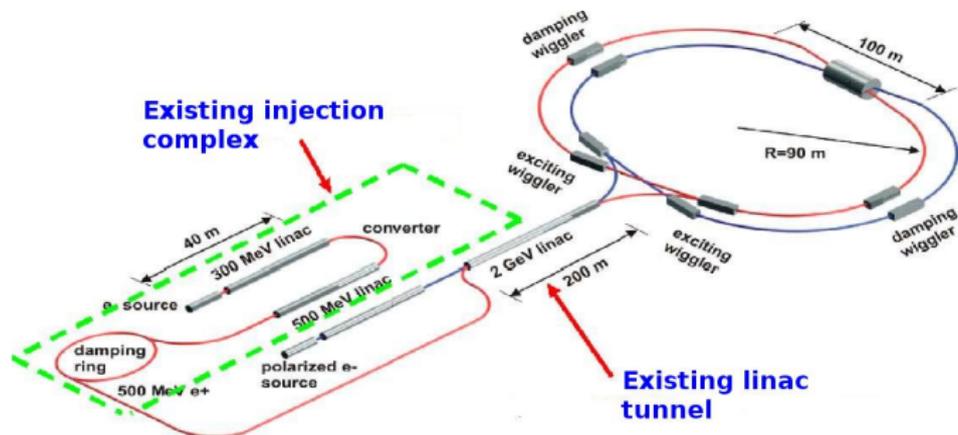


Прецизионные измерения в распадах J/ψ и редкие распады чармониев

К.Ю. Тодышев

Декабрь 2017

Основные параметры с- τ фабрики



Энергия в сгустке

$1 \div 2$ ГэВ

Светимость 1.5 GeV

10^{35} $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

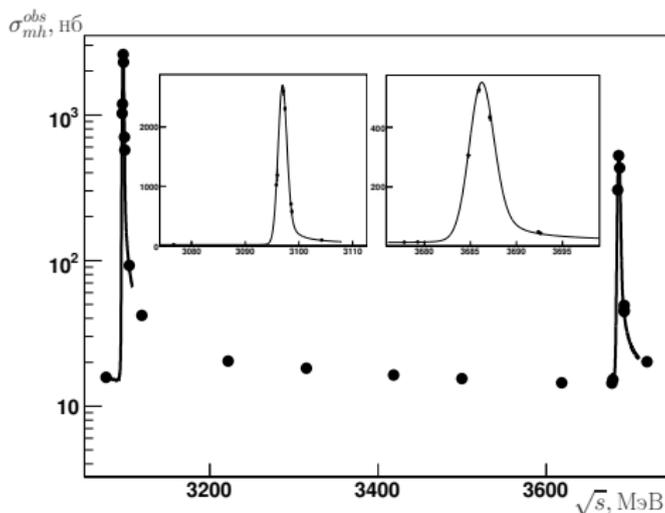
Разброс энергии в сгустке

8.44×10^{-4}

Разброс энергии в с.ц.м. (σ_W)

1.8 МэВ (J/ψ) и 2.2 МэВ ($\psi(2S)$)

Инклюзивное адронное сечение



Сканирование 2014 КЕДР

Для $c\text{-}\tau$ фабрики

$$\sigma_{hadrons}^{peak}(J/\psi) \sim 1.3 \times 10^3 \text{ нб}$$

$$\sigma_{hadrons}^{peak}(\psi(2S)) \sim 0.4 \times 10^3 \text{ нб}$$

В течение сезона можно набрать $\sim 1 \text{ аб}^{-1}$:

$$500 \text{ фб}^{-1} \sim 6 \times 10^{11} J/\psi$$

$$\sim 2 \times 10^{11} \psi(2S)$$

$$\text{BESIII(2017):} \sim 1.3 \times 10^9 J/\psi$$

$$\sim 0.5 \times 10^9 \psi(2S)$$

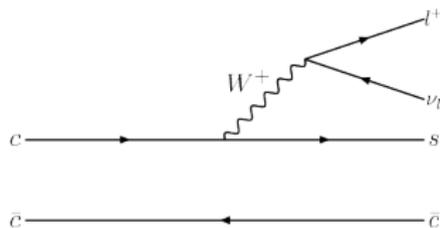
Поиск неизвестных пока мод распадов

Частица	Число мод распадов, перечисленных в PDG	Сумма вероятностей известных мод распадов
$\psi(3770)$	9	$\sim 93\%$
η_c	29	$\sim 70\%$
J/ψ	~ 200	$\sim 45\%$
.....		

