

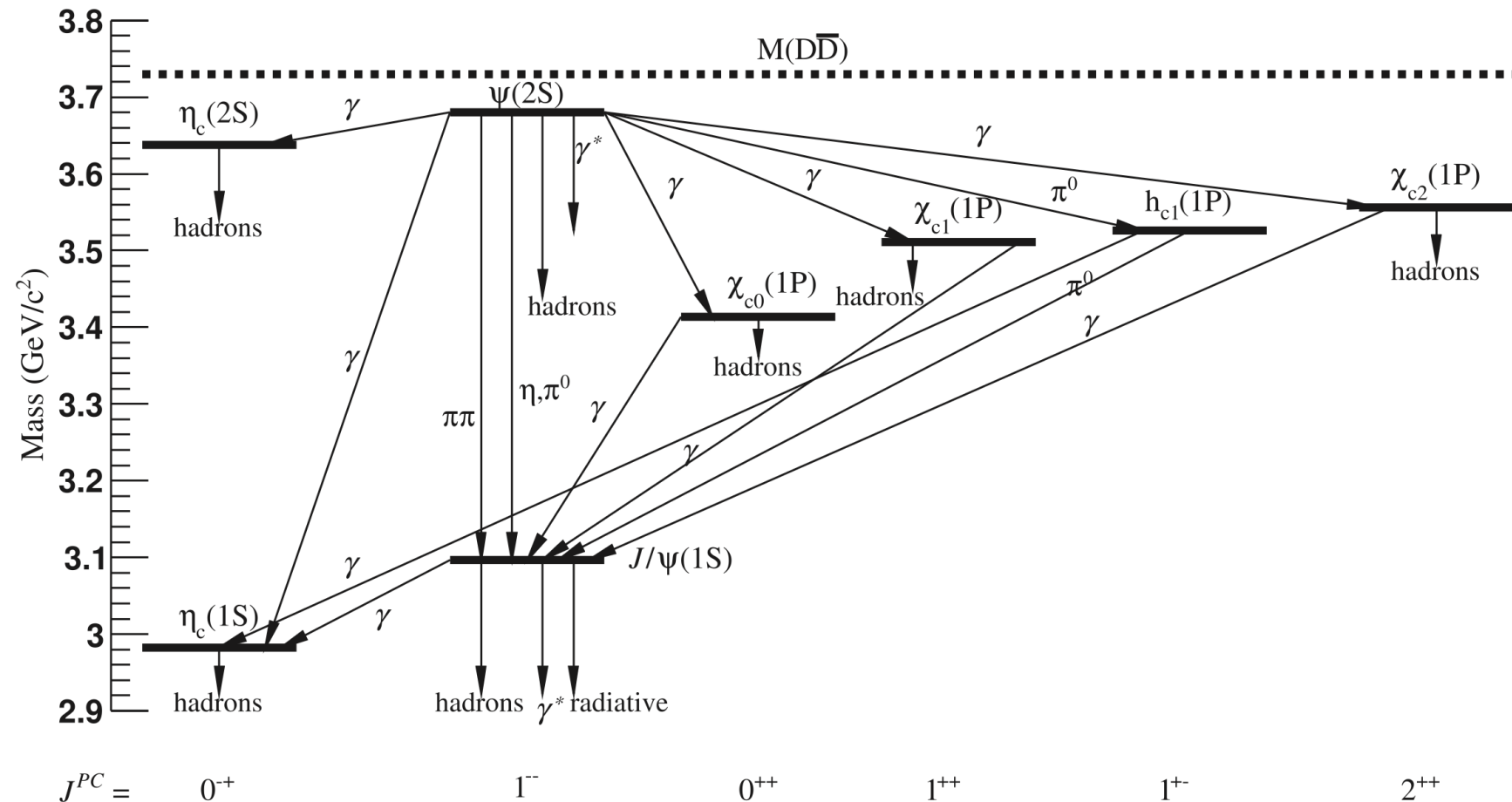
Чармонии и Новая физика на ВЭПП-6

АННА ВИНОКУРОВА

Спектр чармониев ниже порога открытого чарма

Спектр задач

- Бранчинги
- Радиационные переходы
- Проверка Стандартной модели (СМ)
- Поиск Новой физики (НФ)
- ...



Оценка числа рожденных чармониев

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
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \eta_c$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	10^7	7×10^7
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c0}$	$(9.75 \pm 0.22) \%$	3×10^8	2×10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c1}$	$(9.75 \pm 0.27) \%$	3×10^8	2×10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c2}$	$(9.38 \pm 0.23) \%$	3×10^8	2×10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \eta_c(2S)$	$(5.4 \pm 3.4) \times 10^{-4}$	2×10^6	10^7
$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c$	$(7.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	2×10^6	10^7
$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$	$(50 \pm 10) \text{ пб}$	$7 \times 10^4 (11 \text{ фб}^{-1})$	5×10^6

BESIII

На данный момент:

$$\sim 10^{10} J/\psi$$

$$\sim 3 \times 10^9 \psi(2S)$$

ВЭПП6

Год работы со светимостью 10^{34} :

