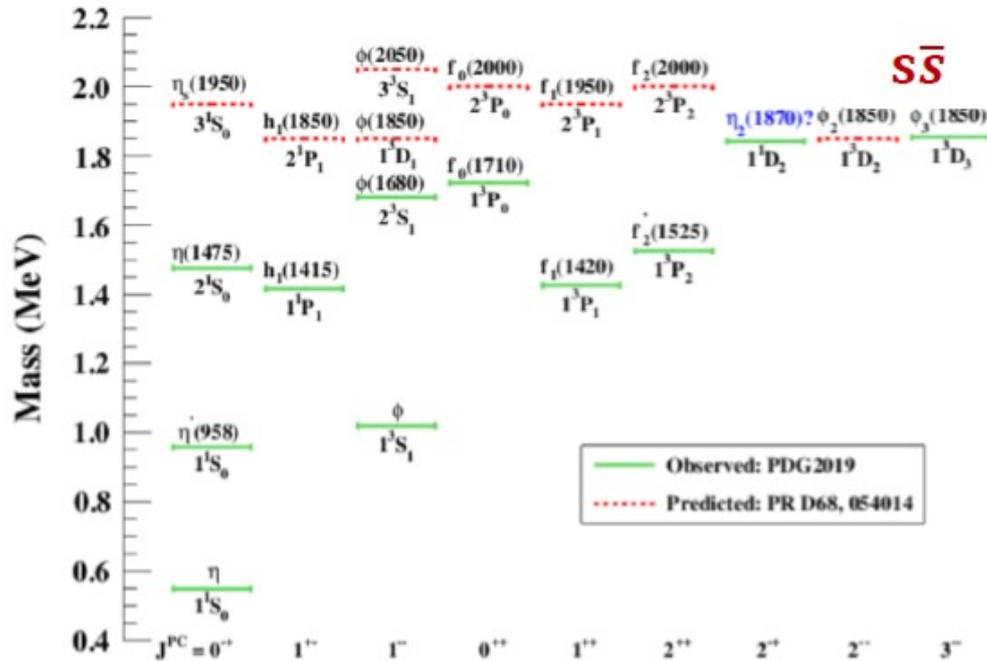


Hybrid

- 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

$\phi(2170) / \gamma(2175)$

Спектр ss кваркониев



- Спектр ss плохо изучен
- Поиск гибридов ssg
- Четырехкварковые состояния $ssss/ssuu/ssdd$

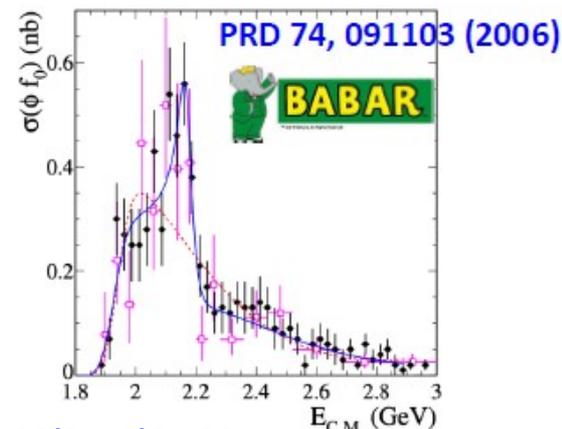
$J^{PC} = 1^{-+}$ выше 2.3 ГэВ все еще отсутствует в PDG

$\phi(2170) / \Upsilon(2175)$

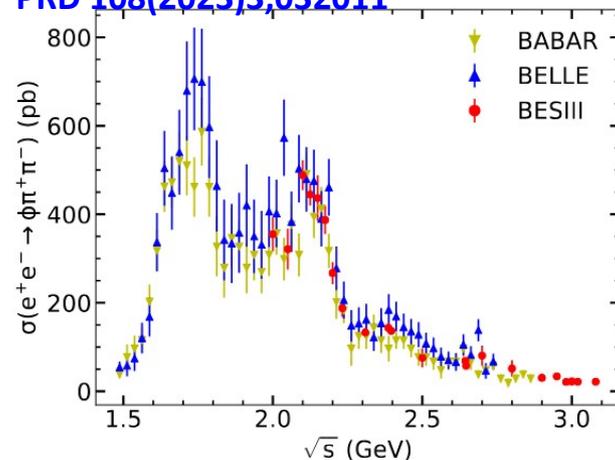
$\phi(2170) / \Upsilon(2175)$:

- Впервые обнаружен **BaBar** в $\phi f_0(980)$ [PRD 74, 091103 (2006)]
- Позже подтвержден
 - BESIII [PRL 100, 102003 (2008)]
 - Belle [PRD 80, 031101 (2009)]
- Возможная **связь с состояниями из тяжелых кварков**

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



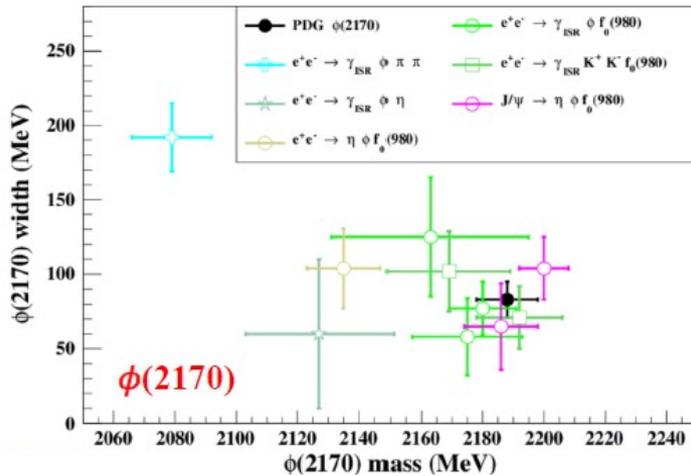
PRD 108(2023)3,032011



$\phi(2170) / \Upsilon(2175)$

Основные моды распада(PDG):