Прецизионное измерение вероятностей радиационных переходов

Распад	Вероятность (Теор. оценки)	Изучение в распаде
$\eta_c(2S) \rightarrow h_c \gamma$	$\sim 2.5 \times 10^{-3}$	$\psi(2S) \rightarrow \eta_c(2S) \gamma$ $(7 \pm 5) \times 10^{-4}$
$\psi(3770) \rightarrow \chi_{c2} \gamma$	$\sim 2 \times 10^{-3}$	
$\eta_c(2S) \rightarrow J/\psi \gamma$	$\sim 3 \times 10^{-5}$	$\psi(2S) \rightarrow \eta_c(2S) \gamma$
$h_c \rightarrow \chi_{c0} \gamma$	$\sim 10^{-6}$	$\psi(2S) \rightarrow h_c \pi^0$ $(8.6 \pm 1.3) \times 10^{-4}$
.....		

Исследование слабых распадов J/ψ , полулептонные процессы



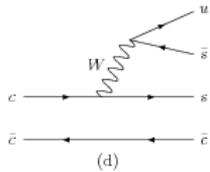
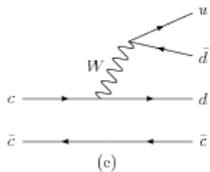
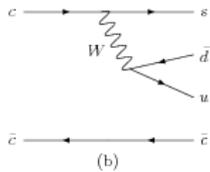
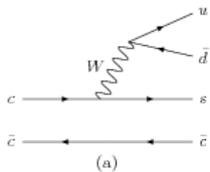
Вероятность

Распад	Теория, 10^{-11}	Эксперимент
$J/\psi \rightarrow D^- e^+ \nu_e$	$0.5 \div 6.8$	$< 1.2 \times 10^{-5}$
$J/\psi \rightarrow D^- \mu^+ \nu_\mu$	$0.5 \div 6.6$	
$J/\psi \rightarrow D_s^- e^+ \nu_e$	$13. \div 113$	$< 1.3 \times 10^{-6}$
$J/\psi \rightarrow D_s^- \mu^+ \nu_e$	$12 \div 109$	
$J/\psi \rightarrow D^{*-} e^+ \nu_e$	$2.6 \div 5$	$< 1.8 \times 10^{-6}$
$J/\psi \rightarrow D^{*-} \mu^+ \nu_e$	$2.5 \div 4.9$	
$J/\psi \rightarrow D_s^{*-} e^+ \nu_e$	$40 \div 82$	
$J/\psi \rightarrow D_s^{*-} \mu^+ \nu_e$	$39 \div 69$	

.....

Результаты теор. расчётов взяты из [arXiv:1604.03298](https://arxiv.org/abs/1604.03298)

Исследование слабых распадов J/ψ , нелептонные процессы



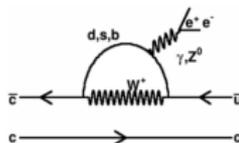
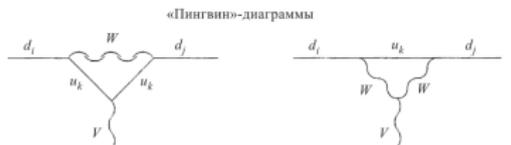
Пример

Тип	Отношение
1	$\frac{B(J/\psi \rightarrow D_s K)}{B(J/\psi \rightarrow D_s \pi)} \sim 0.081$
2	$\frac{B(J/\psi \rightarrow DK)}{B(J/\psi \rightarrow D\pi)} \sim 0.18$

