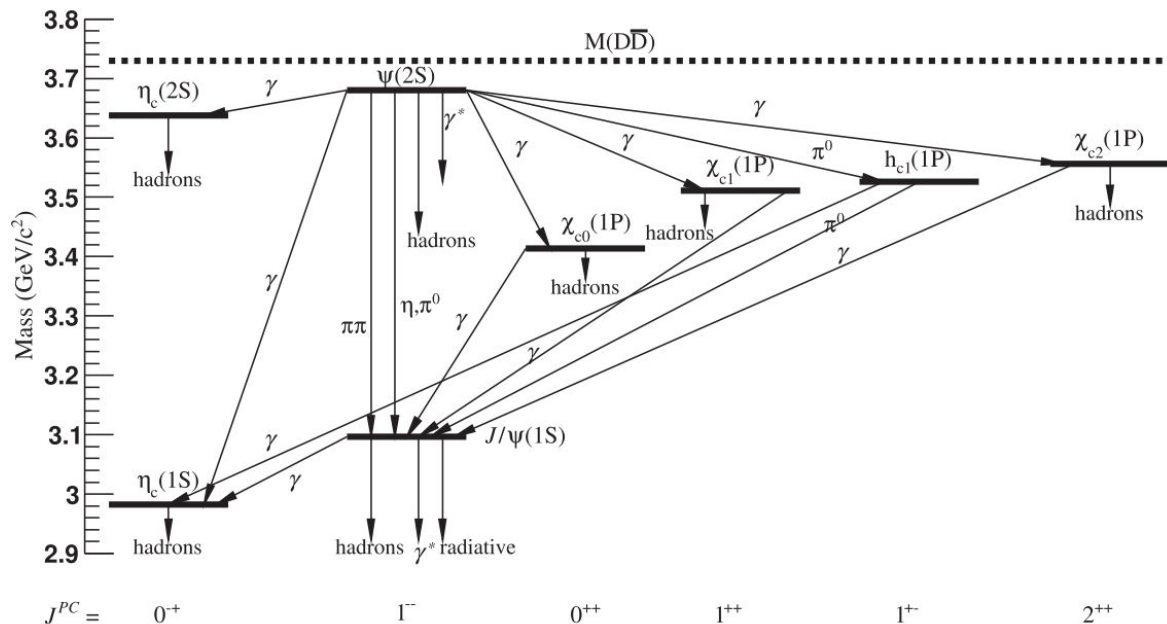


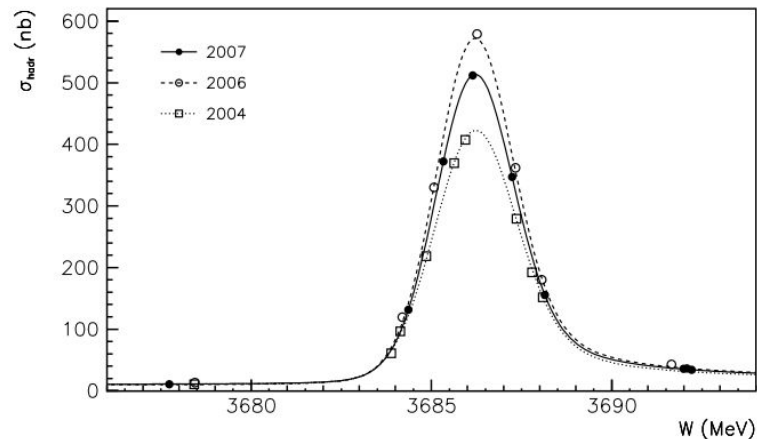
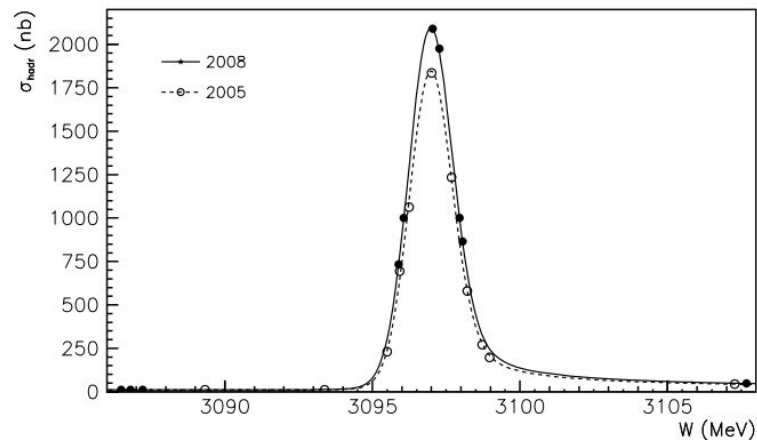
Физика чармония