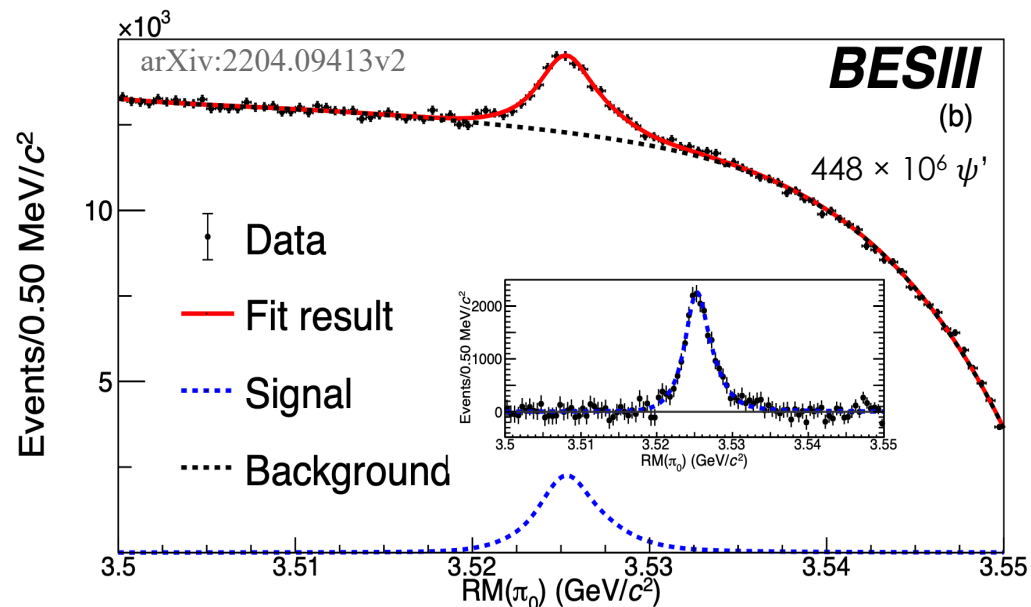
$$\sim 10^{11} J/\psi$$

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

Механизмы рождения h_c

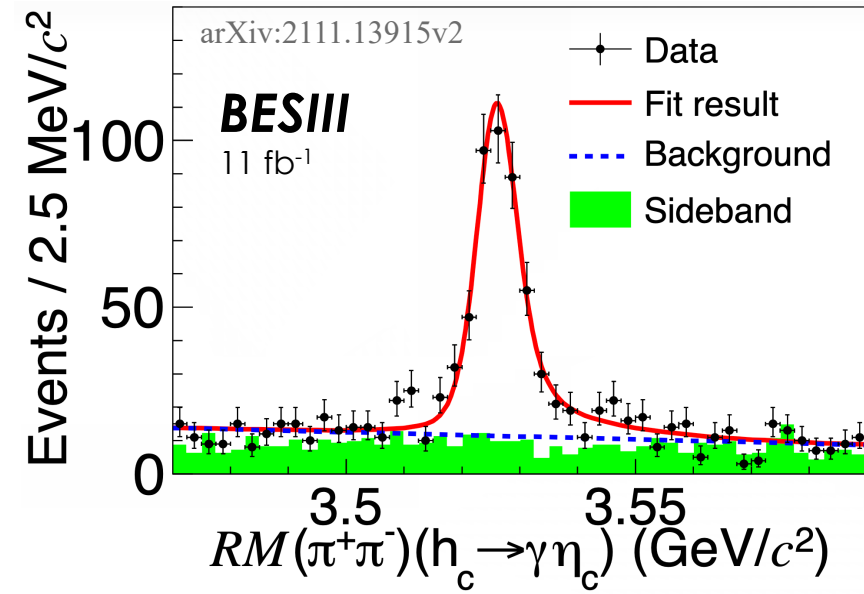
$$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c$$

- большая статистика
- ниже эффективность регистрации (реконструкция π^0)
- высокий фон



$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$$

- меньшая статистика
- выше эффективность регистрации (заряженные π^\pm)
- низкий фон
- непосредственное измерение числа h_c



Куда распадается h_c ? И не только...



$h_c(1P)$ DECAY MODES

Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level
$\Gamma_1 J/\psi(1S)\pi^0$	$< 5 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_2 J/\psi(1S)\pi\pi$	$< 9 \times 10^{-5}$	90%
$\Gamma_3 J/\psi(1S)\pi^+\pi^-$	$< 9 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_4 p\bar{p}$	$< 4 \times 10^{-5}$	90%
$\Gamma_5 p\bar{p}\pi^0$	$< 8 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_6 p\bar{p}\pi^+\pi^-$	$(3.3 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_7 p\bar{p}\pi^0\pi^0$	$< 6 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_8 p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	$(4.4 \pm 1.3) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_9 p\bar{p}\eta$	$(7.4 \pm 2.2) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{10} \pi^+\pi^-\pi^0$	$(1.57 \pm 0.13) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{11} \pi^+\pi^-\eta$	$< 5 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_{12} \pi^+\pi^-\pi^0\eta$	$(8.3 \pm 2.4) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{13} 2\pi^+2\pi^-\pi^0\eta$	$(7.2 \pm 1.7) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{14} 2\pi^+2\pi^-\pi^0$	$(9.4 \pm 1.7) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{15} 2\pi^+2\pi^-\eta$	$< 6 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_{16} 3\pi^+3\pi^-\pi^0$	$(9.1 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{17} 2\pi^+2\pi^-\omega$	$(3.9 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{18} K^+K^-\pi^+\pi^-$	$< 7 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_{19} K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$	$(3.8 \pm 0.8) \times 10^{-3}$	
$\Gamma_{20} K^+K^-\pi^+\pi^-\eta$	$< 2.7 \times 10^{-3}$	90%
$\Gamma_{21} K^+K^-\pi^0$	$(3.8 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{22} K^+K^-\pi^0\eta$	$< 2.4 \times 10^{-3}$	90%
$\Gamma_{23} K^+K^-\eta$	$(3.6 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{24} 2K^+2K^-\pi^0$	$< 2.8 \times 10^{-4}$	90%
$\Gamma_{25} K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$(7.1 \pm 1.9) \times 10^{-4}$	
$\Gamma_{26} K_S^0 K^\pm \pi^\mp \pi^\pm \pi^\mp$	$(3.2 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	