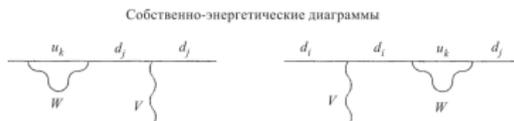
Распад	Вероятность	
	Теор., 10^{-11}	Эксп.
$J/\psi \rightarrow D^- \pi^- / c.c.$	$0.8 \div 12.7$	$< 7.5 \times 10^{-5}$
$J/\psi \rightarrow D^- \rho^+ / c.c.$	$3 \div 4.3$	
$J/\psi \rightarrow D_s^- K^+ / c.c.$	$1.6 \div 12.4$	
$J/\psi \rightarrow D_s^- K^{*+} / c.c.$	$8 \div 56$	
$J/\psi \rightarrow D^{*-} \pi^+ / c.c.$	$6 \div 11.6$	$< 1.3 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow D^{*-} \rho^+ / c.c.$	$28 \div 33$	
$J/\psi \rightarrow D_s^{*-} K^+ / c.c.$	$11 \div 17.9$	
$J/\psi \rightarrow D_s^{*-} K^{*+} / c.c.$	26 ± 4	
$J/\psi \rightarrow \bar{D}^0 \bar{K}^0 / c.c.$	$3.6 \div 27.8$	$< 1.7 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \bar{D}^{*0} \bar{K}^{*0} / c.c.$	$16 \div 152$	$< 2.5 \times 10^{-6}$
$J/\psi \rightarrow \bar{D}^{*0} \bar{K}^0 / c.c.$	$26 \div 53.7$	
$J/\psi \rightarrow \bar{D}^{*0} \bar{K}^{*0} / c.c.$	$96 \div 116$	

Результаты теор. расчётов взяты из [arXiv:1604.03298](https://arxiv.org/abs/1604.03298)

Поиск нейтральных токов с изменением аромата (FCNC процессы)



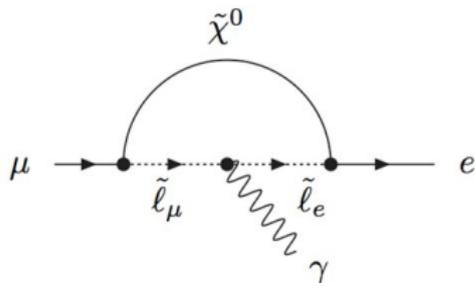
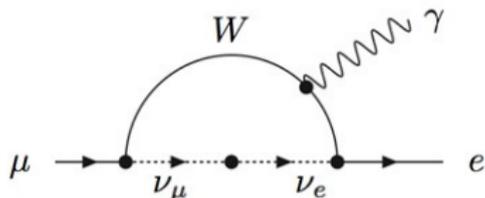
SM
 $10^{-10} \sim 10^{-13}$



Результаты BESIII [arXiv:1710.02278](https://arxiv.org/abs/1710.02278)

Процесс	Верхний предел
$J/\psi \rightarrow D^0 e^+ e^- + c.c.$	8.5×10^{-8}
$\psi(2S) \rightarrow D^0 e^+ e^- + c.c.$	1.4×10^{-7}

Поиск процессов с нарушение лептонного аромата (LFV процессы)



- 1 В Стандартной Модели $\mathcal{B} \sim 10^{-55} \div 10^{-54}$
- 2 За рамками Стандартной Модели $\mathcal{B} \sim 10^{-15} \div 10^{-12}$

Процесс	Верхний предел (@90%)	
	BESII (59×10^6)	BESIII (225×10^6)
$J/\psi \rightarrow e\mu$	1.1×10^{-6}	1.6×10^{-7}
$J/\psi \rightarrow e\tau$	8.3×10^{-6}	-
$J/\psi \rightarrow \mu\tau$	2.0×10^{-6}	-

Поиск распадов J/ψ с нарушением симметрии ($LFV, LNV, BNV + LNV$)