Самые низколежащие и хорошо известные состояния чармония, расположенные ниже порога открытого очарования, могут быть использованы для точной проверки предсказаний, основанных на КХД и моделях, вдохновлённых КХД, в области, где играют роль как пертурбативные, так и непертурбативные аспекты. Определение внутренней структуры ранее установленных состояний чармония, измерение масс и ширин с высокой точностью, точное измерение переходов (как радиационных, так и адронных) между состояниями чармония и обнаружение новых мод распада могут предоставить уникальную и важную перспективу на динамику физики сильных взаимодействий.



Физика чармония

arXiv:2108.13029v2 [hep-ex] 9 Sep 2021



100×10^9 J/ ψ (год работы со светимостью 10^{34})
 20×10^9 $\psi(2S)$

Мода распада	Бранчинг	Число событий
$J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c(1S)$	$(1.41 \pm 0.14)\%$	10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c0}(1P)$	$(9.75 \pm 0.22)\%$	2×10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c1}(1P)$	$(9.75 \pm 0.27)\%$	2×10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \chi_{c2}(1P)$	$(9.38 \pm 0.23)\%$	2×10^9
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \eta_c(1S)$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	70×10^6
$\psi(2S) \rightarrow \gamma \eta_c(2S)$	$(5.4 \pm 3.4) \times 10^{-4}$	10×10^6
$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c(1P)$	$(7.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	15×10^6
$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c(1P)$	(50 ± 10) pb	5×10^6

$\eta_c(1S, 2S)$

- параметры резонанса
 - сверхтонкое расщепление масс кваркониев $\Delta M(1S) = M(J/\psi) - M(\eta_c(1S))$
- распады в пару векторных мезонов и пару барион-антибарион
 - большие бранчинги, несмотря на подавление по спиральности
- распады в легкие адроны
 - поиск псевдоскалярного глюбола
- распады в два фотона
 - оценка α_s

$$\frac{\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow \gamma\gamma)}{\Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{4}{3} \left[1 + 1.96 \frac{\alpha_s(m_c^2)}{\pi} \right]$$

$$\frac{\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow gg)}{\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow \gamma\gamma)} = \frac{9[\alpha_s(m_c^2)]^2}{8\alpha^2} \left[1 + 8.2 \frac{\alpha_s(m_c^2)}{\pi} \right]$$
- распады, запрещенные по CP (птп) и изоспину (птпт)
 - поиск Новой физики
 - SU(2) симметрия

$h_c(1P)$

- параметры резонанса
 - сверхтонкое расщепление масс кваркониев (1P)
$$\Delta M_{hf}(1P) \equiv \langle M(1^3P) \rangle - M(1^1P_1)$$

$$\langle M(1^3P_J) \rangle = [M(\chi_{c0}) + 3M(\chi_{c1}) + 5M(\chi_{c2})]/9$$
- распады в $\gamma\eta^{(')}$
 - SU(3) симметрия
 - угол смешивания η и $\eta^{(')}$

$$\frac{\Gamma(\psi \rightarrow \gamma\eta')}{\Gamma(\psi \rightarrow \gamma\eta)} = \left(\frac{k_{\eta'}}{k_{\eta}}\right)^3 \frac{1}{\tan^2\theta}$$
- распады в легкие адроны
 - отношения ширин