- $\phi\pi^+\pi^-$, $\Gamma \cdot B_{ee} \approx 30$ эВ
- $\phi\eta'$, $\Gamma \cdot B_{ee} \approx 7$ эВ
- $\phi\eta$, $\Gamma \cdot B_{ee} \approx 0.2$ эВ
- $\phi f_0(980)$, $\Gamma \cdot B_{ee} \approx 2.5$ эВ
- $K_S K_L$, $\Gamma \cdot B_{ee} \approx 1$ эВ, $K^* K$, $\Gamma \cdot B_{ee} \approx 1-7$ эВ
- $K^* K^*$ не обнаружен



- Масса и ширина в разных измерениях **не всегда хорошо согласуются**
- Извлечение параметров **осложнено интерференцией** с другими механизмами

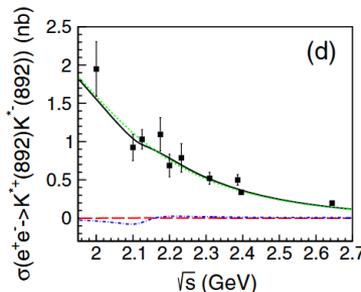
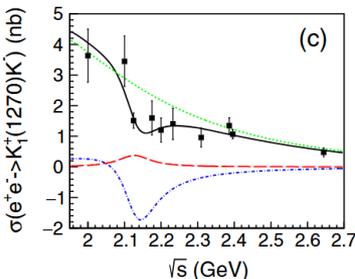
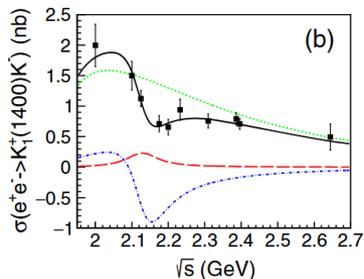
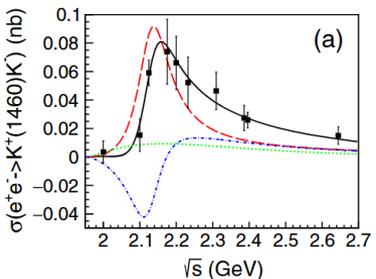
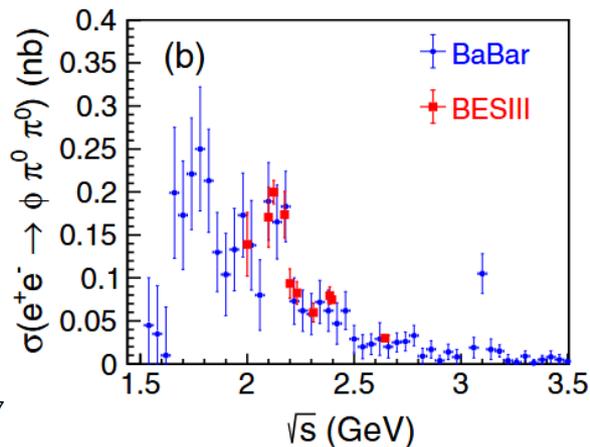
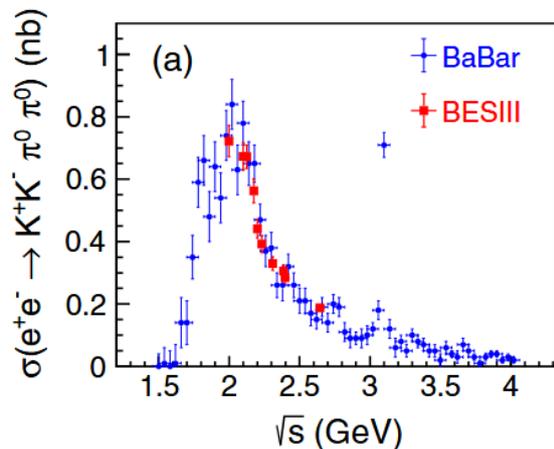
Возможные интерпретации:

- 2^3D_1 или 3^3S_1 сосостояни обычного ss
- ssg гибрид
- тетракварк
- Связное состояние $\Lambda\Lambda$
- Взаимодействие в конечном состоянии $\phi f_0(980)$

$\phi(2170) / \Upsilon(2175): e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$

$e^+e^- \rightarrow K^+K^-\pi^0\pi^0$ [PRL 124, 11, 112001 (2020)]

- Амплитудный анализ с **300 пб⁻¹** данных E=2.0-2.644 ГэВ
- Значимость $\phi(2170)$ составила **6.3 σ**
- Распадается в **$K^+(1460)K^-$, $K_1^+(1400)K^-$ и $K_1^+(1270)K^-$**
- Не обнаружен распад в **K^*K^***
- Не согласуется с 2^3D_1 или 3^3S_1 (**K^*K^* должен доминировать**)
- Не согласуется с ssg (**$K^+(1460)K^-$ должен быть подавлен**)



$\phi(2170) / \Upsilon(2175): e^+e^- \rightarrow \phi\eta, \phi\eta'$

$e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ на BESIII:

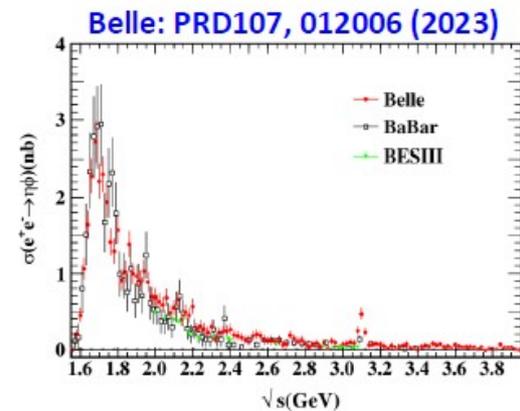
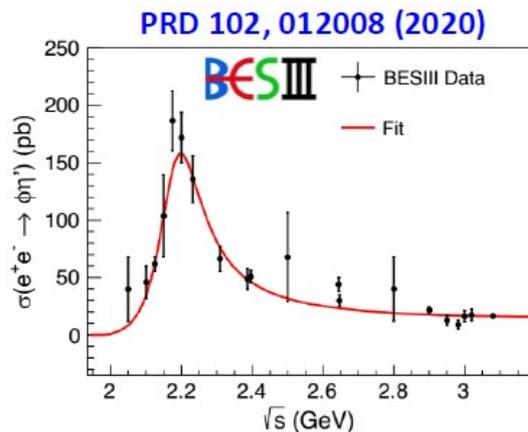
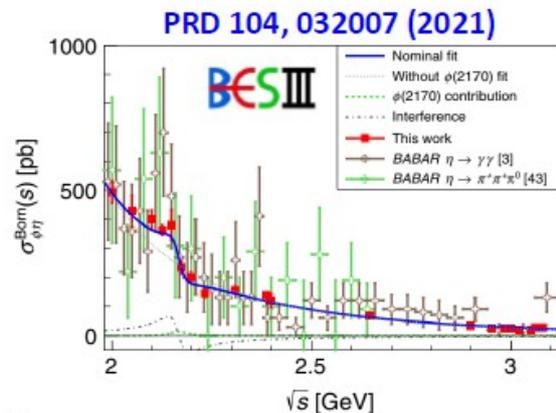
- **715 пб⁻¹** данных с E=2.00 - 3.08 ГэВ
- Статистическая значимость **> 10 σ**

$e^+e^- \rightarrow \phi\eta'$ на BESIII:

- **640 пб⁻¹** данных с E=2.05 - 3.08 ГэВ
- Статистическая значимость **> 10 σ**
- Вклады $\rho(2150)$ и $\omega(2220)$ подавлены (OZI + изоспин)

$$\frac{B(e^+e^- \rightarrow \phi\eta)}{B(e^+e^- \rightarrow \phi\eta')} = 0.23 \pm 0.10 \pm 0.18$$

Не согласуется с предсказаниями для ssg гибрида 2 - 200

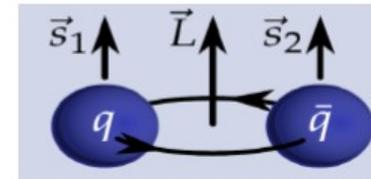
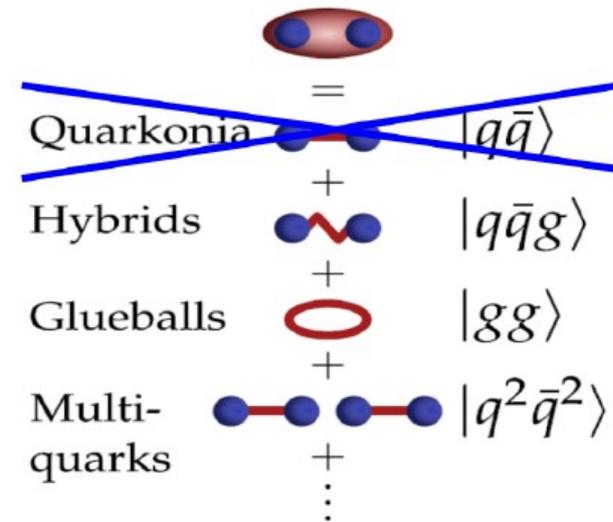
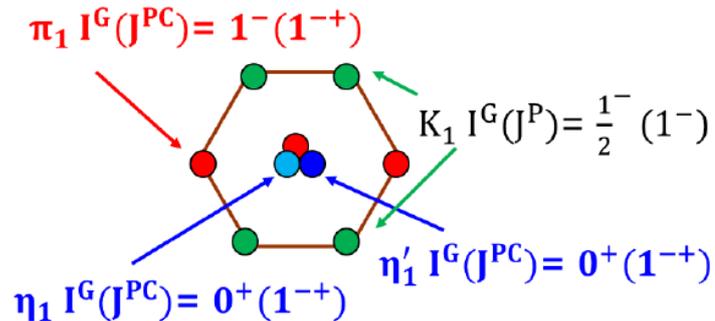