Radiative decays		
$\Gamma_{27} \gamma\eta$		$(3.8 \pm 0.6) \times 10^{-4}$
$\Gamma_{28} \gamma\eta'(958)$		$(1.41 \pm 0.15) \times 10^{-3}$
$\Gamma_{29} \gamma\pi^0$	< 5	$\times 10^{-5}$
$\Gamma_{30} \gamma\eta_c(1S)$	(60 ± 4)	%
$\Gamma_{31} e^+e^-\eta_c(1S)$		$(3.5 \pm 0.7) \times 10^{-3}$

~ 6 %

Не хватает ~ 30 %!

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

Радиационные переходы (I)



➤ $\psi(2S) \rightarrow \chi_{c1,2} \gamma$

$$2^3S_1 \leftrightarrow 1^3P_{1,2} \\ E1 + M2$$

$\chi_{c1,2} \rightarrow J/\psi \gamma$

$$1^3P_{1,2} \leftrightarrow 1^3S_1 \\ E1 + M2$$

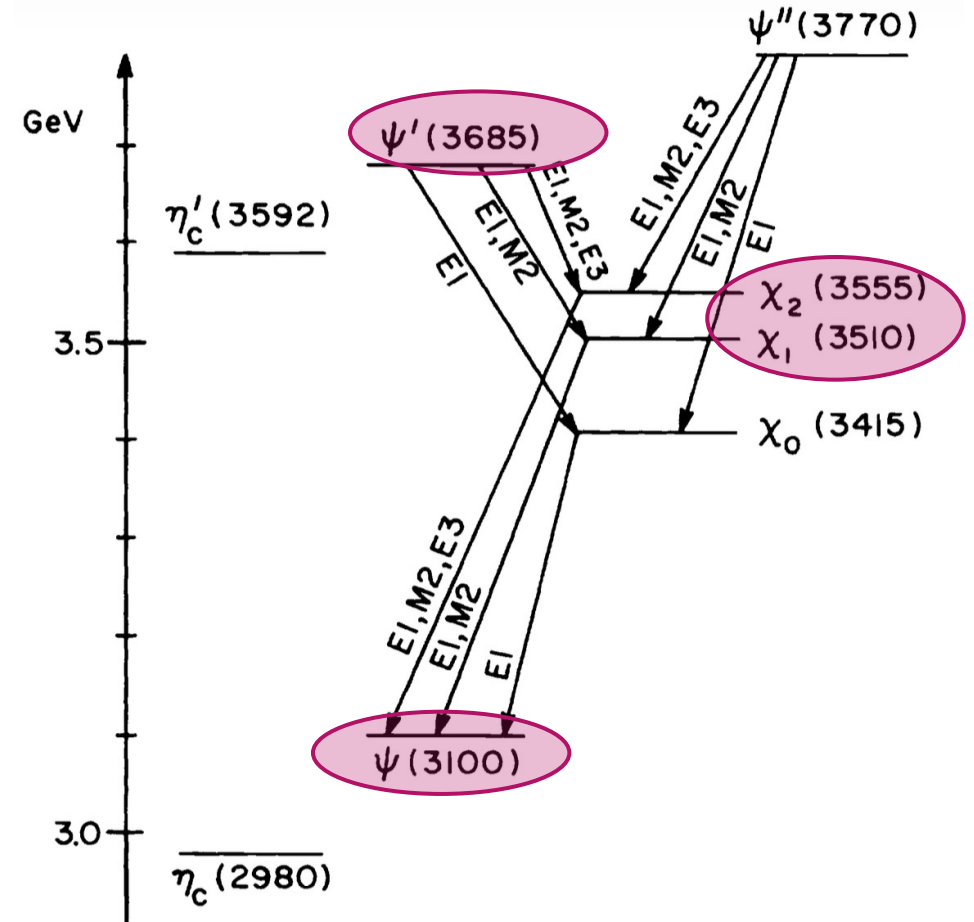
Вклад амплитуды M2:

- масса с кварка
- аномальный магнитный момент с кварка

Вклад амплитуды E3:

- примесь D-волны ($\psi(1D)$) к S-волне ($\psi(2S)$)
- примесь F-волны к P-волне ($\chi_{c1,2}$)

$$\cos \varphi |2^3S_1\rangle - \sin \varphi |^3D_1\rangle \quad \varphi = (12 \pm 2)^\circ$$



Радиационные переходы (II)