Распад	Тип
$\mu^\pm e^\mp, e^\pm \tau^\mp, \mu^\pm \tau^\mp$	LFV
$\pi^0 e^\pm \mu^\mp, \eta e^\pm \mu^\mp, \rho e^\pm \mu^\mp, \omega e^\pm \mu^\mp \dots$	LFV
$\pi^+ \pi^- e^\pm \mu^\mp, K^+ K^- e^\pm \mu^\mp, K^- \pi^+ e^\pm \mu^\mp \dots$	LFV
$\pi^\mp \pi^\mp e^\pm e^\pm, K^\mp K^\mp e^\pm e^\pm, K^\mp \pi^\mp e^\pm e^\pm, \pi^\mp \pi^\mp \mu^\pm \mu^\pm$	LNV
$\rho e^-, \bar{\rho} e^+ \dots$	BNV+LNV

Изучение барионов

Распады $J/\psi, \psi(2S)$	$\mathcal{B}, 10^{-3}$
$J/\psi \rightarrow p\bar{p}$	2.120 ± 0.029
$J/\psi \rightarrow n\bar{n}$	2.090 ± 0.16
$J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$	1.61 ± 0.15
$\Delta(1232)^{++}\bar{\Delta}(1232)^{--}$	1.10 ± 0.29
$J/\psi \rightarrow \Sigma^+\Sigma^-$	1.50 ± 0.24
$J/\psi \rightarrow \Sigma^0\bar{\Sigma}^0$	1.29 ± 0.09
$J/\psi \rightarrow \Sigma(1385)^-\bar{\Sigma}(1385)^+/c.c$	1.10 ± 0.12
$J/\psi \rightarrow \Sigma(1385)^-\bar{\Sigma}^+/c.c.$	0.31 ± 0.05
$J/\psi \rightarrow \Xi^-\bar{\Xi}^+$	0.86 ± 0.11
$J/\psi \rightarrow \Xi^0\bar{\Xi}^0$	1.20 ± 0.24
$J/\psi \rightarrow \Xi(1530)^0\bar{\Xi}^0$	0.32 ± 0.14
$J/\psi \rightarrow \Xi(1530)^-\bar{\Xi}^+$	0.59 ± 0.15
$\psi(2S) \rightarrow \Lambda^-\bar{\Lambda}^+$	0.357 ± 0.018
$\psi(2S) \rightarrow \Omega^-\bar{\Omega}^+$	0.05 ± 0.01
$\psi(2S) \rightarrow \Delta^{++}\bar{\Delta}^{--}$	0.128 ± 0.035

BNV+LNV процессы

Распад
$\Lambda, \Sigma^0, \Xi^0 \rightarrow p l^-$
$\Sigma^\pm \rightarrow n l^\pm$
.....

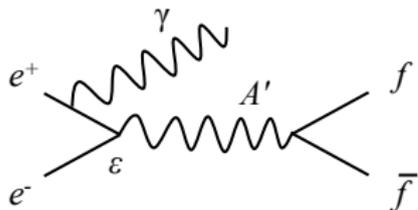
Полулептонные распады

Распад	Верхний предел, 10^{-6}
$\Sigma^+ \rightarrow p e^+ \nu_e$	< 5
$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^- e^+ \nu_e$	< 900
$\Xi^0 \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$	< 1300
$\Xi^- \rightarrow \Xi^0 e^- \bar{\nu}_e$	< 2300
$\Xi^- \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$	< 3200

FCNC и LVN процессы

Распад	$\mathcal{B}, 10^{-6}$
$\Sigma^+ \rightarrow p e^+ e^-$	< 7
$\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$	$0.09^{+0.09}_{-0.08}$
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda e^+ e^-$	7.6 ± 0.6
$\Lambda \rightarrow p e^+ e^-$	-
$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^0 e^+ e^-$	-
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^- e^+ e^-$	-
$\Omega^- \rightarrow \Sigma^- e^+ e^- (\mu^+ \mu^-)$	-
$\Lambda^- \rightarrow n \nu \bar{\nu}$	-
$\Sigma^+ \rightarrow p \nu \bar{\nu}$	-
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda \nu \bar{\nu}$	-
$\Xi^0 \rightarrow \Sigma^0 \nu \bar{\nu}$	-
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^- \nu \bar{\nu}$	-
$\Omega^- \rightarrow \Xi^- \nu \bar{\nu}$	-
$\Sigma^- \rightarrow \Sigma^+ e^- e^-$	-
$\Sigma^- \rightarrow p e^- e^-$	-
$\Xi^- \rightarrow p e^- e^-$	-
$\Xi^- \rightarrow \Sigma^+ e^- e^-$	-
$\Omega^- \rightarrow \Sigma^+ e^- e^-$	-
$\Sigma^- \rightarrow p \mu^- \mu^-$	-
$\Xi^- \rightarrow p \mu^- \mu^-$	< 0.04
.....	