Поиск легкого гибрида

Легкие адроны с экзотическими J^{PC}

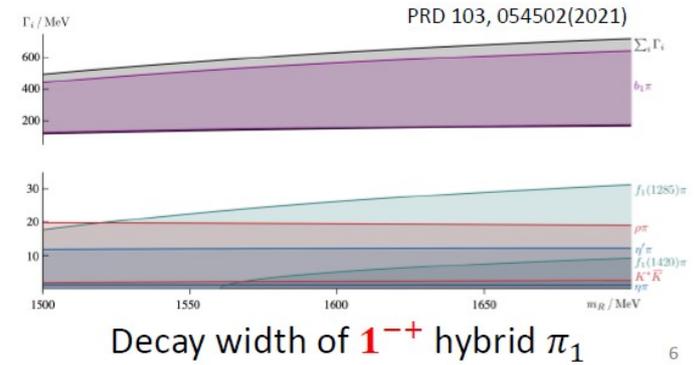
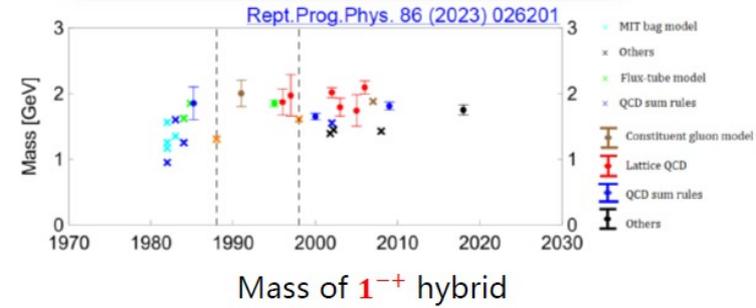
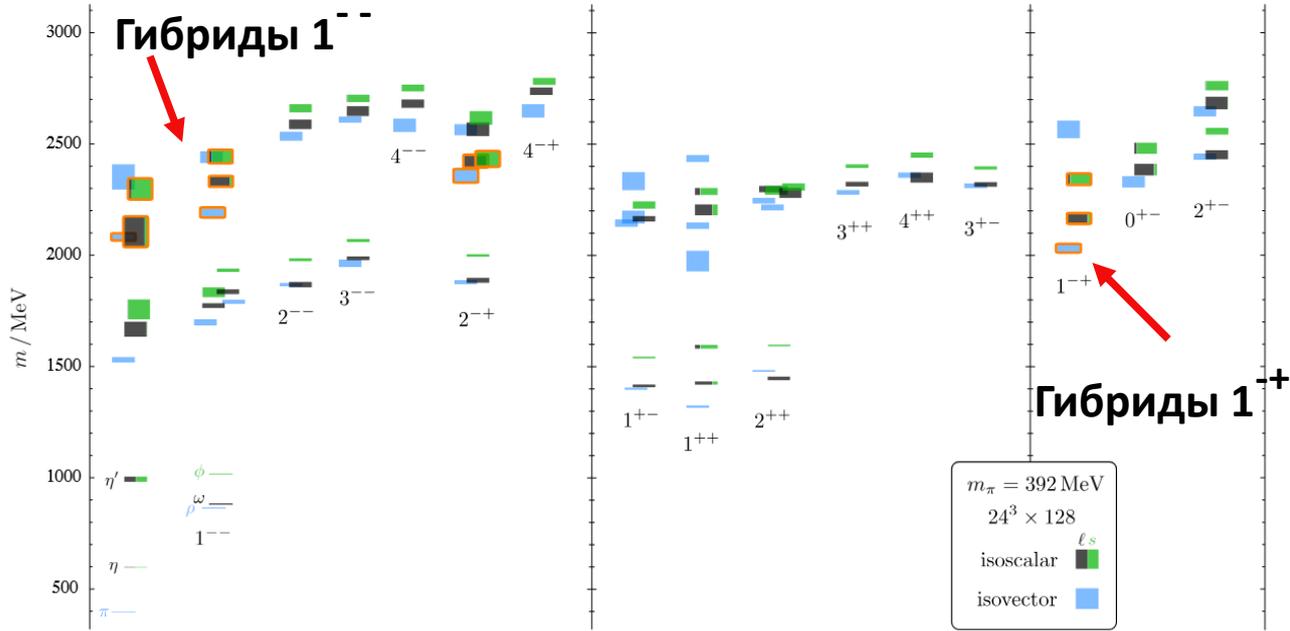
- В фермион-антифермионной системе запрещены квантовые числа $0^{--}, (\text{четный})^{+-}, (\text{нечетный})^{-+}$
- Обнаружение адрона с этими квантовыми числами будет однозначно указывать на экзотическую природу

Квантовые числа 1^{-+} может давать связанное состояние хромомангнитного глюонного возбуждения и qq пары в S волне и колор октетном состоянии



$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ $P = (-1)^{L+1}$ $C = (-1)^{L+S}$
 Allowed J^{PC} : $0^{-+}, 0^{++}, 1^{--}, 1^{+-}, 2^{++}, \dots$

Свойства легкого гибрида с $J^{PC} = 1^{-+}$



- Предсказания LQCD $\approx 2 \text{ ГэВ}$, но для $m_\pi=392 \text{ МэВ}$

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
$\pi_1(1600)$	$\eta'\pi$	$\pi^-Be \rightarrow \eta'\pi^-\pi^0Be$ $\pi^-p \rightarrow \pi^-\eta'p$	VES E852
	$b_1\pi$	$\pi^-Be \rightarrow \omega\pi^-\pi^0Be$ $\bar{p}p \rightarrow \omega\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^-p \rightarrow \omega\pi^-\pi^0p$	VES CBAR E852
	$\rho\pi$	$\pi^-Pb \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^-X$ $\pi^-p \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^-p$	COMPASS E852
	$f_1\pi$	$\pi^-p \rightarrow \rho\eta\pi^+\pi^-\pi^-$ $\pi^-A \rightarrow \eta\pi^+\pi^-\pi^-A$	E852 VES
$\pi_1(2015)$	$f_1\pi$	$\pi^-p \rightarrow \omega\pi^-\pi^0p$	E852
	$b_1\pi$	$\pi^-p \rightarrow \rho\eta\pi^+\pi^-\pi^-$	

