



# Физика с ВЭП-6

А.Гармаш

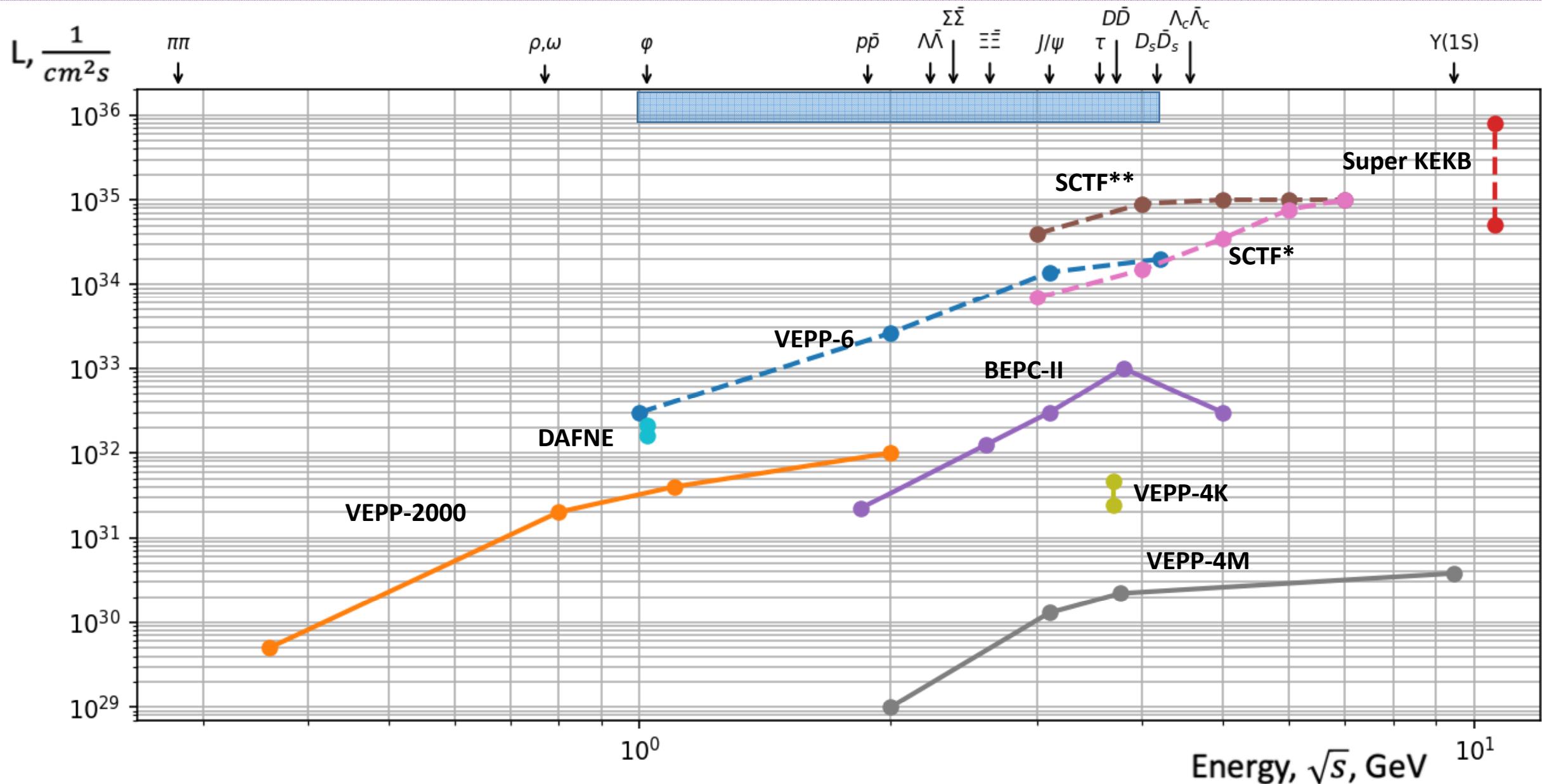
А.Бобров, А.Винокурова, Л.Кардапольцев, Т.Харламова, К.Чиликин

ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН

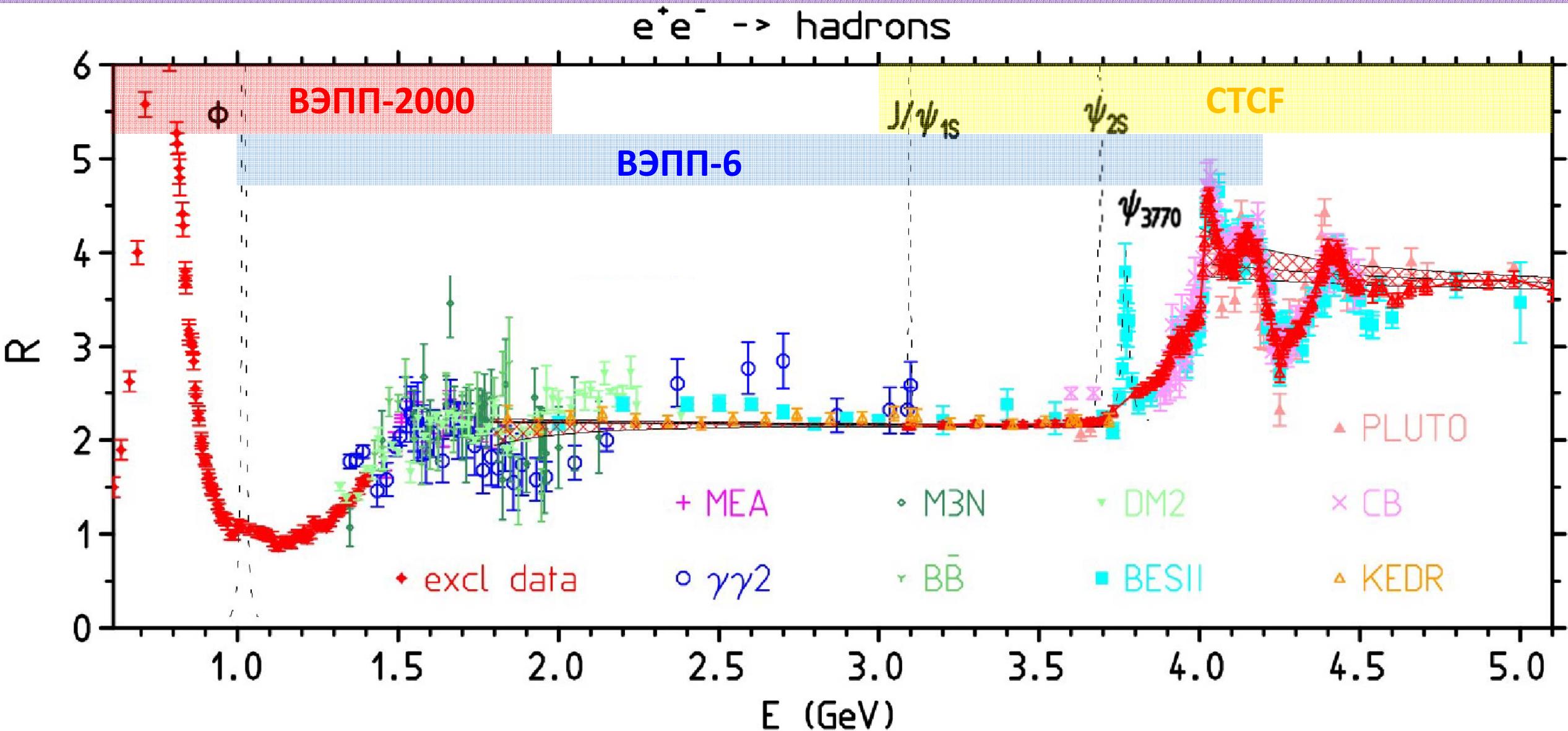
*Слышиу голос, голос спрашивает строго  
А сегодня, что для завтра сделал я?*