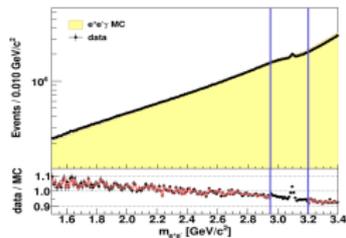
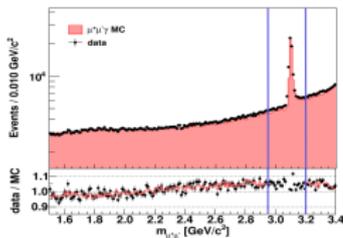
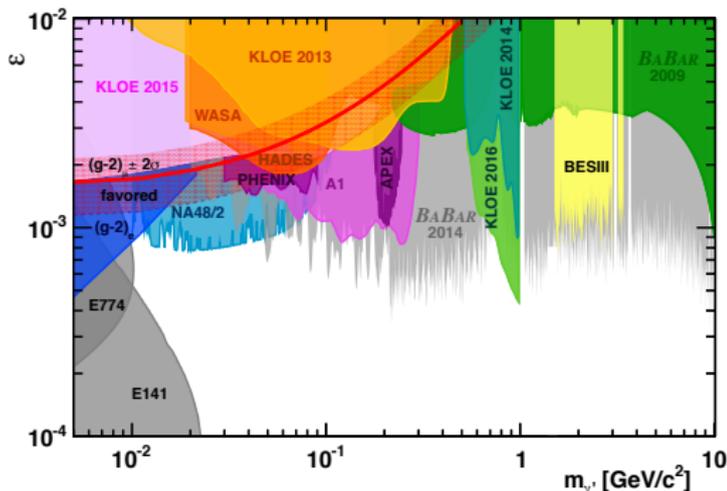
Поиск тёмного фотона методом ISR



$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{\varepsilon}{2} F^{Y,\mu\nu} F'_{\mu\nu} + \frac{1}{4} F'^{\mu\nu} F'_{\mu\nu} + m_{A'}^2 A'^\mu A'_\mu$$

Рассматриваются процессы:

$$e^+ e^- \rightarrow A' \gamma_{\text{ISR}} \rightarrow l^+ l^- \gamma_{\text{ISR}}$$