Изоскалярный легкий гибрид $\eta_1(1855)$

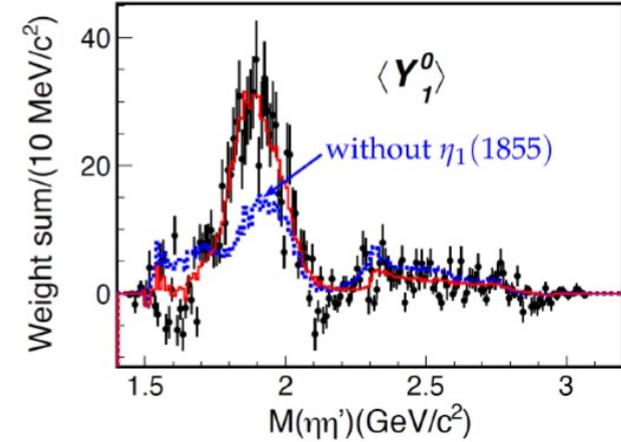
PRL 129 192002(2022) , PRD 106 072012(2022)

Изоскаляр 1^{-+} был обнаружен в $J/\psi \rightarrow \eta' \eta \gamma$ ($>19\sigma$)

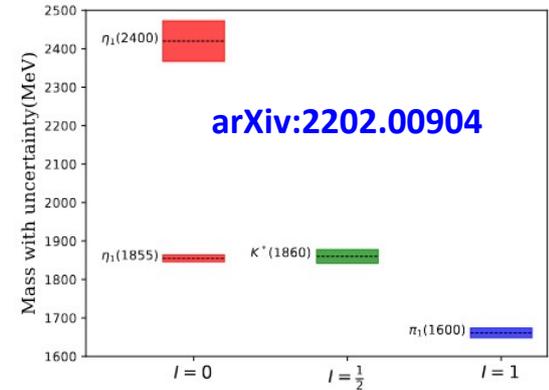
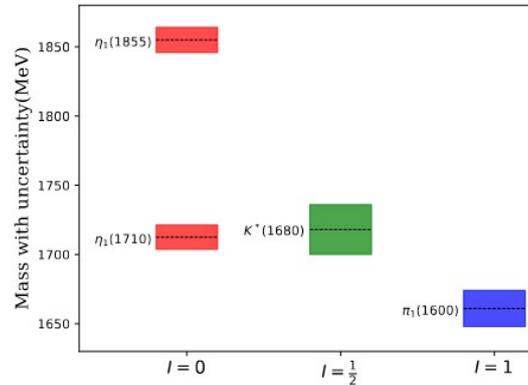
$$M = (1855 \pm 9_{-1}^{+6}) \text{ MeV}/c^2, \Gamma = (188 \pm 18_{-8}^{+3}) \text{ MeV}/c^2$$

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

Для подтверждения гибридной природы **требуется**
обнаружить изоскалярный партнер

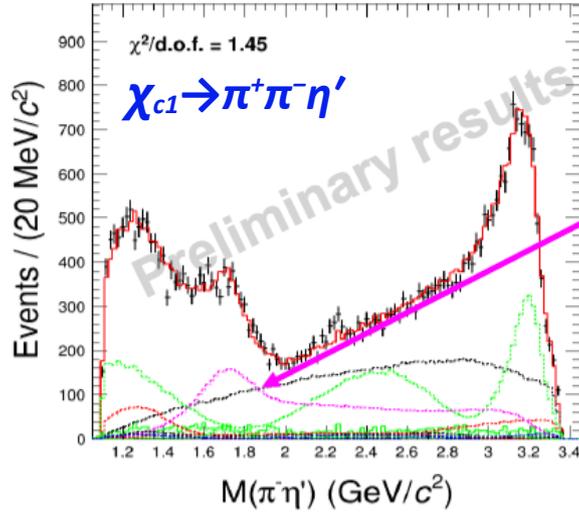


- Гибрид
- K1(1400) К молекула
- Четырехкварковое состояние



$\chi_{c1} \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta^{(\prime)}$ на BESIII

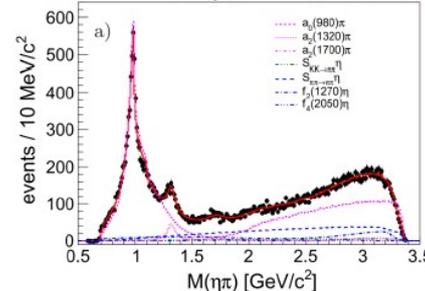
$2.7 \times 10^9 \psi(3686)$ @BESIII [preliminary]



- Amplitude analysis of $\chi_{c1} \rightarrow \eta' \pi^+ \pi^-$ is performed
- $\pi_1(1600)$ observed $> 10\sigma$
- with a significant BW phase motion
- $J^{PC} = 1^{-+}$, better than other assignments well over 10σ
 - Evidence of $\pi_1 \rightarrow \eta' \pi$ at CLEO-c is confirmed [PR D84 112009 (2011)]

PR D95 032002(2017)

