

Физическая программа СЧТФ

Тимофей Углов

ФИАН, ВШЭ

timofey.uglov@gmail.com

21 февраля 2025 г.



Детектор

Импульсное разрешение на уровне 0.5% @ 1 ГэВ

Герметичность $\approx 95\%$ телесного угла

Реконструкция треков, начиная с $p_t \approx 50$ МэВ

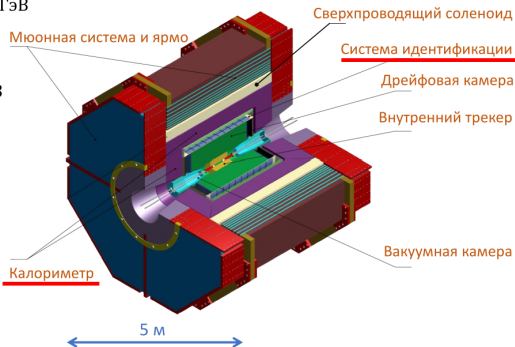
Превосходное разделение $\mu/\pi/K/p$ до 1.5 ГэВ

- dE/dx в трековой системе
- Черенковское излучение
- μ/π разделение!

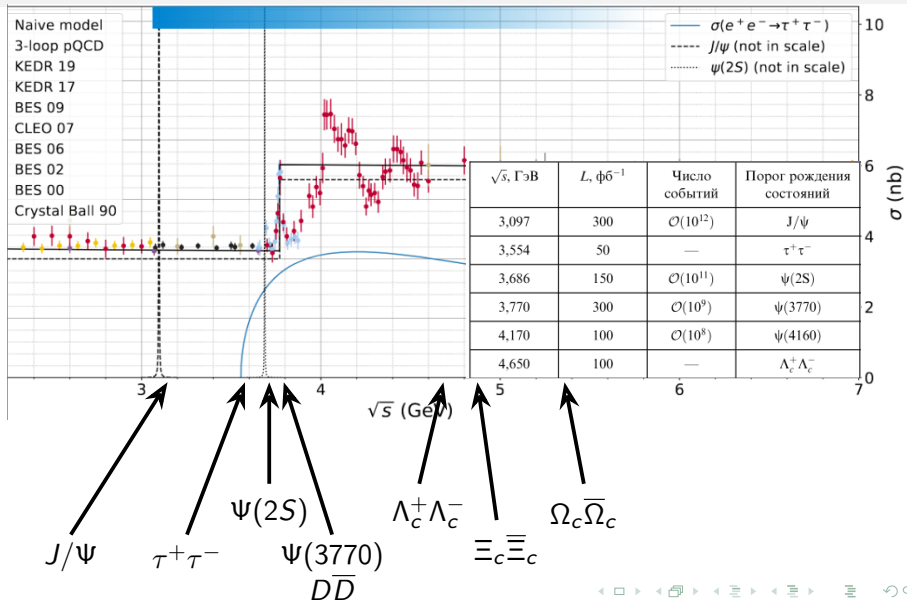
Хорошее π^0/γ разделение и регистрация γ в диапазоне энергий от 10 МэВ до 3000 МэВ

- Хорошее энергетическое разрешение
- Быстрый калориметр ($\sigma_t < 1$ нс)

Сбор данных с частотой ~ 300 кГц @ J/ψ



Энергетический диапазон Супер чарм-тау фабрики



Основные направления физической программы СЧТФ

Спектроскопия адронов

- чармоний
- легкие и экзотические адроны
- открытое очарование
- чармониеподобные состояния

Изучение CP-нарушений

- в распадах очарованных адронов
- в распадах τ -лептона

Прецизионная проверка СМ

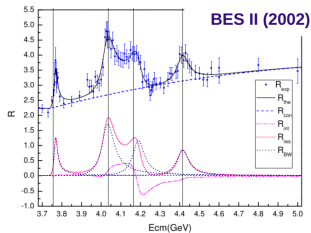
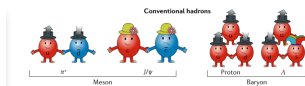
- лептонная универсальность:
 - очарованные адроны
 - τ -лептон
- угол Вайнберга в распадах J/ψ
- параметры Мишеля в распадах τ

За пределами СМ

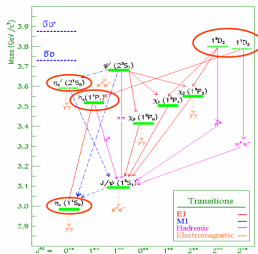
- легкая экзотика
- редкие и запрещенные распады D-мезонов
- запрещенные распады τ
- запрещенные распады J/ψ

Спектроскопия очарованных адронов...