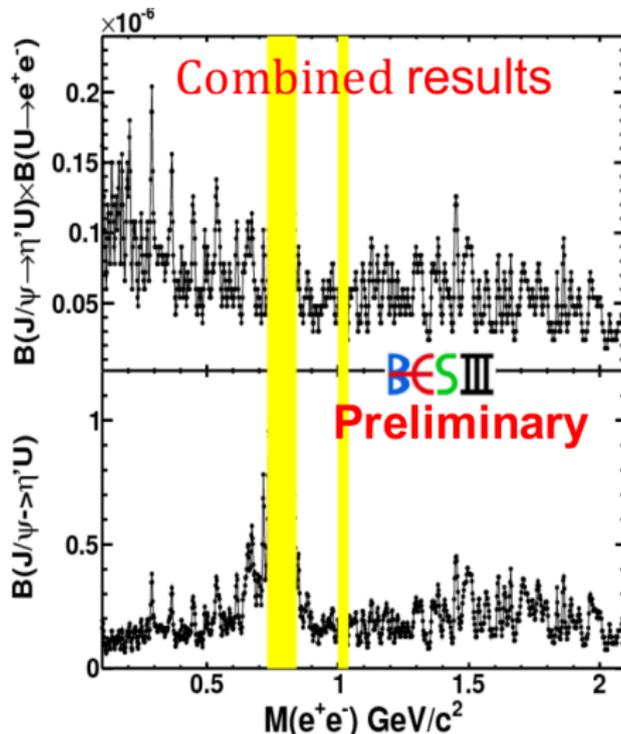
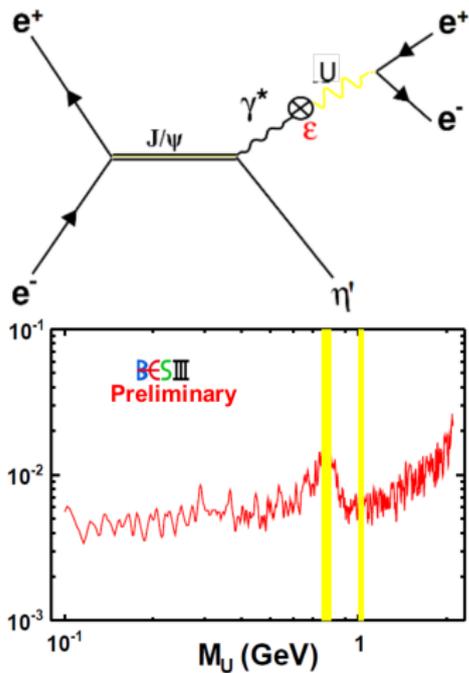


arXiv:1705.04265

Исследование процессов: $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma_{\text{ISR}}, \mu^+\mu^- \gamma_{\text{ISR}}$

Поиск тёмного фотона в эксклюзивных каналах

Исследование процессов $J/\psi \rightarrow XU$, $U \rightarrow e^+e^-$ (или $U \rightarrow \mu^+\mu^-$)
 BESIII (Доклад Dayong Wang PANIC2017): $J/\psi \rightarrow \eta' U$
 Реконструировались события: $\gamma e^+e^- \pi^+\pi^- / \gamma \gamma e^+e^- \pi^+\pi^-$



Реконструкция событий $J/\psi \rightarrow \gamma A^0$, $A^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

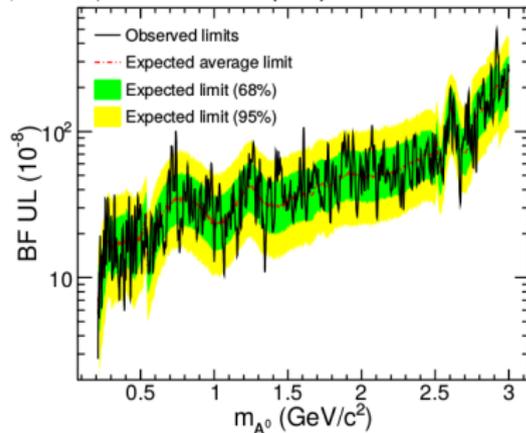
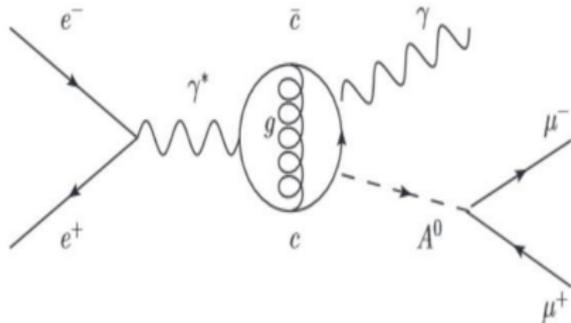


FIG. 5. (color online) The 90% C.L. upper limits (UL) on the product branching fractions $B(J/\psi \rightarrow \gamma A^0) \times B(A^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ as a function of m_{A^0} including all the uncertainties (solid line), together with expected limits computed using a large number of pseudo-experiments. The inner and outer bands include statistical uncertainties only and contain 68% and 95% of the expected limit values. The average dashed line in the center of the inner band is the expected average upper limit of 1600 pseudo-experiments. A better sensitivity in the mass region of $0.212 \leq m_{A^0} \leq 0.22 \text{ GeV}/c^2$ is achieved due to almost negligible backgrounds as seen in Fig. 2 (top).