$44.8 \times 10^7 \psi(3686)$ @BESIII



No evidence of $\pi_1 \rightarrow \eta \pi$

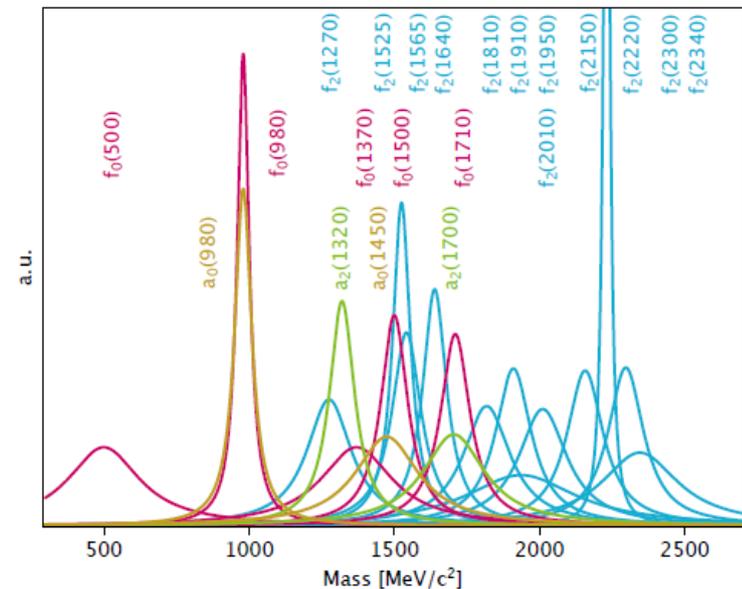
Сложности в изучении свойств резонансов

Детальное изучение свойств адронов

- Спектр легких адронов **очень плотно заселен**
- Многие резонансы **перекрываются и интерферируют**
- Сложная картина каналов распада: **пороги, перерасcеяние**
- Иногда резонансы **проявляются не как пик**
- **Пик не всегда** соответствует резонансу

Сложно определить свойства резонанса

spectrum of well established states

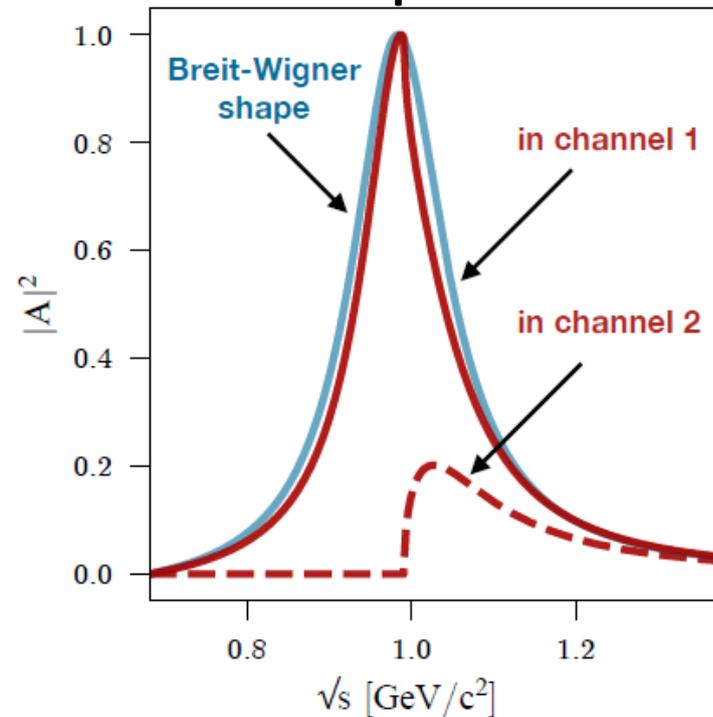


Детальное изучение свойств адронов

- Спектр легких адронов **очень плотно заселен**
- Многие резонансы **перекрываются и интерферируют**
- Сложная картина каналов распада: **пороги, перерасcеяние**
- Иногда резонансы **проявляются не как пик**
- **Пик не всегда** соответствует резонансу

Совместный анализ связанных каналов может помочь распутать эти неопределенности

Сложно определить свойства резонанса

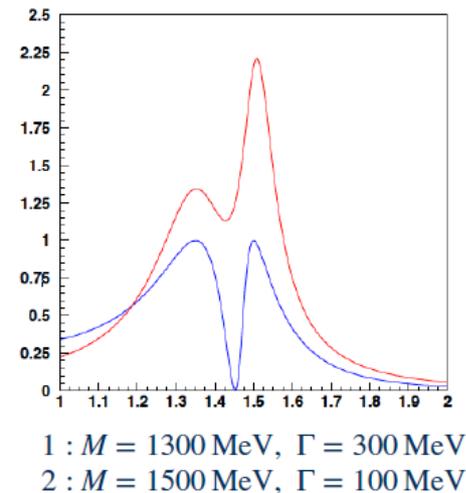
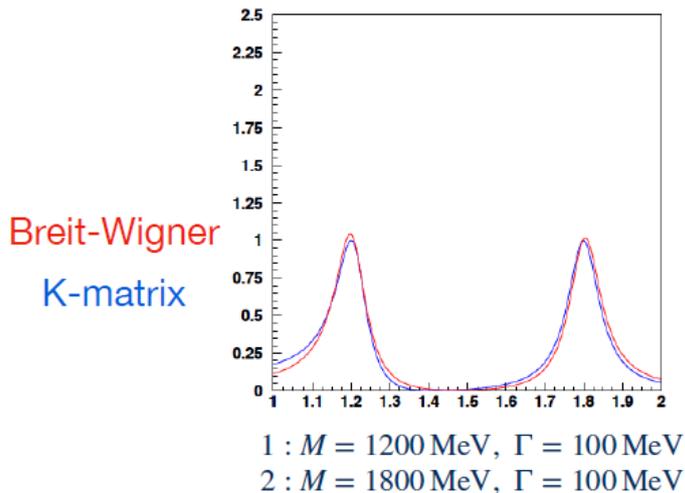


Анализ связанных каналов

Функция Брейта-Вигнера дает хорошее описание для **изолированного резонанса** **распадающегося в один канал**