BESIII $10^8 \psi(2S)$ $W(\cos \theta', \phi', \cos \theta_{\gamma\gamma'}, \cos \theta, \phi) \propto$

$$\sum \rho^{(\mu' - \nu', \mu' - \tilde{\nu}')}(\theta', \phi') B_{|\nu'|} B_{|\tilde{\nu}'|} d_{-\nu'\nu}^{J_\chi}(\theta_{\gamma\gamma'}) d_{-\tilde{\nu}'\tilde{\nu}}^{J_\chi}(\theta_{\gamma\gamma'}) A_{|\nu|} A_{|\tilde{\nu}|} \rho^{*(\nu - \mu, \tilde{\nu} - \mu)}(\theta, \phi)$$

$$A_\nu^{J_\chi} = \sum_{J_\gamma} \sqrt{\frac{2J_\gamma + 1}{2J_\chi + 1}} a_{J_\gamma}^{J_\chi} \langle J_\gamma, 1; 1, \nu - 1 | J_\chi, \nu \rangle$$

χ_{c1}	$a_2^1 = -0.0740 \pm 0.0033 \pm 0.0034, b_2^1 = 0.0229 \pm 0.0039 \pm 0.0027$ $\rho_{a_2 b_2}^1 = 0.133$
χ_{c2}	$a_2^2 = -0.120 \pm 0.013 \pm 0.004, b_2^2 = 0.017 \pm 0.008 \pm 0.002$ $a_3^2 = -0.013 \pm 0.009 \pm 0.004, b_3^2 = -0.014 \pm 0.007 \pm 0.004$

M2: 24.3 σ

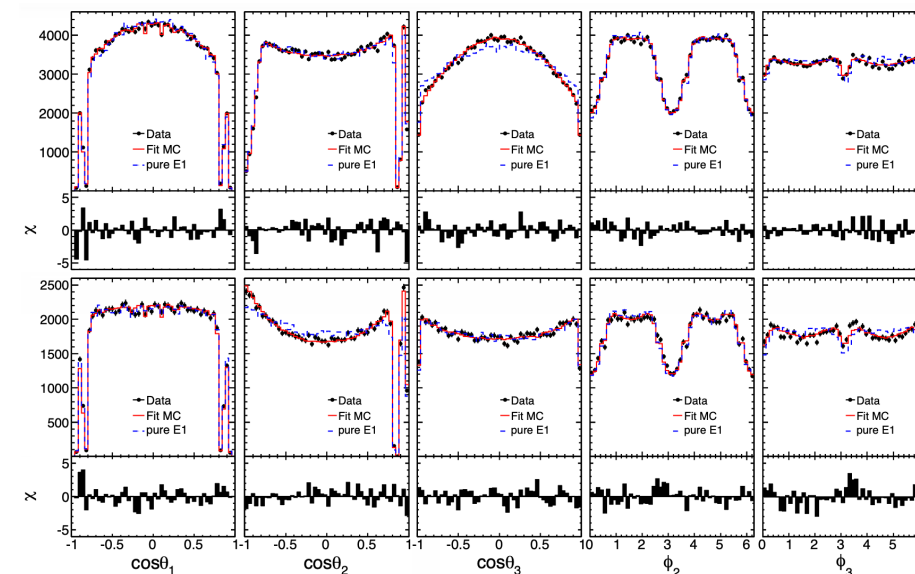
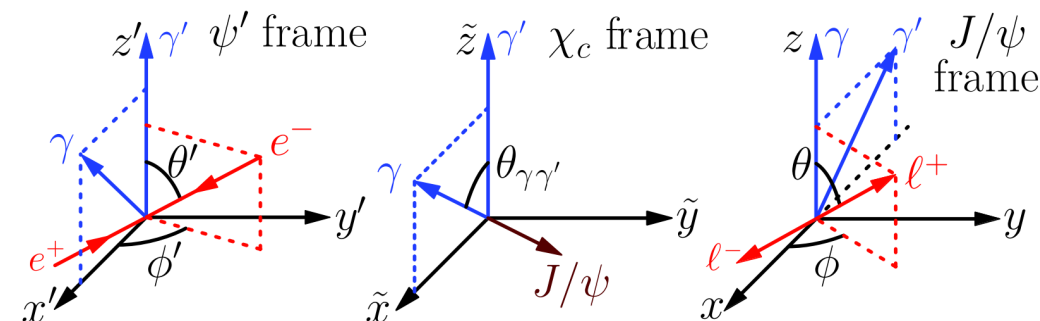
M2: 13.4 σ
E3: 2.3 σ

$$\mu = (|e| e_c / 2m_c)(1 + \kappa)$$

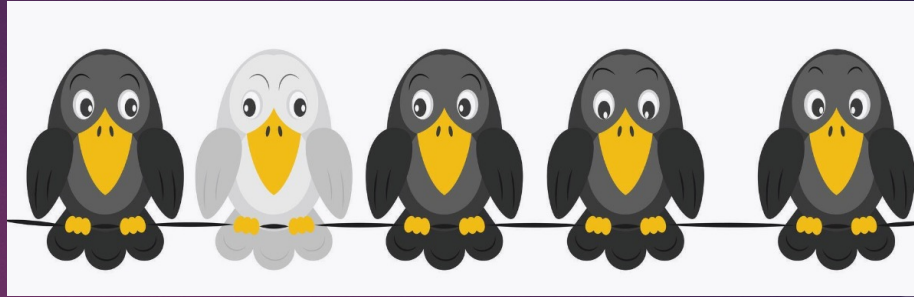
$$1 + \kappa = - \frac{4m_c}{E_{\gamma_2}[\chi_{c1} \rightarrow \gamma_2 J/\psi]} a_2^1$$

$$= 1.140 \pm 0.051 \pm 0.053 \pm 0.229$$

аномальный
магнитный
момент с кварка



Редкие (слабые) распады



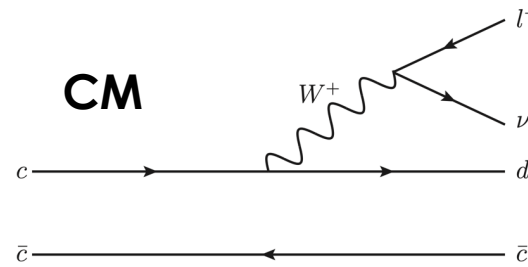
8

➤ Полулептонные $\psi(nS) \rightarrow D_{(s)}^{(*)\pm} l^\mp \nu_l$

Предсказание СМ: $\sim 10^{-9} - 10^{-11}$

Перспектива: первое наблюдение

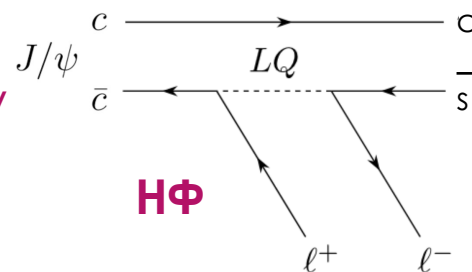
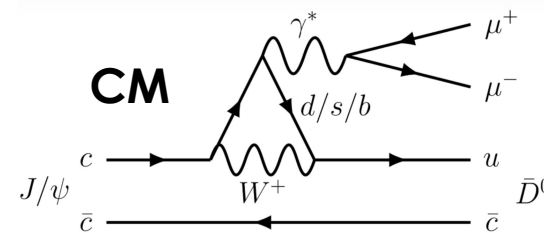
Как измерить: тагирование быстрым лептоном, недостающая E_ν , восстановление γ и π из распада D_s^*



➤ Полулептонные $\psi(nS) \rightarrow D_{(s)}^{(*)0} l^\pm l^\mp$

Предсказание СМ: $\sim 10^{-13}$

Перспектива: обнаружение НФ (МССМ, двойной дублет Хиггсов)



➤ Двухчастичные $\psi(nS) \rightarrow PP/PV/VV$

Предсказание СМ: $\sim 10^{-8} - 10^{-13}$

Перспектива: обнаружение НФ

J/ψ

$D^- e^+ \nu_e + \text{c.c.}$	$< 7.1 \times 10^{-8}$	CL=90%
$D^- \mu^+ \nu_\mu + \text{c.c.}$	$< 5.6 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\bar{D}^0 e^+ e^- + \text{c.c.}$	$< 8.5 \times 10^{-8}$	CL=90%
$D_s^- e^+ \nu_e + \text{c.c.}$	$< 1.3 \times 10^{-6}$	CL=90%
$D_s^{*-} e^+ \nu_e + \text{c.c.}$	$< 1.8 \times 10^{-6}$	CL=90%
$D^- \pi^+ + \text{c.c.}$	$< 7.0 \times 10^{-8}$	CL=90%
$D^- \rho^+ + \text{c.c.}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\bar{D}^0 \pi^0 + \text{c.c.}$	$< 4.7 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\bar{D}^0 \bar{K}^0 + \text{c.c.}$	$< 1.7 \times 10^{-4}$	CL=90%
$\bar{D}^0 \bar{K}^{*0} + \text{c.c.}$	$< 2.5 \times 10^{-6}$	CL=90%
$\bar{D}^0 \eta + \text{c.c.}$	$< 6.8 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\bar{D}^0 \rho^0 + \text{c.c.}$	$< 5.2 \times 10^{-7}$	CL=90%
$D_s^- \pi^+ + \text{c.c.}$	$< 1.3 \times 10^{-4}$	CL=90%
$D_s^- \rho^+ + \text{c.c.}$	$< 1.3 \times 10^{-5}$	CL=90%

$\psi(2S)$

$D^0 e^+ e^- + \text{c.c.}$	$< 1.4 \times 10^{-7}$	CL=90%
$\Lambda_c^+ \bar{\Sigma}^- + \text{c.c.}$	$< 1.4 \times 10^{-5}$	CL=90%

Невидимые распады (I)

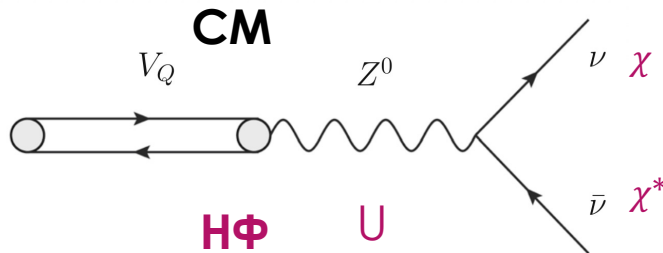


➤ $\psi(nS) \rightarrow (c\bar{c}) h/\gamma$, $c\bar{c} \rightarrow \text{invisible}$

Предсказание СМ: $\sim 3 \times 10^{-8}$

Перспектива: обнаружение НФ
(легкая темная материя,
нейтралино)

Как измерить: тагирование с
помощью каскадных распадов $\psi(nS)$



Мода рождения чармония из $\psi(nS)$	Бранчинг	Число событий (за год работы)	Верхний предел
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$	$(34.69 \pm 0.34) \%$	7×10^9	$< 7 \times 10^{-4}$
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^0 \pi^0$	$(18.2 \pm 0.5) \%$	4×10^9	$< 7 \times 10^{-4}$
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \eta$	$(3.37 \pm 0.06) \%$	7×10^8	$< 7 \times 10^{-4}$
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^0$	$(1.268 \pm 0.032) \times 10^{-3}$	3×10^7	$< 7 \times 10^{-4}$
$\psi(2S) \rightarrow \chi_{c0} \gamma$	$(9.75 \pm 0.22) \%$	2×10^9	—
$\psi(2S) \rightarrow \chi_{c1} \gamma$	$(9.75 \pm 0.27) \%$	2×10^9	—
$\psi(2S) \rightarrow \chi_{c2} \gamma$	$(9.38 \pm 0.23) \%$	2×10^9	—
$\psi(2S) \rightarrow \eta_c \gamma$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	7×10^7	—
$J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma$	$(1.41 \pm 0.14) \%$	10^9	—

Невидимые распады (II)



➤ $J/\psi \rightarrow V P, V/P \rightarrow \text{invisible}$

Предсказание СМ: $\sim 10^{-9} - 10^{-11}$ (P)
 $(m(\nu_\tau) < 18 \text{ МэВ}) \quad \sim 10^{-12}$ (V)

Перспектива: обнаружение НФ
 (легкая темная материя,
 нейтрино)

Как измерить: тагирование с
 помощью распада «второй»
 частицы, расчет недостающего
 импульса

Мода рождения чармония из $\psi(nS)$	Бранчинг	Число событий (с учетом промежуточных бранчингов)	Верхний предел
$J/\psi \rightarrow \phi \eta$	$(7.4 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$\phi: 3 \times 10^7$ $\eta: 4 \times 10^7$	$\phi: < 1.7 \times 10^{-4}$ $\omega: < 7 \times 10^{-5}$ $\rho^0: —$
$J/\psi \rightarrow \phi \eta'$	$(4.6 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	$\phi: 10^7$ $\eta': 2 \times 10^7$	
$J/\psi \rightarrow \omega \eta$	$(1.74 \pm 0.20) \times 10^{-3}$	$\omega: 7 \times 10^7$ $\eta: 9 \times 10^7$	
$J/\psi \rightarrow \omega \eta'$	$(1.89 \pm 0.18) \times 10^{-4}$	$\omega: 10^7$ $\eta': 2 \times 10^7$	$\eta: < 10^{-4}$ $\eta': < 2.1 \times 10^{-4}$ $\pi^0: < 4.4 \times 10^{-9}$
$J/\psi \rightarrow \rho^0 \eta$	$(1.93 \pm 0.23) \times 10^{-4}$	$\rho^0: 10^7$ $\eta: 2 \times 10^7$	
$J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0$	$(6.2 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	$\rho^0: 6 \times 10^8$ $\pi^0: 6 \times 10^8$	

ALPs (Axion-Like Particles, аксионоподобные частицы)



11

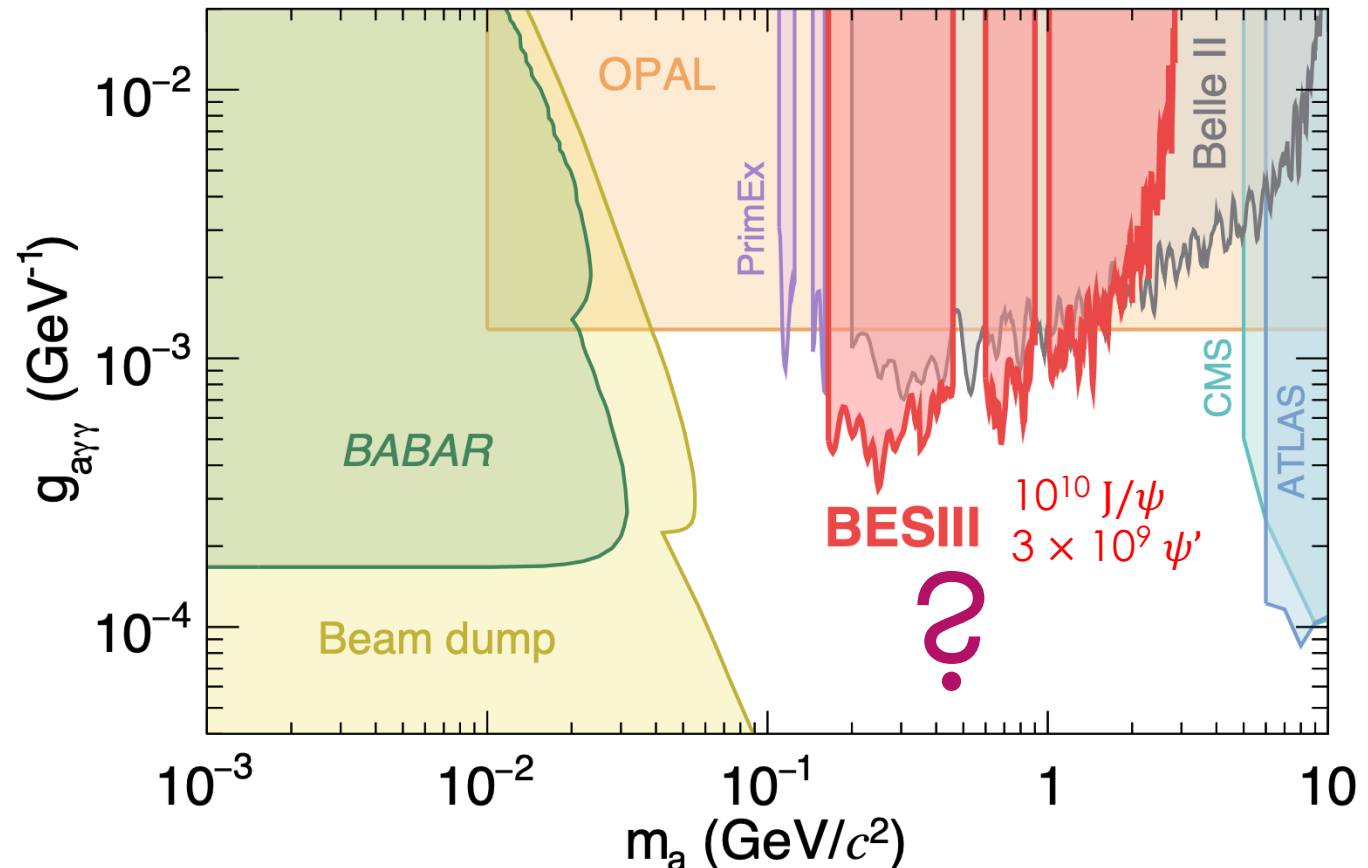
- $J/\psi \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma\gamma$
- $\psi(2S) \rightarrow \pi^+ \pi^- J/\psi, J/\psi \rightarrow \gamma a, a \rightarrow \gamma\gamma$

$$\frac{\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma a)}{\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow e^+ e^-)} = \frac{m_{J/\psi}^2}{32\pi\alpha} g_{a\gamma\gamma}^2 \left(1 - \frac{m_a^2}{m_{J/\psi}^2}\right)^3$$

Перспектива: $m_a \approx 0.18 - 2.85$ ГэВ
обнаружение НФ (холодная темная
материя, суперсимметрия,
расширение Хиггса)

Как измерить:

фон от $J/\psi \rightarrow \gamma P, P = \{\pi^0, \eta, \eta', \eta_c\}$,
тагирование с помощью $\pi^+ \pi^-$



$$e^+e^- \rightarrow D^{*0} (I)$$

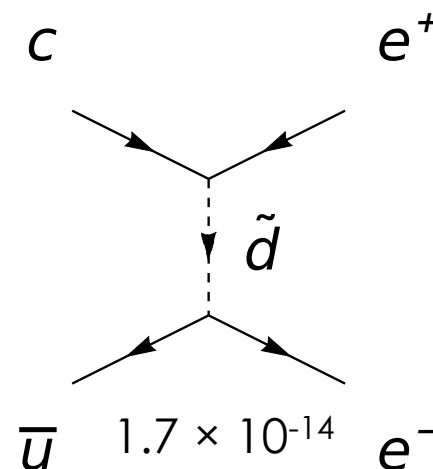
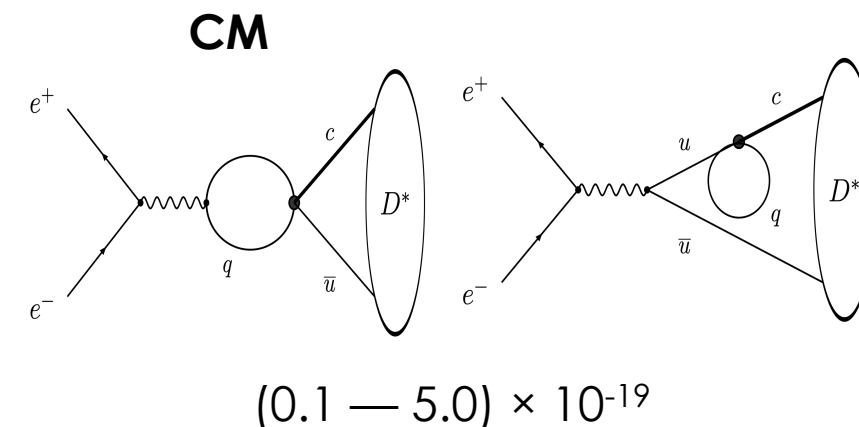
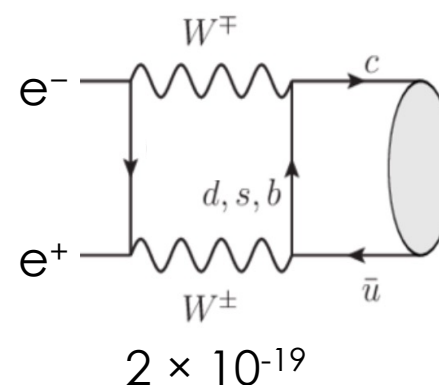


- Нейтральный ток, нарушающий флэйвор (FCNC) в чарм секторе:
 $c \rightarrow u l^+ l^-$

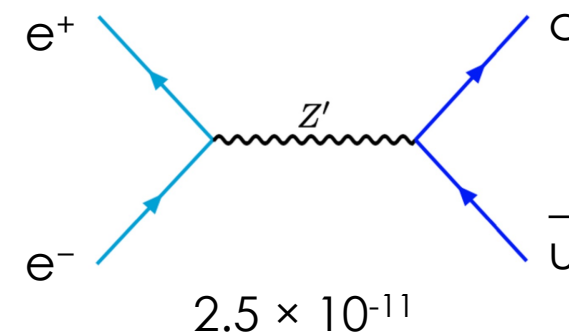
Вместо $D^0 \rightarrow e^+ e^-$ будем изучать
 $e^+ e^- \rightarrow D^{*0} (l^+ l^-)$.

Предсказание СМ: $\sim 10^{-18} - 10^{-19}$.

Перспектива: обнаружение НФ
 (суперсимметричный скварк $\sim 10^{-14}$,
 меняющий аромат бозон $Z' \sim 10^{-11}$)



НФ



$$e^+e^- \rightarrow D^{*0} \text{ (II)}$$



Search for the Process $e^+e^- \rightarrow D^*(2007)^0$ with the CMD-3 Detector

CMD-3 Collaboration • D.N. Shemyakin (Novosibirsk, IYF and Novosibirsk State U.) for the collaboration.
2020



$$L_{\text{int}} = 3.7 \text{ пб}^{-1}$$

$D^{*0} \rightarrow D^0 \pi^0$ 1 событие на фоне (1.5 ± 0.7)

$D^0 \gamma$ 2 события на фоне (1.2 ± 0.5)

$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$

$$B(D^{*0} \rightarrow e^+ e^-) < (1.7 \times 10^{-6}) \text{ (90\% C.L.)}$$

При добавлении дополнительных каналов распада D^0 при $L_{\text{int}} \approx 50 \text{ фб}^{-1}$ можно достичь чувствительности к некоторым моделям НФ.

На ВЭПП-6 это около 200 суток набора данных.

Заключение

- Использование ВЭПП-6 в качестве фабрики чармония позволит обнаружить редкие распады J/ψ и $\psi(2S)$, тем самым провести прецизионные тесты СМ и, возможно, получить указания на эффекты НФ.
- Большая статистика даст возможность проникнуть в такую малоизученную область как невидимые распады частиц. Можно будет впервые установить верхние пределы на многие такие распады, а обнаружение будет однозначно свидетельствовать о физике за пределами СМ.
- Через радиационные переходы можно будет произвести большие наборы данных других, менее изученных, состояний чармония, а также провести анализ этих самых радиационных переходов.



Backup

Radiative decays

$$b_2^1 = \frac{E_{\gamma_1} [\psi(3686) \rightarrow \gamma_1 \chi_{c1}]}{4m_c} (1 + \kappa) = 0.029(1 + \kappa),$$

$$a_2^1 = -\frac{E_{\gamma_2} [\chi_{c1} \rightarrow \gamma_2 J/\psi]}{4m_c} (1 + \kappa) = -0.065(1 + \kappa),$$

$$b_2^2 = \frac{3}{\sqrt{5}} \frac{E_{\gamma_1} [\psi(3686) \rightarrow \gamma_1 \chi_{c2}]}{4m_c} (1 + \kappa) = 0.029(1 + \kappa),$$

$$a_2^2 = -\frac{3}{\sqrt{5}} \frac{E_{\gamma_2} [\chi_{c2} \rightarrow \gamma_2 J/\psi]}{4m_c} (1 + \kappa) = -0.096(1 + \kappa),$$

$$m_c = 1.5 \pm 0.3 \text{ GeV}/c^2$$

$\psi(2S) - \psi(1D)$ mixing

$$|\psi''\rangle = |1^3D_1\rangle \cos \phi + |2^3S_1\rangle \sin \phi, \quad |\psi'\rangle = -|1^3D_1\rangle \sin \phi + |2^3S_1\rangle \cos \phi$$

Table II: Comparison of transitions $\psi'' \rightarrow \gamma\chi_c$ under the assumptions of a pure S-wave or D-wave initial state. Coefficients C are those in the expression (1) for electric dipole transitions.

$$\Gamma = \frac{4}{3}e_Q^2\alpha\omega^3C\langle r\rangle^2$$

Final state	ω (MeV)	Pure 3S_1		Pure 3D_1	
		C	$\Gamma(^3P_J)/\Gamma(^3P_0)$	C	$\Gamma(^3P_J)/\Gamma(^3P_0)$
3P_0	338	1/9	1	2/9	1
3P_1	250	1/3	1.22	1/6	0.30
3P_2	208	5/9	1.16	1/90	0.012

Table IV: Predicted $\psi'' \rightarrow \rho\pi$ partial widths and branching ratios for two solutions of mixing angle ϕ .

ϕ ($^\circ$)	-27 ± 2	12 ± 2
$1/\sin^2 \phi$	4.8 ± 0.6	22 ± 6
$\Gamma(\psi'' \rightarrow \rho\pi)$ (keV)	2.1 ± 0.4	9.8 ± 3.0
$\mathcal{B}(\psi'' \rightarrow \rho\pi)$ (10^{-4})	0.9 ± 0.2	4.1 ± 1.4

J/ψ invisible decays

$$\begin{aligned}\frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \nu\bar{\nu})}{\Gamma(J/\psi \rightarrow e^+e^-)} &= \frac{27G^2 M_{J/\psi}^4}{256\pi^2\alpha^2} \left(1 - \frac{8}{3}\sin^2\theta_W\right)^2 \\ &= 4.54 \times 10^{-7},\end{aligned}$$

Скварк

$$\mathcal{B}_{D^* \rightarrow e^+ e^-}^{\mathcal{R}_p} = \frac{1}{384\pi} \frac{m_{D^*}^3 f_{D^*}^2}{m_{\tilde{d}_R^k}^4 \Gamma_0} \left| \tilde{\lambda}'_{12k} \tilde{\lambda}'_{11k} \right|^2$$

$$\left| \tilde{\lambda}'_{12k} \tilde{\lambda}'_{11k} \right| \leq 3.83 \times 10^{-3} \left[\frac{m_{\tilde{d}_R^k}}{300 \text{ GeV}} \right]$$