# $e^+e^-$ коллайдеры: Вчера, сегодня, завтра



# Физика с ВЭПП-6 и СТСФ



# Физическая программа ВЭПП-6

## Структура $e^+e^- \Rightarrow$ адроны в сканировании

прямое измерение R в области от 1 до 3 ГэВ

эксклюзивные многочастичные конечные состояния  $\Rightarrow$  динамика (амплитудный анализ)

( $g-2$ ),  $\alpha(s)$ , тест моделей рQCD, вычисления на решетках и др.

## Физика барионов

ЭМ формфакторы гиперонов

относительная фаза ЭМФФ, поляризация гиперионов

взаимодействие в конечном состоянии

## Фабрика чармония ( $\psi'$ , $J/\psi$ , а также $h_c$ , $\eta_c$ , $\chi_c$ в их распадах)

радиационные и адронные переходы в системе чармония

адронные распады чармония  $\Rightarrow$  спектроскопия легких адронов, поиск гибридов и глюболов

слабые распады  $J/\psi$

невидимые распады  $J/\psi$  (поиск «темного» фотона, аксионы и др.)

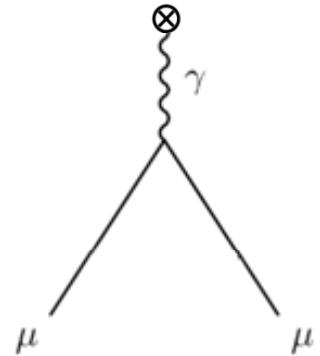
## Дополнительные возможности:

новая физика,  $e^+e^- \Rightarrow D^{*0}$  (большая статистика)

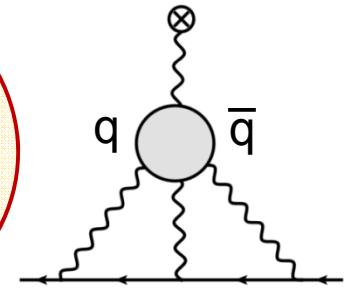
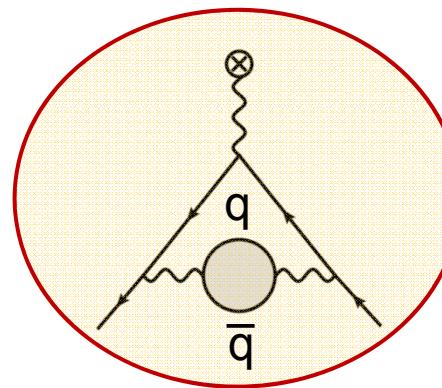
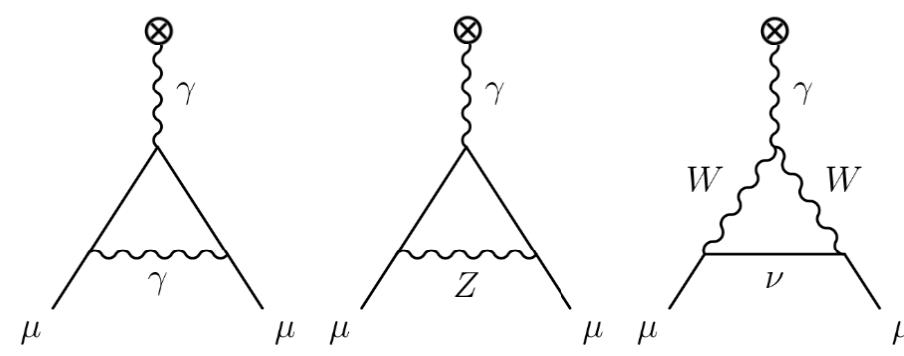
энергетическое сканирование сечений  $e^+e^- \rightarrow DD, DD\pi, DD^*, DD\pi\pi, D^*D^* \dots$  (повышенная энергия)

двухфотонная физика, физика  $\tau$  и т.д.