В противном случае:

- **Нарушение унитарности**
- **Параметры резонанса зависят от процесса**



K-матричный подход

Амплитуда реакции 2→2

$$S = I + 2i\sqrt{\rho}T\sqrt{\rho}$$

C: Chew-Mandelstam function
guarantees analyticity
 $\rho(s) = -\text{Im}(C(s))$

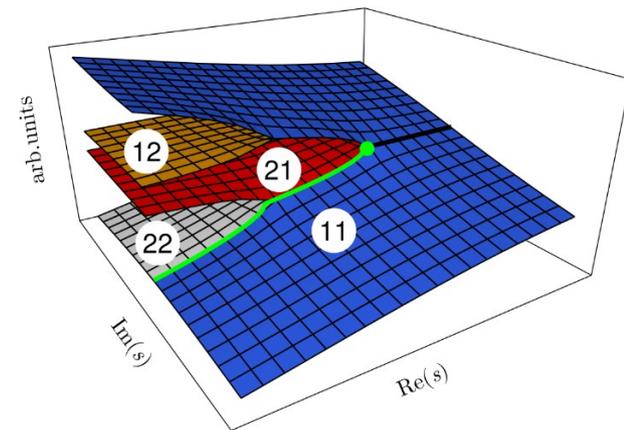
Параметризация K-матрицей

$$T = (I + iKC)^{-1} K$$

Наиболее распространенная параметризация K-матрицы

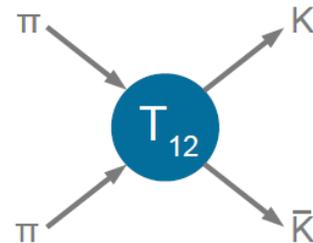
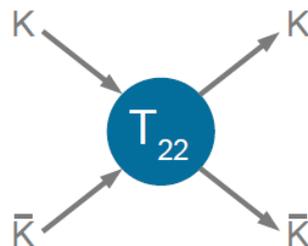
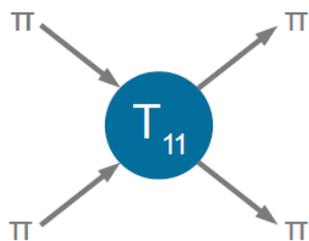
$$K_{ij} = \sum_{\alpha} \frac{g_{\alpha i} g_{\alpha j}}{m_{\alpha}^2 - s} + \sum_k c_{kij} s^k$$

$g_{\alpha i}$: decay coupling
 m_{α} : pole bare mass



$$q_a = \frac{\lambda^{1/2}(s, m_{1,a}^2, m_{2,a}^2)}{2\sqrt{s}},$$

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{12} & T_{22} \end{pmatrix}$$



$$\rho_c(s) = \frac{1}{16\pi} \frac{2|\vec{q}_c|}{\sqrt{s}},$$

K-матричный подход

Амплитуда реакции $2 \rightarrow 2$

$$S = I + 2i\sqrt{\rho}T\sqrt{\rho}$$

C : Chew-Mandelstam function
guarantees analyticity
 $\rho(s) = -\text{Im}(C(s))$

Параметризация K-матрицей

$$T = (I + iKC)^{-1}K$$

Наиболее распространенная параметризация K-матрицы

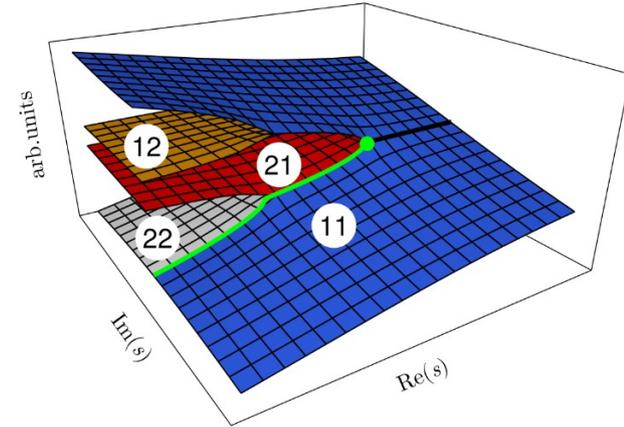
$$K_{ij} = \sum_{\alpha} \frac{g_{\alpha_i} g_{\alpha_j}}{m_{\alpha}^2 - s} + \sum_k c_{kij} s^k$$

g_{α_i} : decay coupling
 m_{α} : pole bare mass

В случае более сложного механизма рождения

$$F = (I + iKC)^{-1}P, \quad P_i = \sum_{\alpha} \frac{\beta_{\alpha} g_{\alpha_i}}{m_{\alpha}^2 - s} + \sum_k c_{ki} s^k$$

β_{α} : production coupling, in general complex

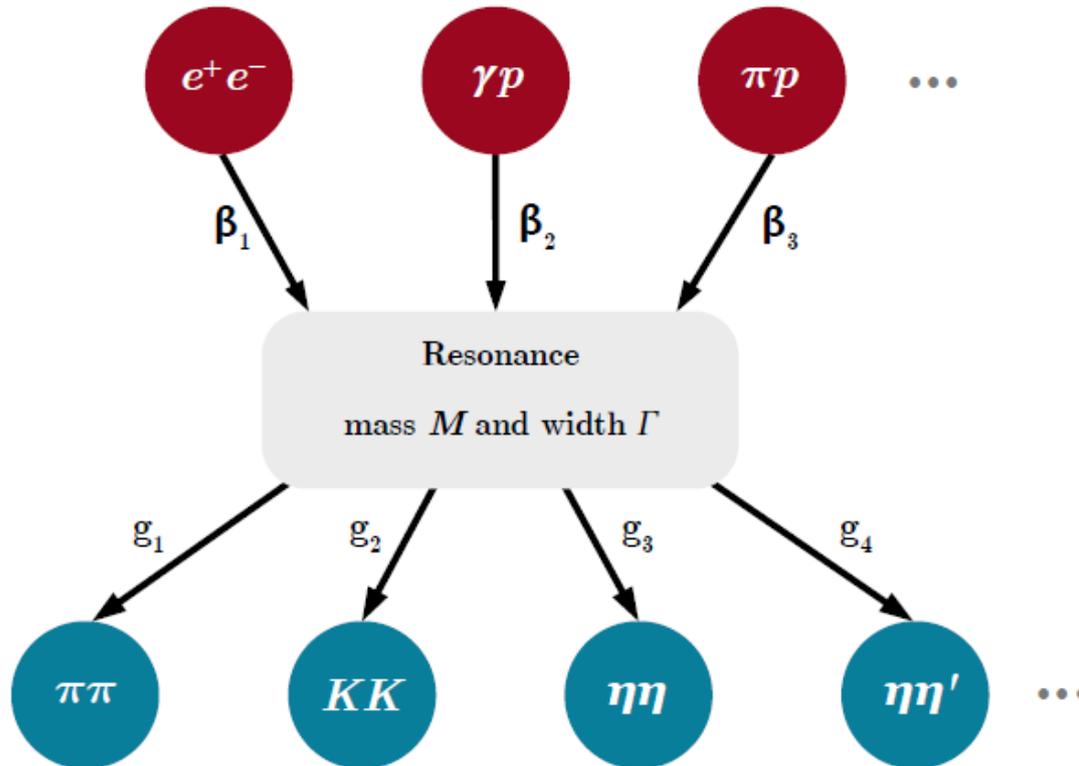


$$q_a = \frac{\lambda^{1/2}(s, m_{1,a}^2, m_{2,a}^2)}{2\sqrt{s}},$$

$$\rho_c(s) = \frac{1}{16\pi} \frac{2|\vec{q}_c|}{\sqrt{s}},$$

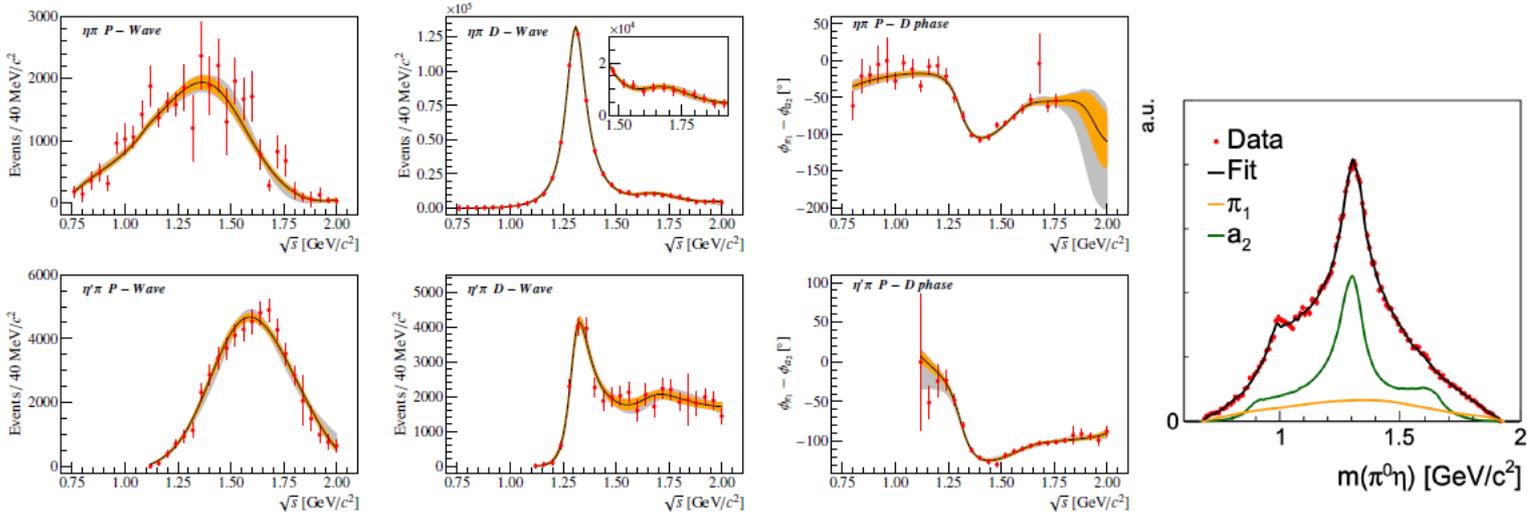
Анализ связанных каналов

По видимому, без такого комплексного подхода будет очень **сложно** продвинуться в изучении **свойств** легких адронов



$\pi_1(1600)$ и $\pi_1(1400)$

По видимому, $\pi_1(1600)$ и $\pi_1(1400)$ это один резонанс
Совместный анализ $\bar{p}p \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$, $\pi^0 \eta \eta$ and $K^+ K^- \pi^0$
и рассеяния $\pi\eta$ и $\eta\pi$ систем рожденных в рассеянии πp



Obtained pole position:
 $M = 1623 \pm 47^{+24}_{-75} \text{ MeV}/c^2$
 $\Gamma = 455 \pm 88^{+144}_{-175} \text{ MeV}$

Спасибо за внимание