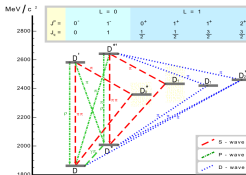
... в начале эры В-фабрик



$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

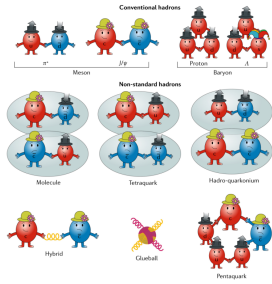


спектроскопия чармония

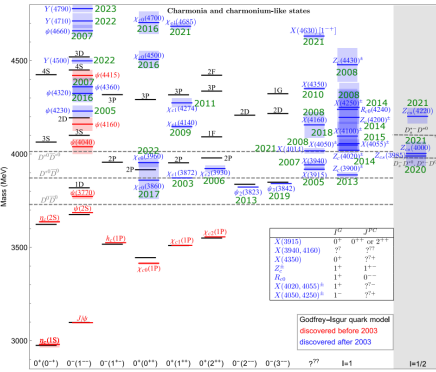
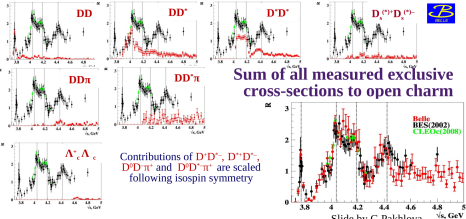


спектроскопия D-мезонов

Спектроскопия очарованных адронов... ... в начале эры СТФ



CZY & S.I. Olsen. *Nature Reviews Physics* 1, 480 (2019)



	J^P	J^{PC}
$X(3915)$	0^+	0^{++} or 2^{++}
$X(3940, 4160)$	3^+	3^{++}
$X(4350)$	0^+	0^{++}
Z_c^0	1^+	1^{++}
R_c	1^+	0^{++}
$X(4020, 4055)^+$	1^+	3^{++}
$X(4050, 4250)^+$	1^+	3^{++}

Godfrey-Isgur quark model
discovered before 2003
discovered after 2003

XYZ	$Y(4260)$	$Z_c(3900)$	$Z_c(4020)$	$X(3872)$
No. of events	10^{10}	10^9	10^9	5×10^6

оценка количества событий для
китайского проекта СТФ

Изучение CP-нарушений в распадах τ -лептонов

электрический дипольный момент d_τ

СМ предсказывает значения d_τ далеко за пределами чувствительности эксперимента \implies любое отклонение от нуля свидетельствует о НФ.

Belle:

$$-1.85 < \text{Re}(d_\tau) < 0.61 \quad (10^{-17} \text{ e} \cdot \text{cm}); \quad -1.03 < \text{Im}(d_\tau) < 0.23 \quad (10^{-17} \text{ e} \cdot \text{cm})$$

Поляризованные пучки позволяют существенно улучшить измерение d_τ , особенно его действительной части.

аномальный магнитный дипольный момент $a_\tau = (g_\tau - 2)/2$

теоретическая точность $\mathcal{O}(10^{-8})$

экспериментальная точность $\mathcal{O}(10^{-3})$

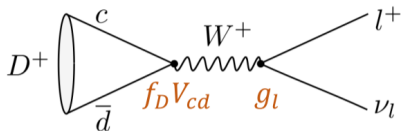
НФ: вклад в $a_l \sim m_l^2 \implies a_\tau$ чувствительнее к НФ, чем a_μ

ср-нарушения в адронных распадах τ -лептона

ожидаемая точность $\mathcal{O}(10^{-4})$

Поляризованный пучок \implies поляризованные τ -лептоны. Можно не восстанавливать второй τ -лептон. Нет зависимости от относительной фазы.

Лептонные распады очарованных адронов



$$\Gamma(D^+ \rightarrow l^+ \nu) = \frac{G_F^2}{8\pi} f_D^2 m_l^2 M_D \left(1 - \frac{m_l^2}{M_D^2}\right)^2 |V_{cd}|^2$$

$$R_{\tau/\mu}^{\text{SM}} \equiv \frac{\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \tau^+ \nu)}{\mathcal{B}(D^+ \rightarrow \mu^+ \nu)} = \frac{m_\tau^2 \left(1 - \frac{m_\tau^2}{m_{D^+}^2}\right)^2}{m_\mu^2 \left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_{D^+}^2}\right)^2} = 2.67$$

$$\text{BESIII (2019): } R_{\tau/\mu}^{\text{exp}}(D^+) = 3.21 \pm 0.64 \pm 0.43$$

$$R_{\tau/\mu}^{\text{SM}}(D_s^+) = 9.76; R_{\tau/\mu}^{\text{exp}} = 10.38 \pm 0.80$$