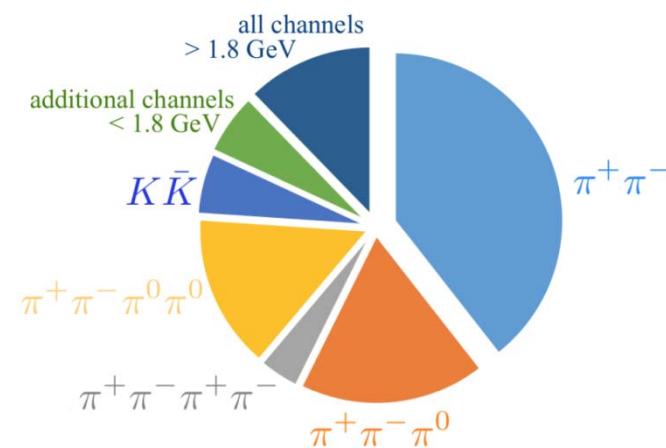
# Физика адронов с ВЭПП-6: g-2



+

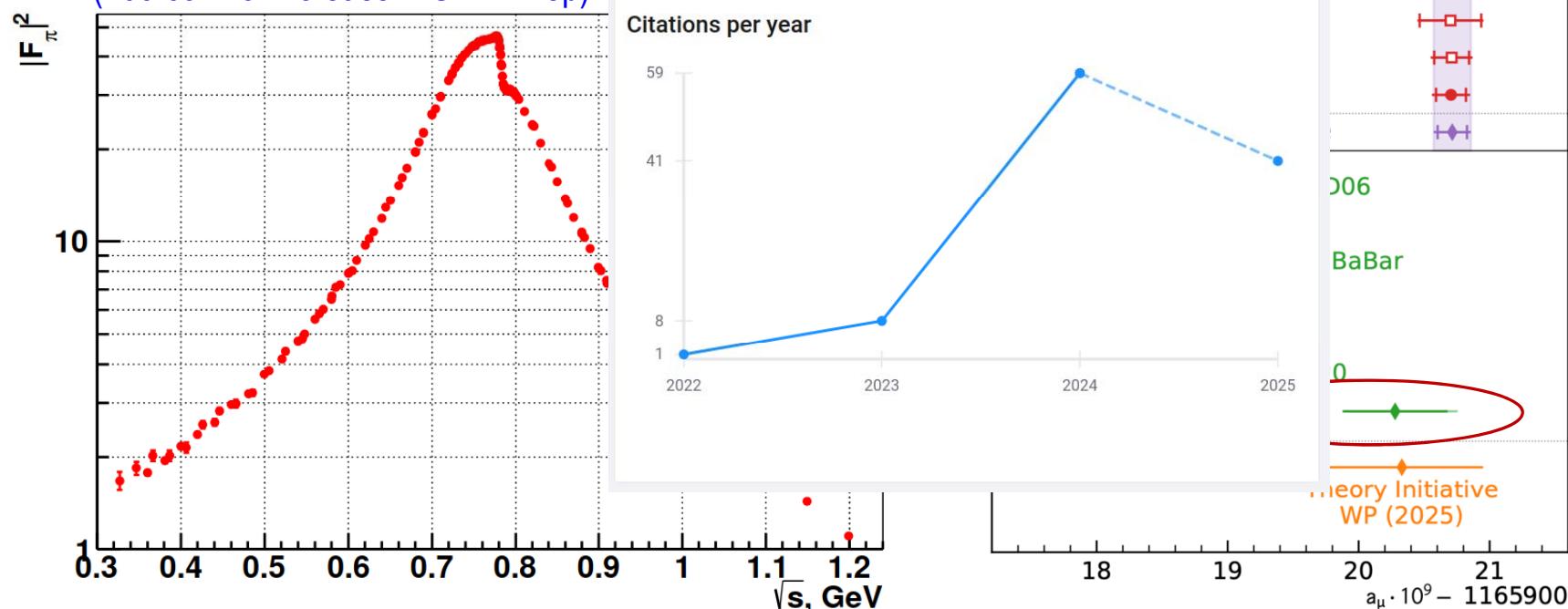


Вклады в ошибку в g-2



CMD-3: Phys. Rev. Lett. 132, 231903 (2024)

(109 ссылок по базе iNSPIREhep)

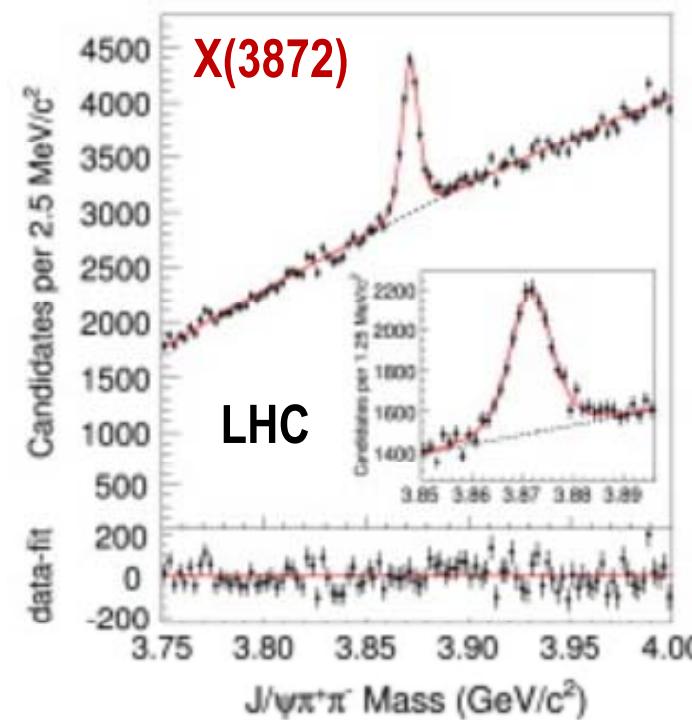
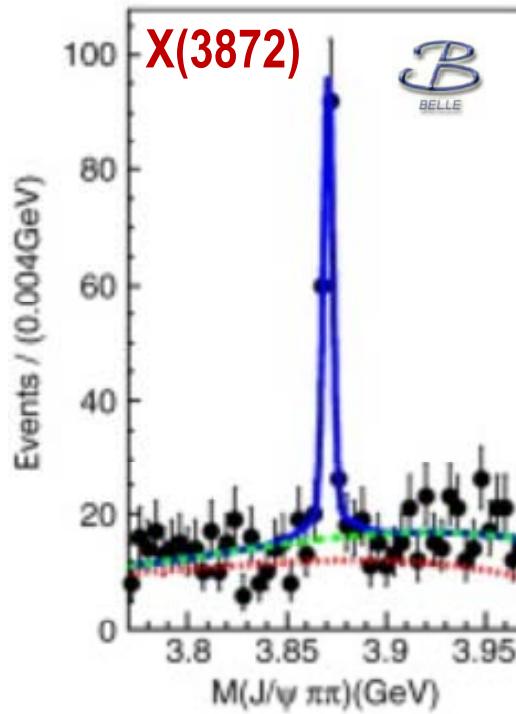


# Большая статистика $\equiv$ Новые эффекты

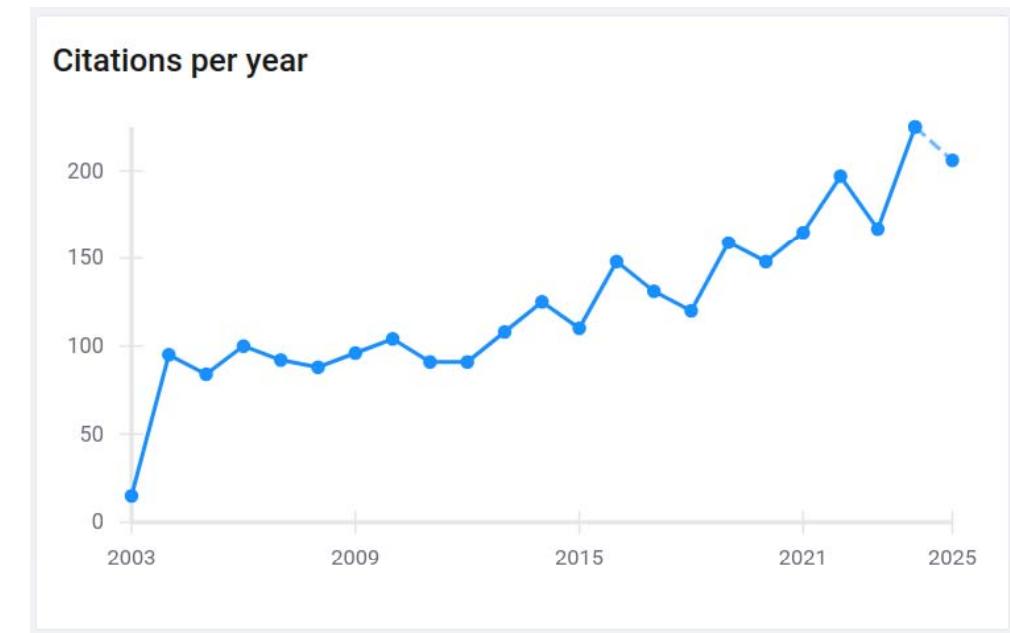
Большая статистика, полученная на мезонных фабриках, позволила обнаружить новые эффекты в казалось бы уже хорошо изученной системе чармонания

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

$B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+ K^+$



(2865 ссылок по базе iNSPIREhep)

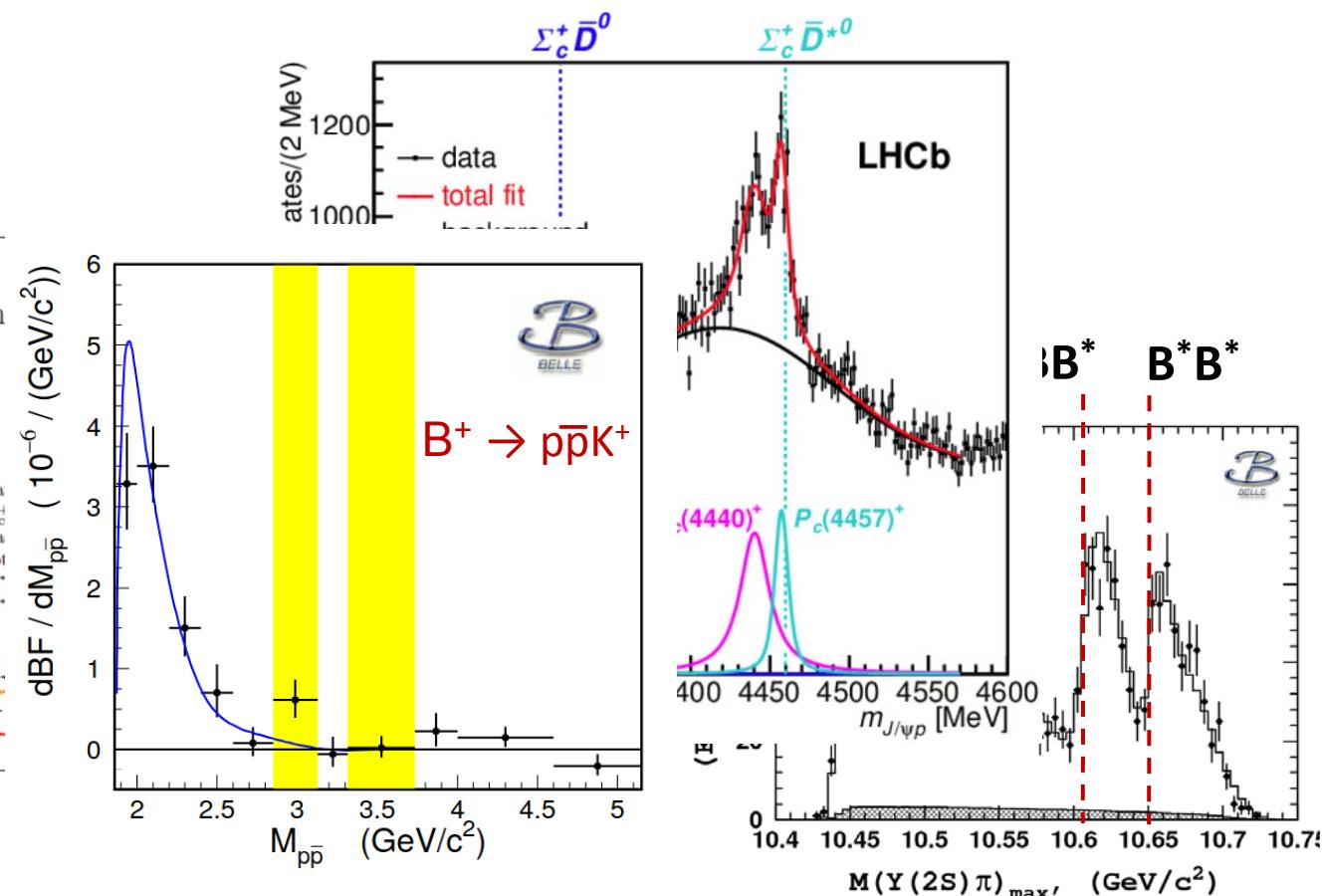
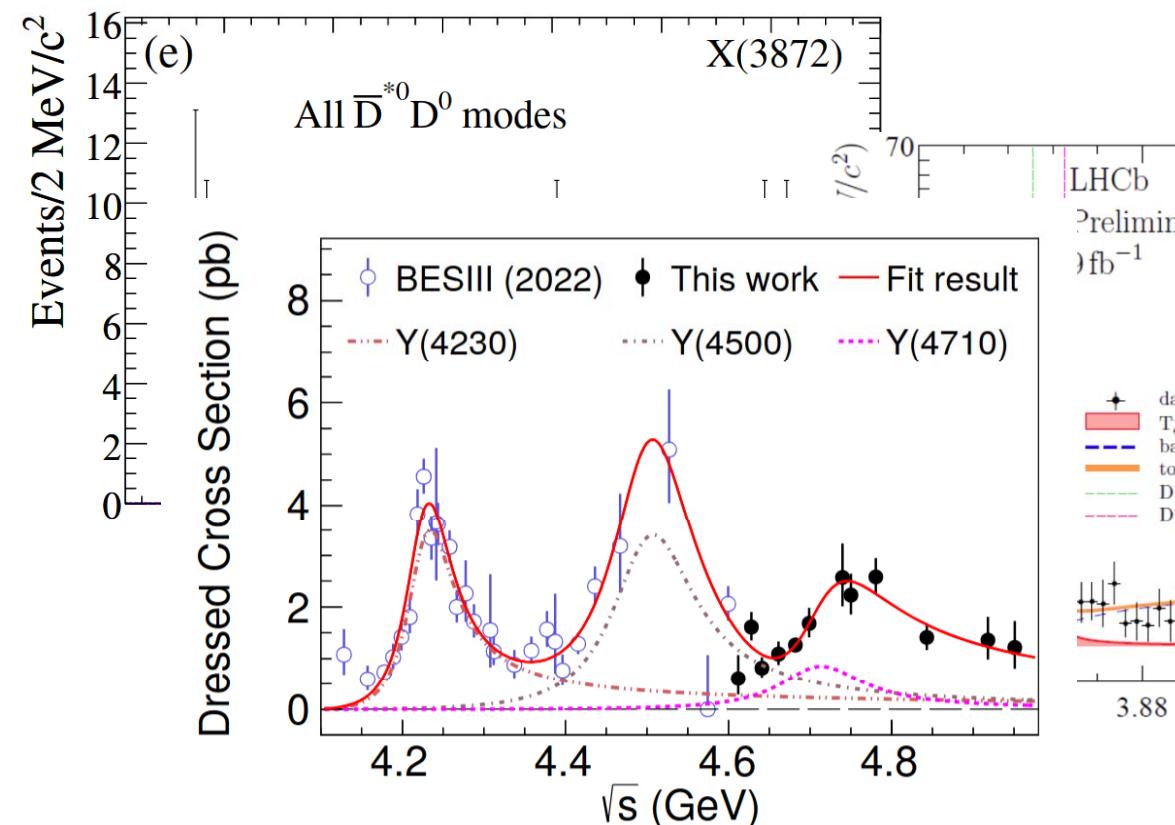