[arXiv:1510.01641](https://arxiv.org/abs/1510.01641)

Поиск определения вероятностей распадов в недетектируемые частицы.

Поиск событий $q\bar{q} \rightarrow (\gamma)\chi\chi$, где χ – слабовзаимодействующая частица.

Например в работе BESIII [arXiv:1209.2469](https://arxiv.org/abs/1209.2469) исследовались процессы $J/\psi \rightarrow \phi\eta$, $J/\psi \rightarrow \phi\eta'$.

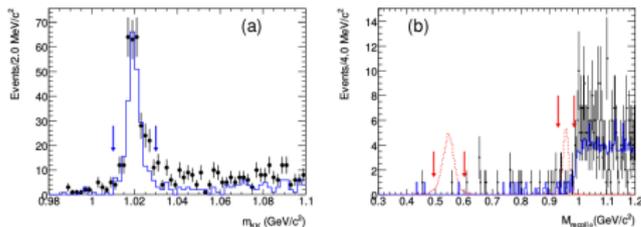


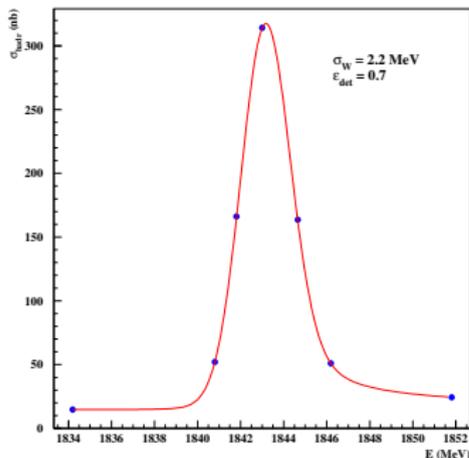
FIG. 1: (a) The m_{KK} distribution for candidate events in data. The arrows on the plot indicate the signal region of ϕ candidates. Points with error bars are data; the (blue) histogram is expected background. (b) Recoil mass distribution against ϕ candidates, M_{recoil}^{ϕ} , for events with $1.01 \text{ GeV}/c^2 < m_{KK} < 1.03 \text{ GeV}/c^2$ in (a). Points with error bars are data; the (blue) solid histogram is the sum of the expected backgrounds; the dashed histograms (with arbitrary scale) are signals of η and η' invisible decays from MC simulations; the arrows on the plot indicate the signal regions of the η and $\eta' \rightarrow \text{invisible}$.

Процесс	Верхний предел BESIII (225×10^6)
$\mathcal{B}(\eta \rightarrow \text{invisible})$	2.6×10^{-4}
$\mathcal{B}(\eta' \rightarrow \text{invisible})$	2.4×10^{-2}

Прецизионное измерение полной ширины $\psi(2S)$

$\psi(2S)$ WIDTH

VALUE (keV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
296 ± 8 OUR FIT				
286 ± 16 OUR AVERAGE				
$358 \pm 88 \pm 4$		ABLIKIM 08B	BES2	$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$
$290 \pm 25 \pm 4$	2.7k	ANDREOTTI 07	E835	$p\bar{p} \rightarrow e^+e^-, J/\psi X$
$331 \pm 58 \pm 2$		ABLIKIM 06L	BES2	$e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}$
264 ± 27		¹ BAI 02B	BES2	e^+e^-
$287 \pm 37 \pm 16$		² ARMSTRONG 93B	E760	$p\bar{p} \rightarrow e^+e^-$



- 1 Измерения энергии пучка с точностью не хуже 50 кэВ позволит провести прецизионное измерение по полной ширины $\psi(2S)$, непосредственно из подгонки резонанса.
- 2 7-точечное сканирование, суммарный интеграл светимости 1 fb^{-1} , стат. ошибка $\frac{\delta\Gamma}{\Gamma} \lesssim 1\%$
- 3 При относительных $\frac{\delta\epsilon}{\epsilon}$, $\frac{\delta L}{L} \sim 0.1\%$, $\frac{\delta\Gamma}{\Gamma} \lesssim 1\%$, вклад ошибку точности определения энергии $\lesssim 1\%$.