Изучение распадов τ -лептона

Проверка лептонной универсальности

$$\Gamma(\tau^- \rightarrow \nu_\tau l^- \bar{\nu}_l) = \frac{G_\tau G_l m_\tau^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_l^2}{m_\tau^2}\right) r_{EW}$$

$$r_{EW} \approx 0.9915, f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \ln x, G_l = \frac{g_l^2}{4\sqrt{2}m_W^2}$$

$$\frac{\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu \nu_\tau \bar{\nu}_\mu)}{\mathcal{B}(\tau \rightarrow e \nu_\tau \bar{\nu}_e)} = 0.972564 \pm 0.000010 \text{ (теория)}$$

$$\frac{\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu \nu_\tau \bar{\nu}_\mu)}{\mathcal{B}(\tau \rightarrow e \nu_\tau \bar{\nu}_e)} = 0.9796 \pm 0.0016 \pm 0.0036 \text{ (BaBar, 2010)}$$

Также в распадах $\tau \rightarrow \pi \nu_\tau$, $\tau \rightarrow K \nu_\tau$ и $\pi \rightarrow \mu \nu_\mu$ и $K \rightarrow \mu \nu_\mu$

$$R_{\tau/P} = \frac{\Gamma(\tau \rightarrow P \nu_\tau)}{\Gamma(P \rightarrow \mu \nu_\mu)} = \left| \frac{g_\tau}{g_\mu} \right|^2 \frac{m_\tau^3}{2m_P m_\mu^2} \frac{(1 - m_P^2/m_\tau^2)^2}{(1 - m_\mu^2/m_P^2)^2} (1 + \delta R_{\tau/P})$$

Измерение параметров Мишеля

$$\frac{d\Gamma(\tau^\mp)}{d\Omega dx} \propto x(1-x) + \frac{2}{9} \rho(4x^2 - 3x - x_0^2) + \eta x_0(1-x) \mp P_\tau \cos \theta_l \xi \sqrt{x^2 - x_0^2} \left[1 - x + \frac{2}{3} \delta (4x - 4 + \sqrt{1 - x_0^2}) \right]$$

- На СЧФ с поляризованными e^- параметры Мишеля могут быть измерены с большей точностью, чем в эксперименте Belle II

$$x \equiv \frac{E_l}{E_{\max}}, \quad x_0 \equiv \frac{m_l}{E_{\max}}$$

Измерение угла Вайнберга

Благодаря интерференции между амплитудами с γ^* и Z^0 возникает асимметрия сечения рождения J/Ψ в e^+e^- -аннигиляции:

$$A_{LR} \equiv \frac{\sigma_+ - \sigma_-}{\sigma_+ + \sigma_-} = \frac{3/8 - \sin^2 \theta_{\text{eff}}^c}{2 \sin^2 \theta_{\text{eff}}^c (1 - \sin^2 \theta_{\text{eff}}^c)} \left(\frac{m_{J/\psi}}{m_Z} \right)^2 P_e$$

$$A_{LR} \approx 4.7 \times 10^{-4} P_e$$

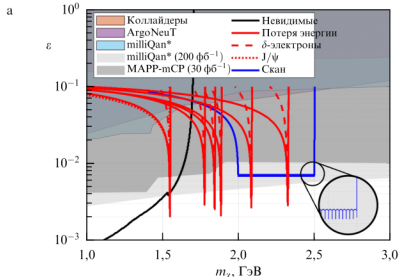
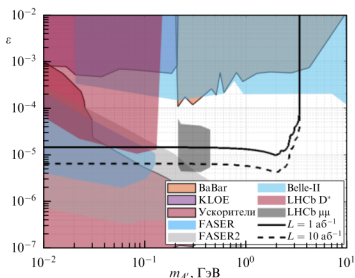
- σ_+ (σ_-) – сечение $e^+e^- \rightarrow J/\psi$ при правой (левой) поляризации электронов
- P_e – средняя поляризация электронов, $P_e < 1$

точность измерения на СЧТФ (1 год):

$$\frac{\sigma(\sin^2\theta)}{\sin^2\theta} \approx 0.3\%; \quad \sigma(\sin^2\theta) \approx 5 \cdot 10^{-4}$$

Легкие состояния за пределами СМ

Описание Вселенной в рамках Стандартной модели не полно
 Новые частицы могли бы решить проблему, но они должны быть легкими, т.к. массивные частицы вносят вклад в массу бозона Хиггса и дестабилизируют электромагнитную шкалу.
 Они должны быть легкими и слабо взаимодействовать с обычной материей
 Кандидаты: скрытый массивный фотон (A'), зеркальный $Z^{0'}$
 миллизаряженные частицы.



Заклучение

- Супер чарм-тау фабрика – установка мирового класса для прецизионных экспериментов по физике частиц
- Два проекта – в России и в Китае – имеют проработанную физическую программу исследований, а также технические проекты ускорителя и детектора
- Решение о начале строительства ожидается в ближайшее время