**Актуальная область исследований!**

Что поначалу выглядело как очевидно новый и «экзотический» резонанс в системе чармонания...

# Большая статистика $\equiv$ Новые эффекты

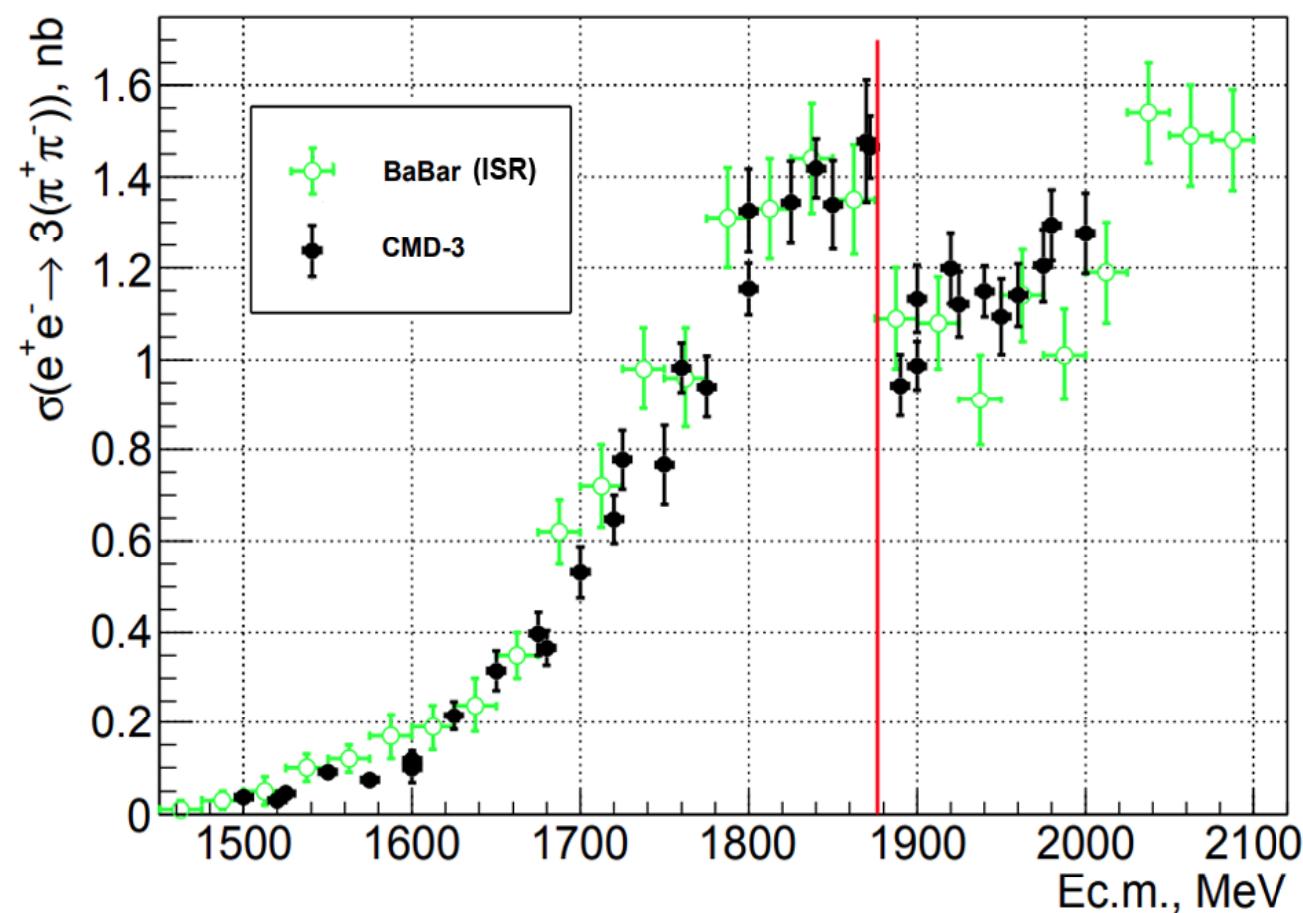
В дальнейшем было обнаружено множество (десятки!) подобных структур в системах с тяжелыми кварками ( $c, b$ ), как правило **вблизи порогов рождения** систем стабильных (в масштабе сильного взаимодействия) частиц ( $B, D, J/\psi \dots$ ).



В системах, состоящих из легких夸克ов ( $u, d, s$ ), эти эффекты еще **изучены очень плохо**. Однако уже есть первые указания. (подробнее в докладе Л.Кардапольцева)

# Припороговые структуры: u,d,s-сектор

В эксперименте КМД-3 было обнаружено резкое изменение величины сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow 3(\pi^+\pi^-)\dots$  на пороге рождение NN!



Метод ISR «не работает» => прямое энергетическое сканирование с «мелким» шагом.

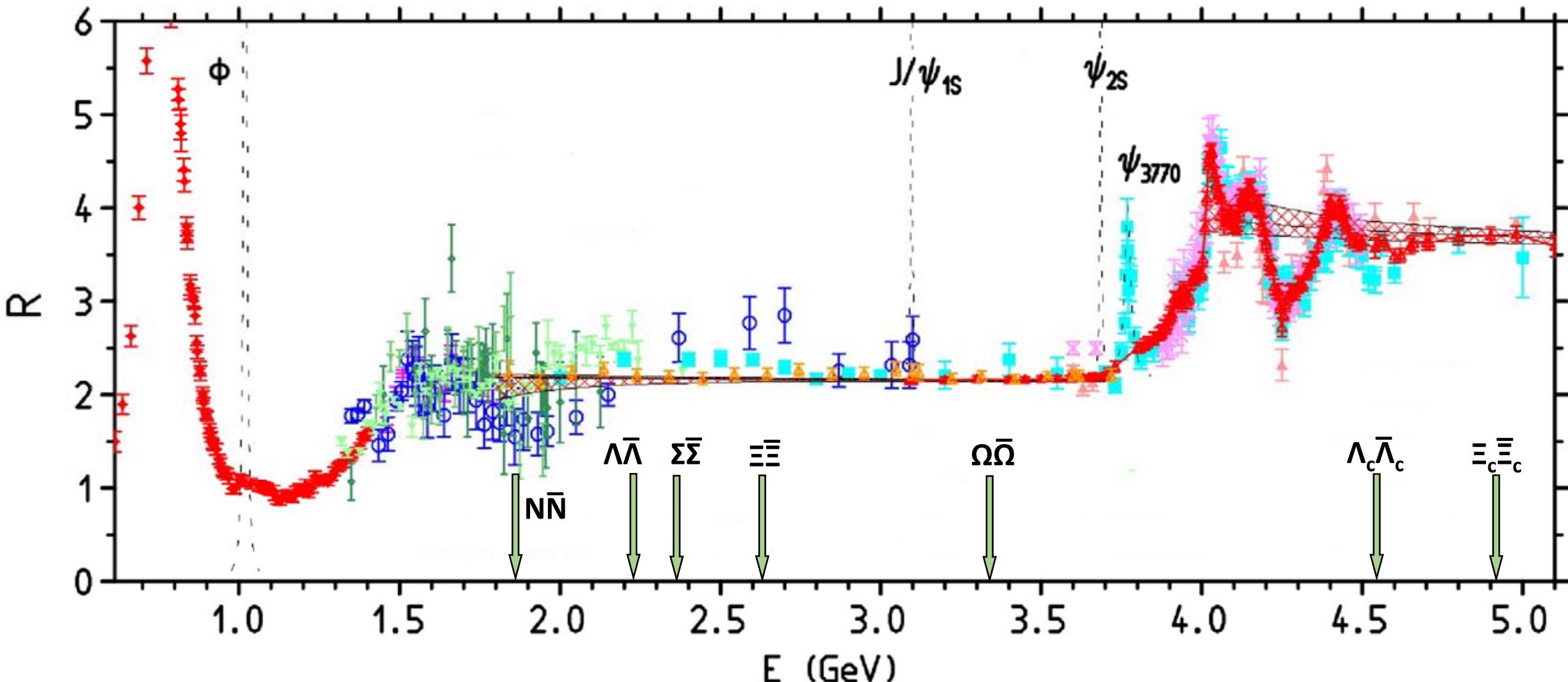
В каких еще процессах наблюдается (или нет, и почему?) подобное поведение?

Необходимо исследовать динамику процесса (амплитудный анализ в **КАЖДОЙ** точке по энергии)

- большая статистика
- низкий фон
- требования к детектору: энергетическое и импульсное разрешение, PID)

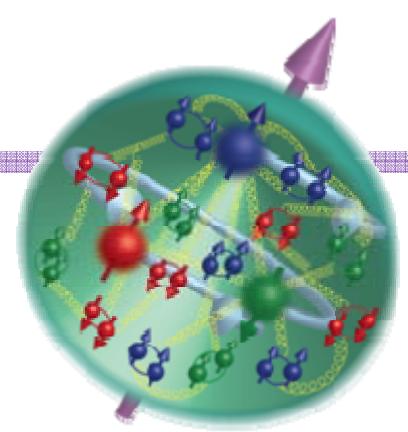
Какова ситуация на порогах рождения пар гиперонов?

# Припороговые структуры: u,d,s-сектор



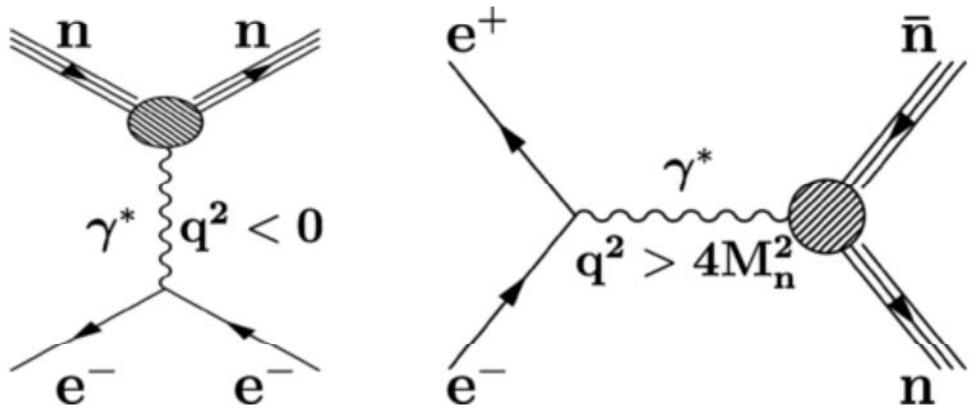
+ пороги в комбинациях барион+антибарион+легкие мезоны ( $\pi, K, \eta$ ).

# ЭМФФ легких барионов: $N\bar{N}$



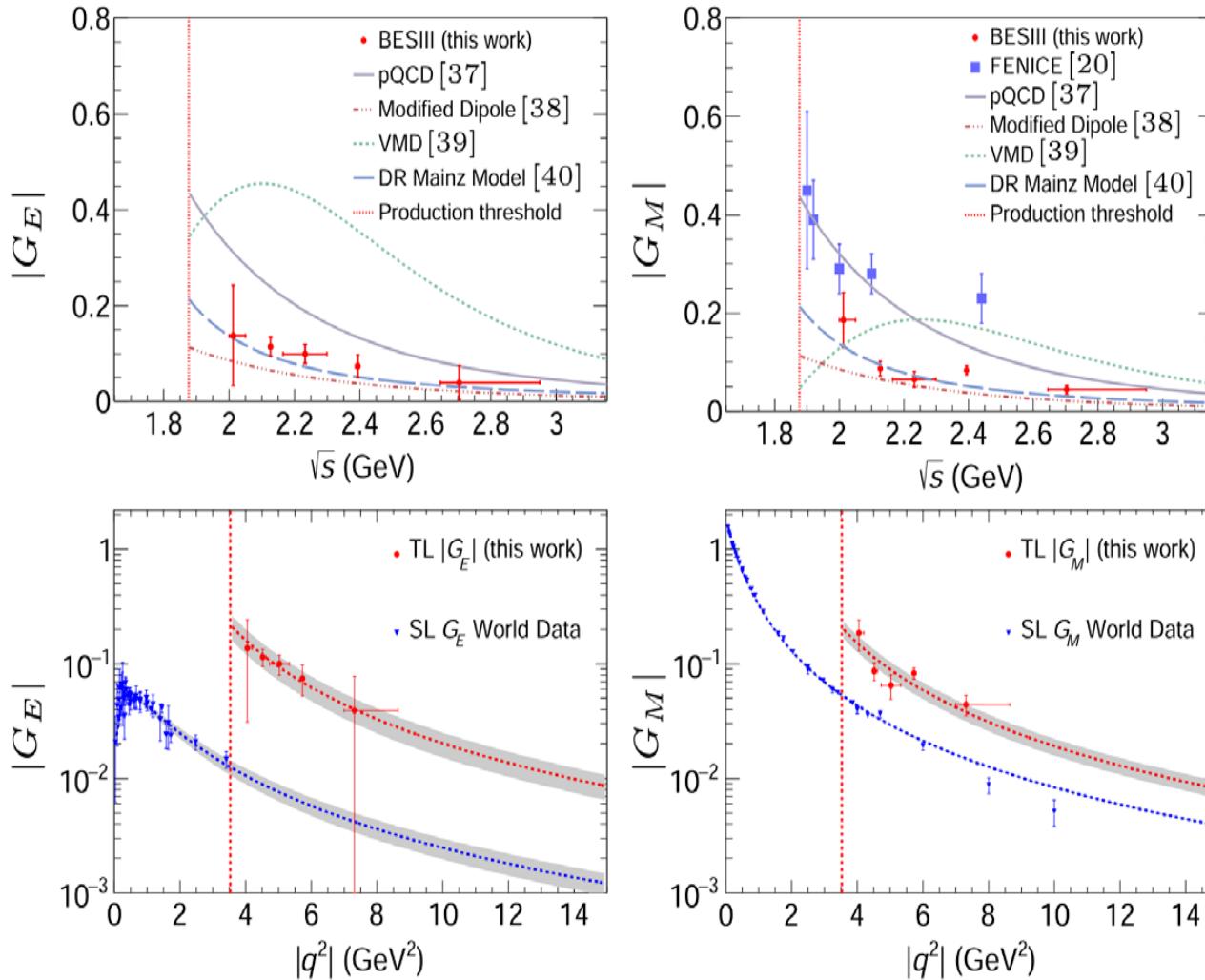
Электромагнитные форм факторы  
(распределение спина и заряда)

$$\frac{d\sigma_{B\bar{B}}(s)}{d\Omega} = \frac{\alpha^2 \beta C}{4s} \left[ |G_M(s)|^2 (1 + \cos^2 \theta) + \frac{4m_B^2}{s} |G_E(s)|^2 \sin^2 \theta \right]$$



Из анализа угловых распределений возможно извлечь  
 $G_E$  и  $G_M$  (+ относительная фаза) в зависимости от  $s$ .

BESIII Collaboration, Phys. Rev. Lett. 130, 151905 (2023).

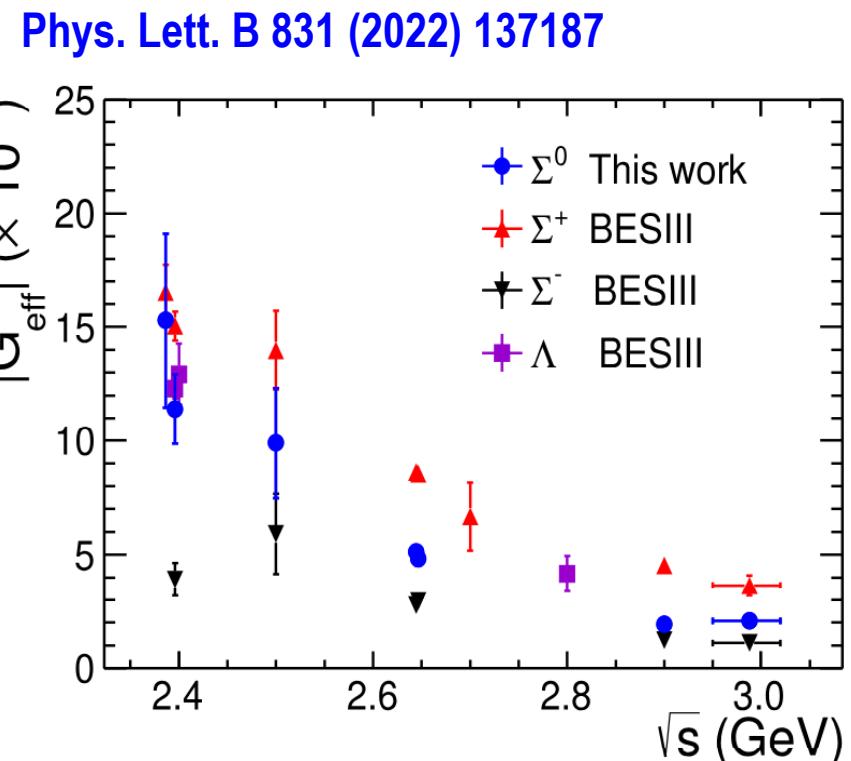


Информация о ЭМФФ нуклонов (и барионов в целом) во времениподобной области по  $q^2$  крайне ограничена и зачастую противоречива. (подробнее в докладе А.Боброва)

# ЭМФФ легких гиперонов: $\Lambda\Sigma\Xi\Omega$

Первые результаты по измерению ЭМФФ для гиперонов в эксперименте BESIII.

Energy	$\mathcal{L}$ ( $\text{pb}^{-1}$ )
2.3864	22.6
2.3960	66.9
2.6544	67.8
2.9000	105.5
2.9500	16.0
2.9810	16.0
3.0000	15.8
3.0200	17.3
3.0800	126.6



**BESIII**: статистика в области  $\sim 3$  ГэВ всего  $\mathcal{O}(100 \text{ pb}^{-1})$ , несколько точек по энергии.

**ВЭПП-6**: ЭМФФ и относительная фаза могут быть детально (с малым шагом по энергии) и с высокой точностью (статистикой) измерены от порога рождения  $\sim 2$  ГэВ и до  $\sim 3$  ГэВ.

При проектной светимости ВЭПП-6, темп набора статистики составит  $\sim 200 \text{ pb}^{-1}$  в сутки!



(диапазон от 2 ГэВ до 3 ГэВ с шагом 10 МэВ за год)

# Физика чармоная

BESIII На данный момент:

$$\sim 10^{10} J/\psi \quad \sim 3 \times 10^9 \psi(2S)$$

ВЭПП6 Год работы со светимостью  $10^{34}$ :  $\sim 10^{11} J/\psi$  или  $\sim 2 \times 10^{10} \psi(2S)$

Мода распада	Бранчинг / сечение	Число событий на BESIII (на данный момент)	Число событий на ВЭПП-6 (год работы)
$J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c$	$(1.41 \pm 0.14) \%$	$10^8$	$10^9$
$\psi' \rightarrow \gamma \eta_c$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	$10^7$	$7 \times 10^7$
$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c0}$	$(9.75 \pm 0.22) \%$	$3 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c1}$	$(9.75 \pm 0.27) \%$	$3 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c2}$	$(9.38 \pm 0.23) \%$	$3 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
$\psi' \rightarrow \gamma \eta_c(2S)$	$(5.4 \pm 3.4) \times 10^{-4}$	$2 \times 10^6$	$10^7$
$\psi' \rightarrow \pi^0 h_c$	$(7.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	$2 \times 10^6$	$10^7$
$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$	$(50 \pm 10) \text{ пб}$	$7 \times 10^4 (11 \text{ фб}^{-1})$	$5 \times 10^6$

Чармоний	Полный известный бранчинг
$\eta_c$	60 %
$\chi_{c0}$	30 %
$\chi_{c1}$	50 %
$h_c$	70 %
$\chi_{c2}$	30 %
$\eta_c(2S)$	10 %



## Большой объем данных на $\Psi$ и $\Psi'$

– позволит исследовать свойства «легких» (до порога рождение  $D\bar{D}$  системы) состояний чармоная с высокой точностью;  
**(подробнее в докладе А.Винокуровой)**

– предоставляет широкие возможности по исследованию структуры систем легких кварков в адронных (многочастичных) распадах чармоная;

распад чармоная происходит через аннигиляцию с и анти-с кварков в систему глюоны+фотоны => глюонно обогащенная среда, возможно рождение «экзотических» кварк-глюонных систем (гибриды) или чисто глюонных систем (глуболы);  
**(подробнее в докладе Л.Кардапольцева)**

# Заключение

Эксперимент ВЭПП-6 предоставляет уникальную возможность провести **всестороннее и систематическое исследование непертурбативных эффектов КХД:**

- динамическая масса адронов
  - структура КХД вакуума
  - механизм конфайнмента
  - поиск эффектов вне Стандартной модели
- } + Вычисления на решетках

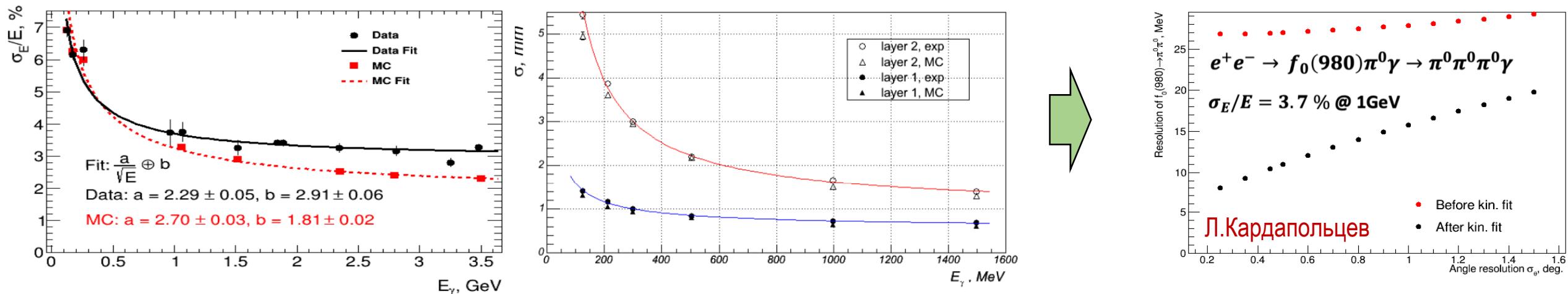
Ведется активная работа по подготовке текстового документа «Физическая программа эксперимента ВЭПП-6».

Формируются требования к ключевым системам детектора. В настоящее время используется быстрое (параметрическое) моделирование для оценки фонов и эффективности к сигналам.

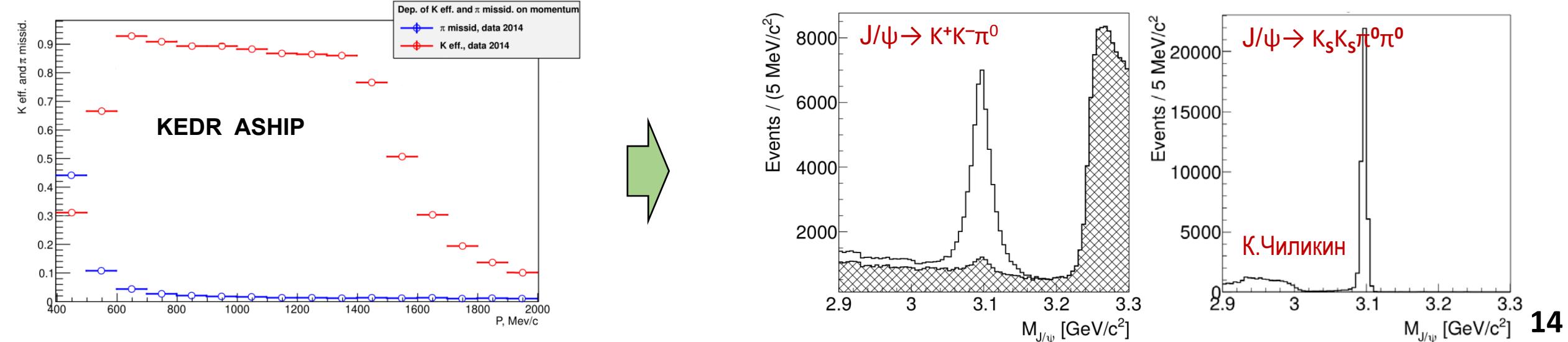


Компоновка детектора, создание полного моделирования.

# Детектор: Быстрое моделирование



Высокое пространственное разрешение LKr позволяет частично компенсировать потерю энергетического разрешения.  
Возможно ли улучшить энергетическое разрешение с новой электроникой?  
Каково влияние большой загрузки (светимости) на параметры?



# Заключение

Эксперимент ВЭПП-6 предоставляет уникальную возможность провести **всестороннее и систематическое исследование непертурбативных эффектов КХД**:

- динамическая масса адронов
  - структура КХД вакуума
  - механизм конфайнмента
  - поиск эффектов вне Стандартной модели
- 
- + Вычисления на решетках

**ВЭПП-6 уникальный проект – в этой области энергий нет (и не планируется!) других экспериментов со сравнимыми параметрами.**

**ВЭПП-6 и BESIII (CTCF) не являются конкурентами!**

Чрезвычайно широкая программа исследований CTCF выше порога рождения  $D\bar{D}$  ( $>4$  ГэВ). CTCF+ ВЭПП-6(+ВЭПП-2000М?) способны обеспечить уникальную синергию в изучении КХД при низких энергиях.

Частичное перекрытие диапазонов даст возможность «сшивки» и перекрестных проверок.