Assuming that

$$\frac{\Gamma(h_c(1P) \rightarrow h)}{\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow h)} \approx \frac{\Gamma(h_c(1P) \rightarrow 3g)}{\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow 2g)}, \quad (12)$$

and taking into account of

$$\frac{\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow 2g)}{\Gamma(J/\psi(1S) \rightarrow 3g)} = \frac{27}{5(\pi^2 - 9)\alpha_s} \left(\frac{M_{J/\psi(1S)}^2}{M_{\eta_c(1S)}^2} \right), \quad (13)$$

$\Gamma(h_c(1P) \rightarrow h)/\Gamma(\eta_c(1S) \rightarrow h)$ is calculated to be 0.010 ± 0.001 in PQCD, while 0.083 ± 0.018 in NRQCD,

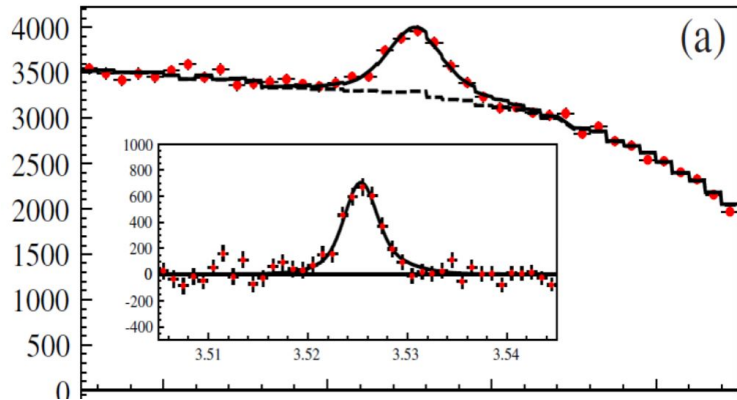
Физика чармония

arXiv:2108.13029v2 [hep-ex] 9 Sep 2021

Механизмы рождения h_c

$$\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c(1P)$$

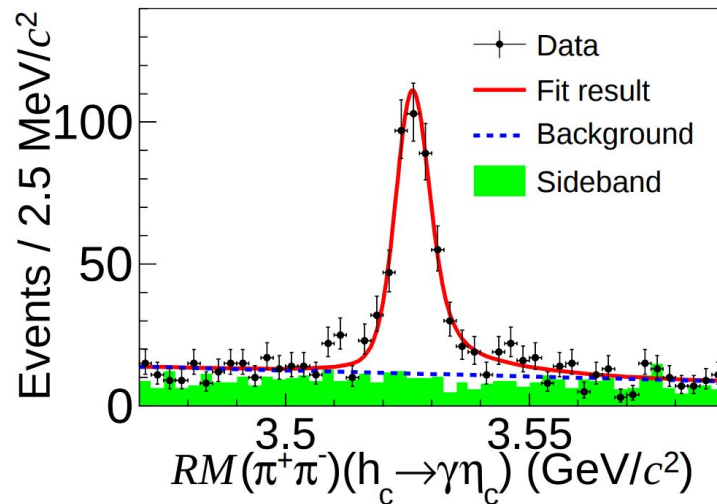
- большая статистика ($15 \times 10^6 h_c$ за год работы)
- ниже эфф-ть рег-ции (реконструкция π^0)
- высокий фон



The π^0 recoil-mass spectrum and fit for the $E1$ -tagged analysis of $\psi(2S) \rightarrow \pi^0 h_c(1P)$, $h_c(1P) \rightarrow \gamma \eta_c(1S)$. (b) The

$$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c(1P)$$

- меньшая статистика ($5 \times 10^6 h_c$ за год работы)
- выше эфф-ть рег-ции (заряженные $\pi^\pm$)
- низкий фон
- непосредственное измерение числа частиц $h_c(1P)$



Физика чармония

arXiv:2108.13029v2 [hep-ex] 9 Sep 2021

Куда распадается $h_c(1P)$?

$h_c(1P)$ DECAY MODES

Mode		Fraction (Γ_i / Γ)	Scale Factor/ Conf. Level	P(MeV/c)					
Γ_1	$J/\psi(1S)\pi^0$	$< 5 \times 10^{-4}$	CL=90%	382	▼	Γ_{14}	$2 \pi^+ 2 \pi^- \pi^0$	$(9.4 \pm 1.7) \times 10^{-3}$	1716 ▼
Γ_2	$J/\psi(1S)\pi\pi$	$< 9 \times 10^{-5}$	CL=90%	312	▼	Γ_{15}	$2 \pi^+ 2 \pi^- \eta$	$< 6 \times 10^{-4}$ CL=90%	1674 ▼
Γ_3	$J/\psi(1S)\pi^+\pi^-$	$< 9 \times 10^{-4}$	CL=90%	305	▼	Γ_{16}	$3 \pi^+ 3 \pi^- \pi^0$	$(9.1 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	1661 ▼
Γ_4	$p\bar{p}$	$< 4 \times 10^{-5}$	CL=90%	1492	▼	Γ_{17}	$2 \pi^+ 2 \pi^- \omega$	$(3.9 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	1627 ▼
Γ_5	$p\bar{p}\pi^0$	$< 8 \times 10^{-4}$	CL=90%	1447	▼	Γ_{18}	$K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	$< 7 \times 10^{-4}$ CL=90%	1640 ▼
Γ_6	$p\bar{p}\pi^+\pi^-$	$(3.3 \pm 0.6) \times 10^{-3}$		1390	▼	Γ_{19}	$K^+ K^- \pi^+ \pi^- \pi^0$	$(3.8 \pm 0.8) \times 10^{-3}$	1606 ▼
Γ_7	$p\bar{p}\pi^0\pi^0$	$< 6 \times 10^{-4}$	CL=90%	1394	▼	Γ_{20}	$K^+ K^- \pi^+ \pi^- \eta$	$< 2.7 \times 10^{-3}$ CL=90%	1480 ▼
Γ_8	$p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	$(4.4 \pm 1.3) \times 10^{-3}$		1331	▼	Γ_{21}	$K^+ K^- \pi^0$	$(3.8 \pm 0.9) \times 10^{-4}$	1670 ▼
Γ_9	$p\bar{p}\eta$	$(7.4 \pm 2.2) \times 10^{-4}$		1264	▼	Γ_{22}	$K^+ K^- \pi^0 \eta$	$< 2.4 \times 10^{-3}$ CL=90%	1532 ▼
Γ_{10}	$\pi^+\pi^-\pi^0$	$(1.57 \pm 0.13) \times 10^{-3}$		1749	▼	Γ_{23}	$K^+ K^- \eta$	$(3.6 \pm 1.2) \times 10^{-4}$	1574 ▼
Γ_{11}	$\pi^+\pi^-\eta$	$< 5 \times 10^{-4}$	CL=90%	1709	▼	Γ_{24}	$2 K^+ 2 K^- \pi^0$	$< 2.8 \times 10^{-4}$ CL=90%	1339 ▼
Γ_{12}	$\pi^+\pi^-\pi^0\eta$	$(8.3 \pm 2.4) \times 10^{-3}$		1695	▼	Γ_{25}	$K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$(7.1 \pm 1.9) \times 10^{-4}$	1668 ▼
Γ_{13}	$2 \pi^+ 2 \pi^- \pi^0 \eta$	$(7.2 \pm 1.7) \times 10^{-3}$		1648	▼	Γ_{26}	$K_S^0 K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	$(3.2 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	1604 ▼

Редкие распады

- слабые полулептонные распады J/ψ и $\psi(2S)$ в $D_{(s)}^* l \nu$
 - предсказание СМ: $10^{-9} \text{ — } 10^{-11}$
 - перспектива: первое наблюдение
 - как измерить: тагирование лептоном (0.5 - 1 ГэВ), $M_{\text{mis}}=0$, реконструкция $D_{(s)}$, а также мягких π^0 (90 - 200 МэВ) и γ
 - что еще измерить (сократив теор. ошибки):

$$R_{s/d} = \frac{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s^- l^+ \nu)}{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D^- l^+ \nu)} = 18.4 \text{ из SU(3) / } 24.7 \text{ из правил сумм КХД}$$

$$R_{s/d}^* = \frac{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s^{*-} l^+ \nu)}{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D^{*-} l^+ \nu)} = 18.4 \text{ из SU(3) / } 15.1 \text{ из правил сумм КХД}$$

$$R_{V/P} = \frac{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s^{*-} l^+ \nu)}{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s^- l^+ \nu)} = 1.6 \text{ из HQSS / } 3.1 \text{ из правил сумм КХД}$$

- слабые полулептонные распады J/ψ и $\psi(2S)$ в $D_{(s)}^* l^+ l^-$
 - предсказание СМ (FCNC): $10^{-13} \text{ — } 10^{-14}$
 - перспектива: вклад НФ
- слабые двухчастичные распады J/ψ и $\psi(2S)$
 - предсказание СМ: $10^{-8} \text{ — } 10^{-13}$
 - перспектива: первое наблюдение и/или вклад НФ
 - что еще измерить:

$$\frac{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s K)}{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s \pi)} \approx \frac{|V_{us} f_K|^2}{|V_{ud} f_\pi|^2} \approx 0.081 \quad \frac{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s \rho)}{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s \pi)} = 6.3$$

$$r = \frac{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s^{*+} \pi^-)}{\mathcal{BR}(J/\psi \rightarrow D_s^+ \pi^-)} \cong \left[\frac{d\Gamma(J/\psi \rightarrow D_s^{*+} l^- \nu)/dq^2}{d\Gamma(J/\psi \rightarrow D_s^+ l^- \nu)/dq^2} \right]_{q^2=m_\pi^2} = 7.5 \text{ из факторизации}$$

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

J/ψ

$D^0 e^+ e^- + \text{c.c.}$	$< 1.4 \times 10^{-7}$
$A_c^+ \bar{\Sigma}^- + \text{c.c.}$	$< 1.4 \times 10^{-5}$

ψ(2S)

Инклюзивный канал $\psi(nS) \rightarrow D_{(s)}^* X$

Редкие распады

- невидимые распады J/ψ и других чармониев
 - предсказание СМ $\sim 3 \times 10^{-8}$:
$$\frac{\Gamma(J/\psi \rightarrow \nu \bar{\nu})}{\Gamma(J/\psi \rightarrow e^+ e^-)} = \frac{27 G^2 M_{J/\psi}^4}{256 \pi^2 \alpha^2} \left(1 - \frac{8}{3} \sin^2 \theta_w\right)^2 = 4.54 \times 10^{-7},$$
 - вклад НФ: легкая темная материя, нейтрино, константа связи U бозона с с кварком
 - как измерить: тагирование с помощью каскадных распадов J/ψ и ψ(2S)

100×10⁹ J/ψ (год работы со светимостью 10³⁴)
20×10⁹ ψ(2S)

cc → invisible

Мода рождения	Бранчинг	Число событий	Верхний предел на невидимые распады cc
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$	$(34.69 \pm 0.34)\%$	7×10^9	7×10^{-4}
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^0 \pi^0$	$(18.2 \pm 0.5)\%$	4×10^9	7×10^{-4}
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \eta$	$(3.37 \pm 0.06)\%$	700×10^6	7×10^{-4}
$\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^0$	$(1.268 \pm 0.032) \times 10^{-3}$	25×10^6	7×10^{-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	-
$\psi(2S) \rightarrow \eta_c \gamma$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	70×10^6	-
$J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma$	$(1.41 \pm 0.14)\%$	10^9	-

Редкие распады

- невидимые распады $\eta, \eta', \rho, \omega, \phi$
 - предсказание СМ: подавление по спиральности
 - $B(\pi^0 \rightarrow \nu_\tau \nu_\tau) = 5.0 \times 10^{-10}$
 - $B(\eta \rightarrow \nu_\tau \nu_\tau) = 1.3 \times 10^{-11} \quad (m(\nu_\tau) = 18.2 \text{ МэВ})$
 - вклад НФ: легкая темная материя, нейтрино и т.д.
 - как измерить: тагирование с помощью каскадных распадов $J/\psi, P_{\text{mis}}$
 - $\phi \rightarrow K^+ K^-$
 - $\eta \rightarrow \gamma \gamma$
 - $\eta' \rightarrow \gamma \rho^0$
 - $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$
 - $\rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$

- распады с CP нарушением $\psi(nS) \rightarrow V^0 V^0$
 - только через аннигиляцию в Z^0 или обмен W
- распады с нарушением лептонного аромата $\psi(nS) \rightarrow l l'$
 - подавление $\sim 10^{-48}$ по величине масс ν

недоступно?

$P/V \rightarrow \text{invisible}$

Мода рождения	Бранчинг	Число событий $P/V \rightarrow \text{invisible}$ (с учетом бранчингов промежуточных частиц)	Верхний предел на невидимые распады
$J/\psi \rightarrow \phi \eta$	$(7.4 \pm 0.6) \times 10^{-4}$	$\phi: 30 \times 10^6$ $\eta: 40 \times 10^6$	$\phi: < 1.7 \times 10^{-4}$ $\eta: < 1.0 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \phi \eta'$	$(4.6 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	$\phi: 10 \times 10^6$ $\eta': 20 \times 10^6$	$\phi: < 1.7 \times 10^{-4}$ $\eta': < 2.1 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \omega \eta$	$(1.74 \pm 0.20) \times 10^{-3}$	$\omega: 70 \times 10^6$ $\eta: 90 \times 10^6$	$\omega: < 7 \times 10^{-5}$ $\eta: < 1.0 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \omega \eta'$	$(1.89 \pm 0.18) \times 10^{-4}$	$\omega: 10 \times 10^6$ $\eta': 20 \times 10^6$	$\omega: < 7 \times 10^{-5}$ $\eta': < 2.1 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \rho^0 \eta$	$(1.93 \pm 0.23) \times 10^{-4}$	$\rho^0: 10 \times 10^6$ $\eta: 20 \times 10^6$	$\rho^0: -$ $\eta: < 1.0 \times 10^{-4}$
$J/\psi \rightarrow \rho^0 \pi^0$	$(6.2 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	$\rho^0: 610 \times 10^6$ $\pi^0: 620 \times 10^6$	$\rho^0: -$ $\pi^0: < 4.4 \times 10^{-9}$

Источники по $\eta_c(1S,2S)$ и $h_c(1P)$

An overview of $\eta_c(1S)$, $\eta_c(2S)$ and $h_c(1P)$ physics at BESIII

Qingping Ji^{a*}

Henan Normal University, Xinxiang 453007, China

Shuangshi Fang^{b†} and Zhiyong Wang^{b‡}

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

(Dated: September 14, 2021)

With the help of the largest data samples of J/ψ and $\psi(2S)$ events ever produced in e^+e^- annihilations, the three singlet charmonium states, $\eta_c(1S)$, $\eta_c(2S)$ and $h_c(1P)$, have been extensively studied at the BESIII experiment. In this review, a survey on the most recent results, including a series of precision measurements and observations of their new decay modes, is presented, which indicates the further investigations on their decays are needed to understand their decay mechanisms and have precision tests of the theoretical models. At present, about eight times larger data samples of 10 billion J/ψ events and 3 billion $\psi(3686)$ events were collected with the BESIII detector, and thus the prospects for the study of these three charmonium states is discussed extensively.

PACS numbers: 13.20.Pq, 13.25.Gv, 12.38.Qk

Mini-review of rare charmonium decays at BESIII^{*}

LI Hai-Bo(李海波)¹⁾ ZHU Shi-Hai(朱世海)²⁾

Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Recently, the LHCb experiment announced 3.5σ evidence for direct CP violation in D^0 decay by looking at the difference between $A_{CP}(D^0 \rightarrow K^+K^-)$ and $A_{CP}(D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-)$. This is the first evidence of CP violation in a charm system, which may indicate new physics beyond the Standard Model. Motivated by this measurement, we review rare processes in charmonium decay, especially, the weak decay, C or P violated decay, and lepton flavor violated decays. In case the new physics appears in charm sector, these rare decays of charmonium states will provide an opportunity to search for significant contributions from physics beyond the Standard Model. With huge J/ψ and $\psi(2S)$ samples in BESIII experiment, the rare decays may be feasible.

Key words: BESIII, charmonium, weak decay, new physics, lepton flavor violation

PACS: 13.25.Gv, 13.20.Gd, 14.40.Pq **DOI:** 10.1088/1674-1137/36/10/003