Оценки выполнены А.Г. Шамовым

Аналитическое выражение для сечения вблизи резонанса в мягкофотонном приближении было впервые получено в работе:

Я.И. Азимов и др. Письма в ЖЭТФ 21 (1975) 172

В уточнённом виде имеет вид:

$$\sigma^{e^+e^- \rightarrow \text{hadr}}(s) = \sigma_{\text{continuum}}^{e^+e^- \rightarrow \text{hadr}} + \frac{12\pi}{s} (1 + \delta_{sf}) \left[\frac{\Gamma_{ee} \tilde{\Gamma}_h}{\Gamma M} \text{Im} f(s) - \frac{2\alpha \sqrt{R \Gamma_{ee} \tilde{\Gamma}_h}}{3\sqrt{s}} \lambda \text{Re} \frac{f^*(s)}{1 - \Pi_0} \right],$$

$$\delta_{sf} = \frac{3}{4}\beta + \frac{\alpha}{\pi} \left(\frac{\pi^2}{3} - \frac{1}{2} \right) + \beta^2 \left(\frac{37}{96} - \frac{\pi^2}{12} - \frac{L}{72} \right), \quad L = \ln(s/m_e^2),$$

$$\beta = \frac{2\alpha}{\pi} (L - 1), \quad f(s) = \frac{\pi\beta}{\sin \pi\beta} \left(\frac{s}{M^2 - s - iM\Gamma} \right)^{1-\beta}$$

δ_{sf} – вычислена в работе: Э.А.Кураев, В.С.Фадин Sov.J.Nucl.Phys.41(466-472) 1985

Γ_{ee} , Γ , M – "одетые" параметры, с учётом радиационных поправок,

$\Gamma_{ee} = \Gamma_{ee}^{(0)} / |1 - \Pi_0|^2$, λ – характерный параметр интерференции, $\tilde{\Gamma}_h \neq \Gamma_h$

Эффекты интерференции

Если сильные и электромагнитные распады резонанса не интерферируют $\lambda = \sqrt{RB_{ee}/B_h}$ в противном случае для произвольной эксклюзивной моды m соответствующий вклад R_m в R :

$$\Gamma_m = R_m \Gamma_{ee} + \Gamma_m^{(s)} + 2\sqrt{R_m \Gamma_{ee} \Gamma_m^{(s)}} \langle \cos \phi_m \rangle_{\Theta},$$

Здесь скобки $\langle \rangle_{\Theta}$ отмечают усреднение по фазовому пространству

$$\lambda = \sqrt{\frac{RB_{ee}}{B_h}} + \sqrt{\frac{1}{B_h}} \sum_m \sqrt{b_m B_m^{(s)}} \langle \cos \phi_m \rangle_{\Theta}$$

где $b_m = R_m/R$ вероятность распада в континууме, $B_m^{(s)} = \Gamma_m^{(s)}/\Gamma$.

$$\tilde{\Gamma}_h = \Gamma_h \times \left(1 + \frac{2\alpha}{3(1 - \text{Re} \Pi_0) B_h} \sqrt{\frac{R}{B_{ee}}} \sum_m \sqrt{b_m B_m^{(s)}} \langle \sin \phi_m \rangle_{\Theta} \right)$$

- 1 Фазы интерференции для отдельных мод распадов узких резонансов в настоящее время слабо изучены.
- 2 3-5 дневные сканирования J/ψ , $\psi(2S)$ позволят прояснить данный вопрос для основных мод.

- 1 Возможности $c\text{-}\tau$ фабрики позволят проводить широкий круг исследований состояний чармония.
- 2 Наличие системы измерения энергии пучка дополнит физическую программу рядом уникальных экспериментов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ.