

# Изоспиновая симметрия в микромире

Евгений Козырев  
2016

Conservation Quantity or Symmetry	STRONG	EL-MAG	WEAK
INTERACTION			
mass/energy	+	+	+
momentum, angular momentum			
charge Q	+	+	+
isospin T	+	-	-
strangeness S			
charm C,...	+	+	-
beauty B, topness T			
parity P	+	+	-
charge conjugation C	+	+	-
baryon number B	+	+	+
lepton number(s)		+	+
hypercharge Y	+	+	-
time reversal T	+	+	-
CP	+	+	-
CPT	+	+	+

Сегодня поговорим об изоспине.

$$m_p = 938.27 \text{ МэВ}$$
$$m_n = 939.57 \text{ МэВ}$$

$$\Delta m/m \sim 10^{-3}$$

Гейзенберг (1932)



Протон и нейtron могут быть рассмотрены как зарядовые состояния одной частицы - нуклона.

Нуклон описывается квантовым числом, изоспином, сохраняющимся в сильных взаимодействиях, не сохраняющимся в электро-слабых взаимодействиях.

Изоспин нуклона  $I = \frac{1}{2}$

$$p \quad I_3 = + \frac{1}{2}$$

$$n \quad I_3 = - \frac{1}{2}$$

$$[H_s, I] = 0, \text{ однако } [H_{w, EM}, I] \neq 0$$

$$Q/e = \frac{1}{2} + I_3$$

Состояние нуклона может быть записано в виде  $|I, I_3\rangle$ :

$$|p\rangle = |\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\rangle$$

$$|n\rangle = |\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$$

для двух-нуклонных систем мы имеем

триплет  
(симметричный)

$$\begin{cases} \chi(1,1) = \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \\ \chi(1,0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle + \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \right) \\ \chi(1,-1) = \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \end{cases}$$

синглет  
(антисимметричный)

$$\chi(0,0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle - \left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle \left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle \right)$$

## Пример №1, дейtron - рп связанное состояние в S-волне:

Стабилен. Не имеет возбужденных состояний. Дейtron является очень слабосвязанным ядром, его энергия связи равна лишь 2,224 МэВ. Дейтроны постоянно образуются в природе при захвате тепловых нейтронов свободными протонами в водородсодержащих средах:  $p + n \rightarrow d + \gamma + 2,22 \text{ MeV}$

Однако большая часть всех дейtronов во Вселенной образовалась (в основном по этой же реакции) во время первичного нуклеосинтеза в первые несколько минут после Большого Взрыва.

$$\psi = \varphi(\text{пространств.}) \times \alpha(\text{спиновая}) \times \chi(\text{изоспиновая})$$

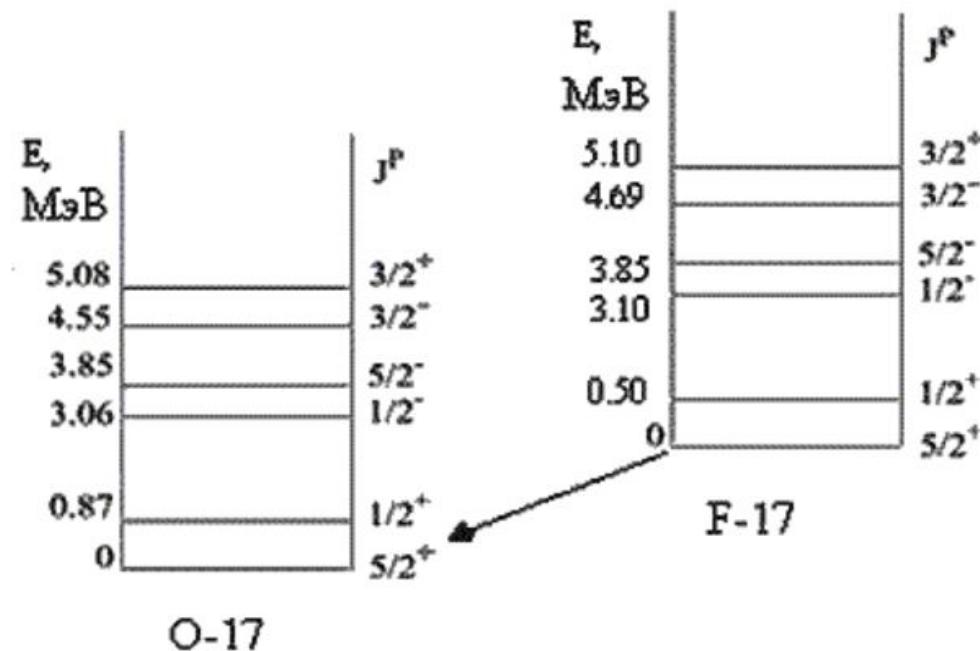
$$(-1)^l = +1 \quad (-1)^{S+1} = +1 \quad (-1)^{I+1}$$

$$(l = 0) \quad (S = 1)$$

$$(-1)^{I+1} = -1 \Rightarrow I = 0$$

полная волновая функция двух идентичных фермионов должна быть антисимметричной

Пример №2,

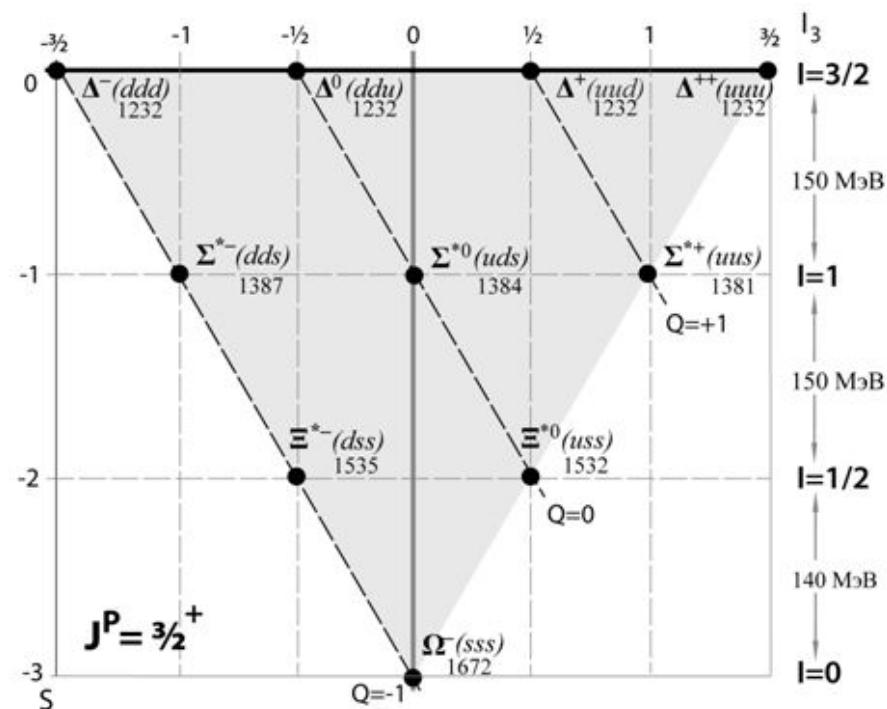


Спектры состояний ядер  $^{17}\text{O}$  и  $^{17}\text{F}$

В основе изоспиновая симметрии лежит представление о том, что  $u$ - и  $d$ -кварки являются одинаковыми частицами по отношению к сильному взаимодействию, имеющими значение изоспина  $I = 1/2$  и различающимися знаком проекции вектора изоспина  $I_3$  на ось  $Z$  декартового зарядового пространства.

$u(I = 1/2, I_3 = +1/2)$

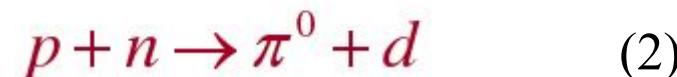
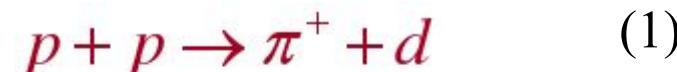
$d(I = 1/2, I_3 = -1/2)$



Барионный декуплет со спином  $J^P = 3/2^+$

## Пример №3

Рассмотрим две реакции:



Т.к.  $I_\pi = 1$ ,  $I_d = 0$ , то конечное состояние имеет изоспин  $I = 1$ .

Начальное состояние:

$$pp = |1,1\rangle$$

$$np = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1,0\rangle - |0,0\rangle)$$

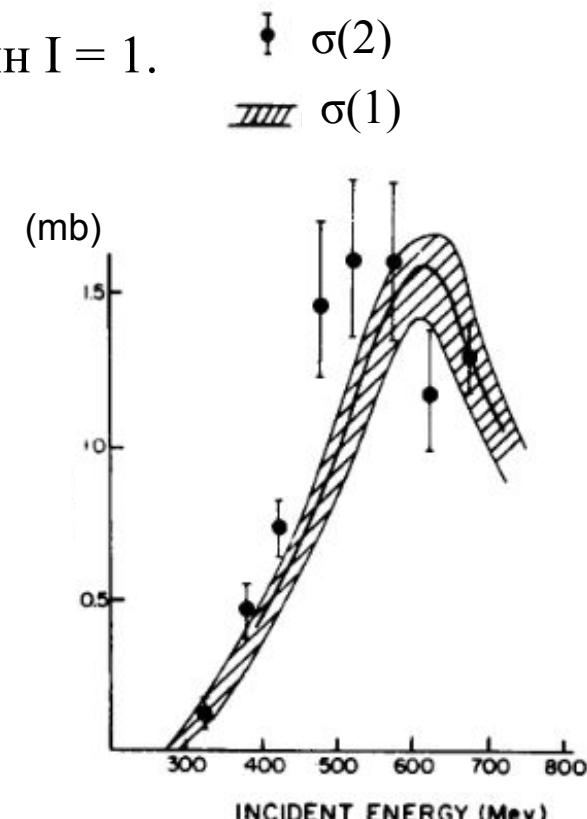
Сечения процессов:

$$\sigma \propto \sum_I |\langle I', I'_3 | A | I, I_3 \rangle|^2$$

$$\frac{\sigma(pp \rightarrow \pi^+ d)}{\sigma(np \rightarrow \pi^0 d)} = 2$$

$A_{fb}$  is only -0.36  
+0.66%

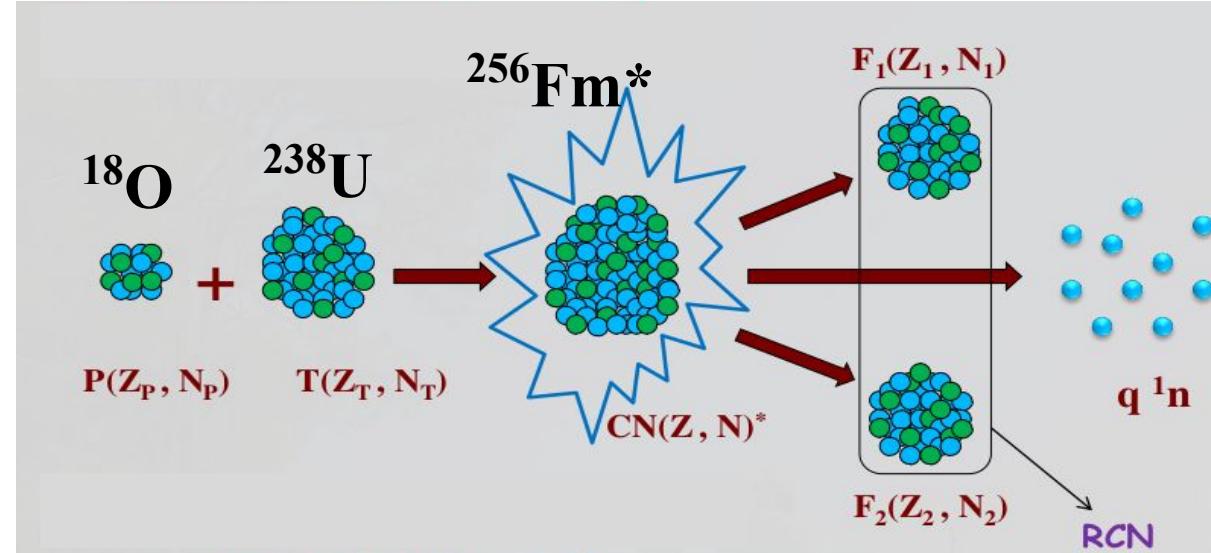
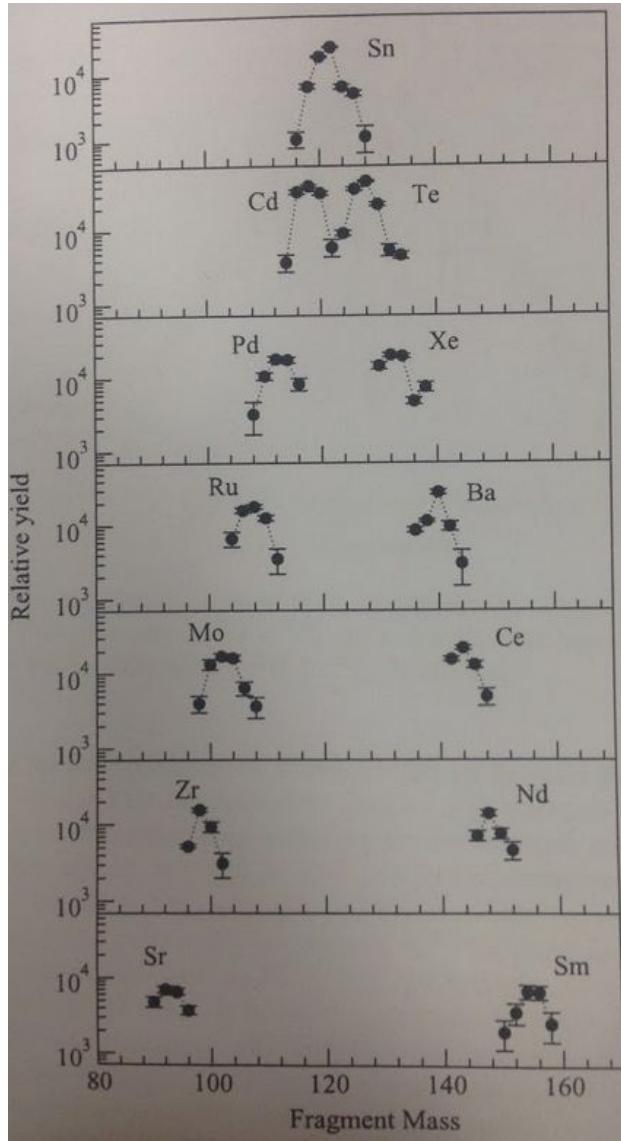
(Nuclear Physics B33 (1971) 253-280)



Сравнение  $\sigma(2)$  и  $\frac{1}{2} \sigma(1)$   
(USA, Lawrence Radiation  
Laboratory, 1971)

# Пример №4

## Тонкая структура фрагментов деления фермия



$$T_{3P} + T_{3T} = T_{3CN} = T_{3F_1} + T_{3F_2} + q/2$$

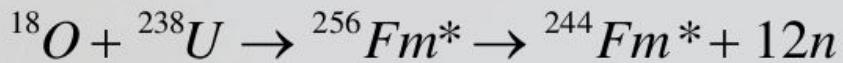
$$|T_{3CN} - (q/2)| \leq T_{3F_1} + T_{3F_2} \leq (T_{3CN} + (q/2))$$

$$\langle T, T_3 \rangle_{RCN} = \sum \langle CGC \rangle |T_{F_1}, T_{3_{F_1}} \rangle |T_{F_2}, T_{3_{F_2}} \rangle$$

$$\langle T_{F_1} T_{F_2} T_{3_{F_1}} T_{3_{F_2}} | T_{RCN} T_{3_{RCN}} \rangle$$

Распределение по фрагментам деления в результате реакции  $^{18}\text{O}$  (100 МэВ) +  $^{238}\text{U}$ .

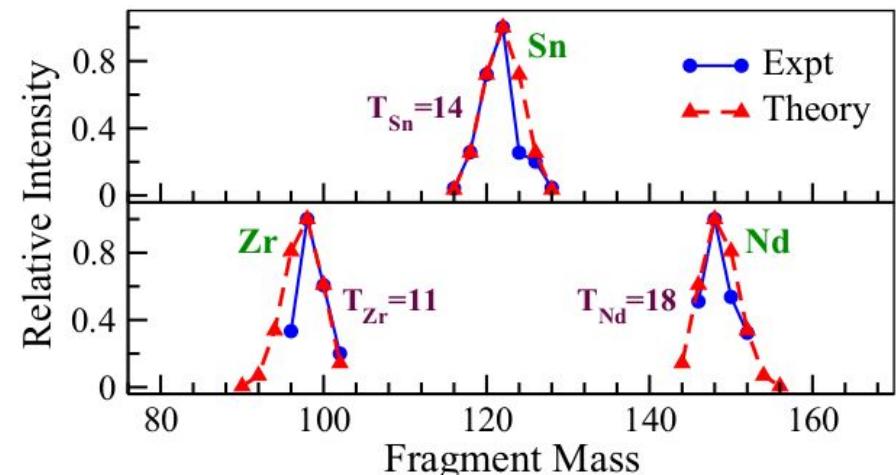
[Isospin conservation in heavy nuclei—evidence from fusion-fission reactions  
A. K. Jain]



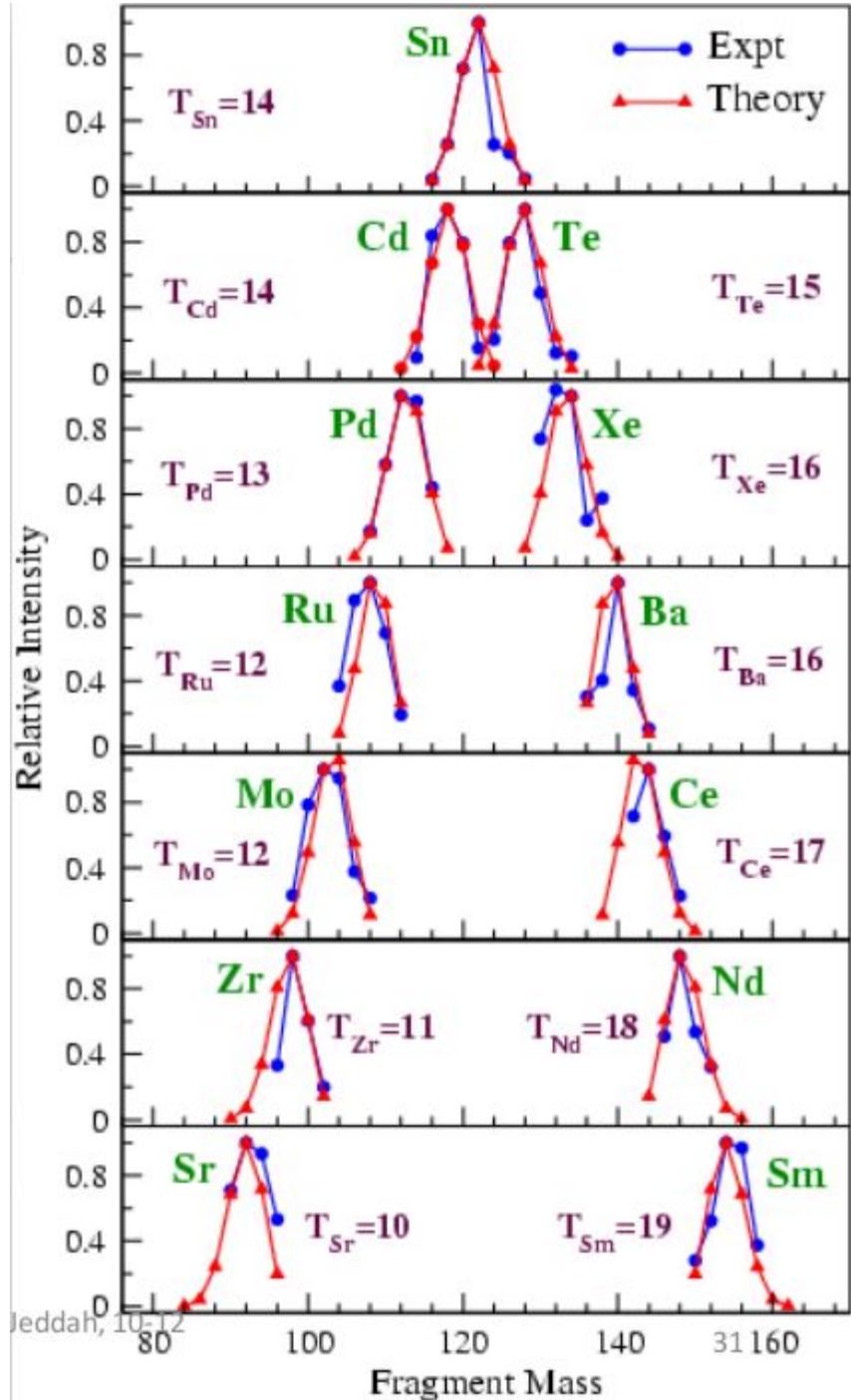
$T_3$ :	1	27	28	22	6
$T$ :	1	27	28	22 to 34	6
$T'_{Sn} + T''_{Sn}$					

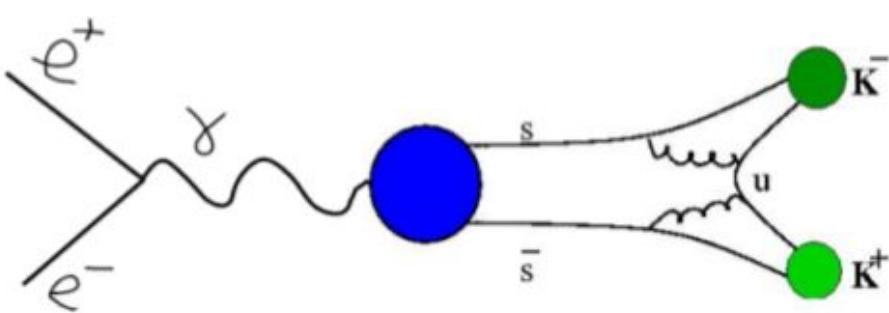
$$|28,22\rangle_{RCN} = \sum \langle 14, T', 14, T'' | 28, 22 \rangle |14, T'_3\rangle_{Sn} |14, T''_3\rangle_{Sn}$$

$$\begin{aligned}
 |28,22\rangle_{RCN} = & 0.108 |14,14\rangle_{^{128}Sn} |14,8\rangle_{^{116}Sn} \\
 & + 0.291 |14,13\rangle_{^{126}Sn} |14,9\rangle_{^{118}Sn} \\
 & + 0.488 |14,12\rangle_{^{124}Sn} |14,10\rangle_{^{120}Sn} \\
 & + 0.575 |14,11\rangle_{^{122}Sn} |14,11\rangle_{^{122}Sn} \\
 & + 0.488 |14,10\rangle_{^{120}Sn} |14,12\rangle_{^{124}Sn} \\
 & + 0.291 |14,9\rangle_{^{118}Sn} |14,13\rangle_{^{126}Sn} \\
 & + 0.108 |14,8\rangle_{^{116}Sn} |14,14\rangle_{^{128}Sn}
 \end{aligned}$$

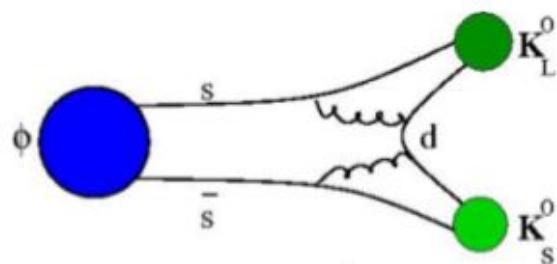


Сравнение измеренных относительных интенсивностей коррелированного рождения пар фрагментов с расчетом по изоспиновой симметрии [Danu et al. PRC 2010]





49.3 %



33.6 %

Изотопическая симметрия  $u$  и  $d$  кварков с поправкой на электромагнитное взаимодействие заряженных каонов предсказывает равенство  $\frac{g_{\phi K^+ K^-}}{\sqrt{Z(m_\phi)}} = g_{\phi K_S K_L}$ ,

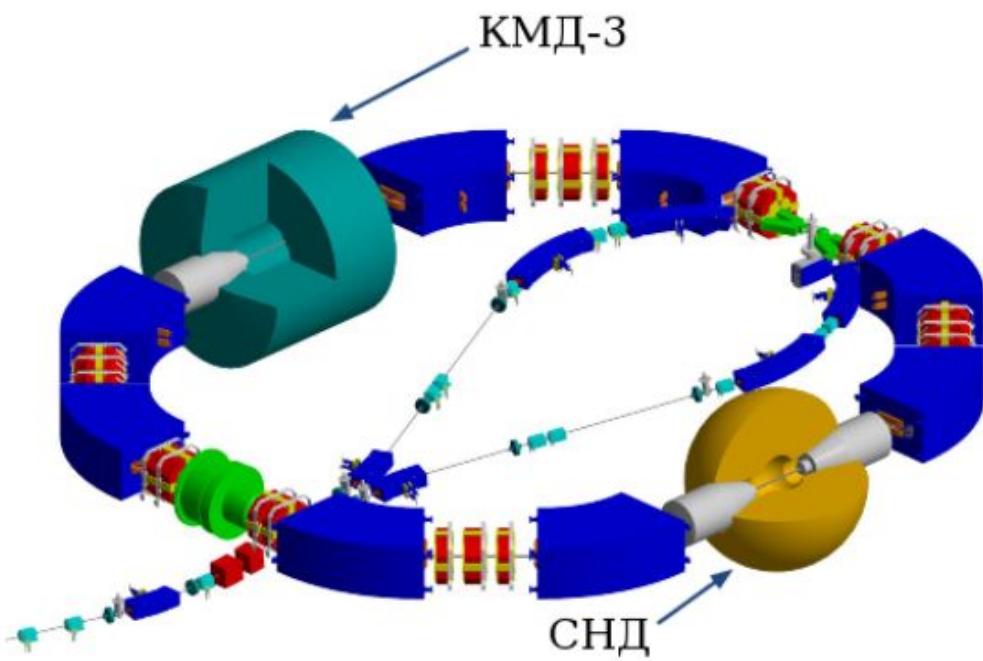
где  $Z(m_\phi) = \frac{\pi\alpha/\beta}{1-e^{-\pi\alpha/\beta}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{4\beta^2}\right) = 1.046$  - фактор, учитывающий кулоновское взаимодействие заряженных каонов.

**Из экспериментов:**  $R = \frac{g_{\phi K^+ K^-}}{g_{\phi K_S K_L} \sqrt{Z(m_\phi)}} = \sqrt{\frac{B(\phi \rightarrow K^+ K^-) p_{K_S K_L}^3}{B(\phi \rightarrow K_S K_L) p_{K^+ K^-}^3} \frac{1}{Z(m_\phi)}}$

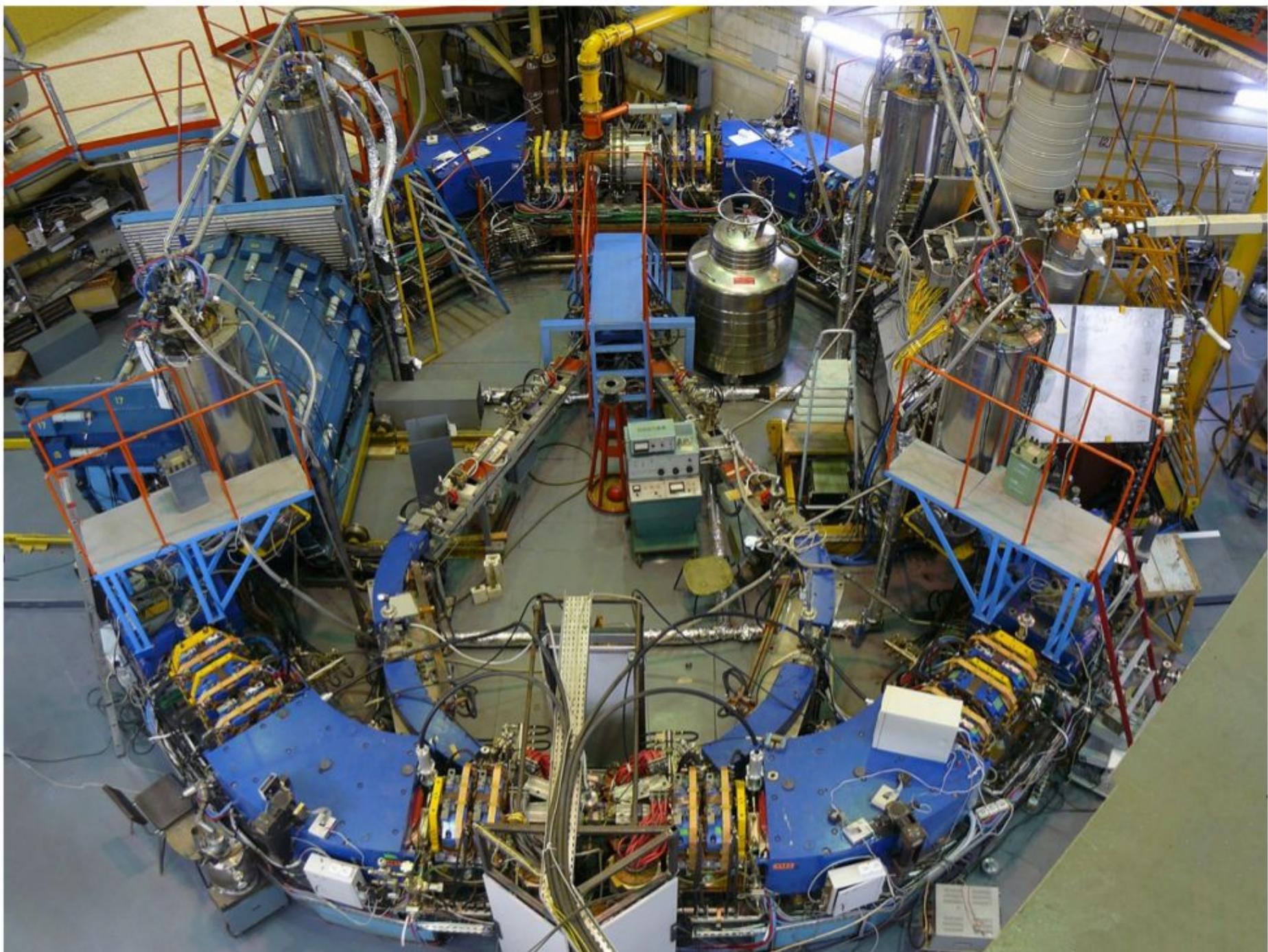
- $R_{SND} = 0.92 \pm 0.03 (2.6\sigma)$
- $R_{CMD-2} = 0.943 \pm 0.013 (4.4\sigma)$
- $R_{BaBar} = 0.972 \pm 0.017 (1.5\sigma)$

- $R_{BaBar}^{\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}} = 0.84 \pm 0.04 (4\sigma)$

В данной работе:



- $\sqrt{s} = 1.01 - 1.06 \text{ ГэВ}$
- $L \approx 6 \text{ pb}^{-1}$
- Разброс энергий в с.ц.м.  $\approx 300 \text{ кэВ}$
- Энергия измерена методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов с точностью  $\approx 30 \text{ кэВ}$
- Число зарегистрированных событий  $N_{K^+K^-} \approx 1.1 \text{ млн.}$ ,  $N_{K_SK_L} \approx 0.5 \text{ млн.}$



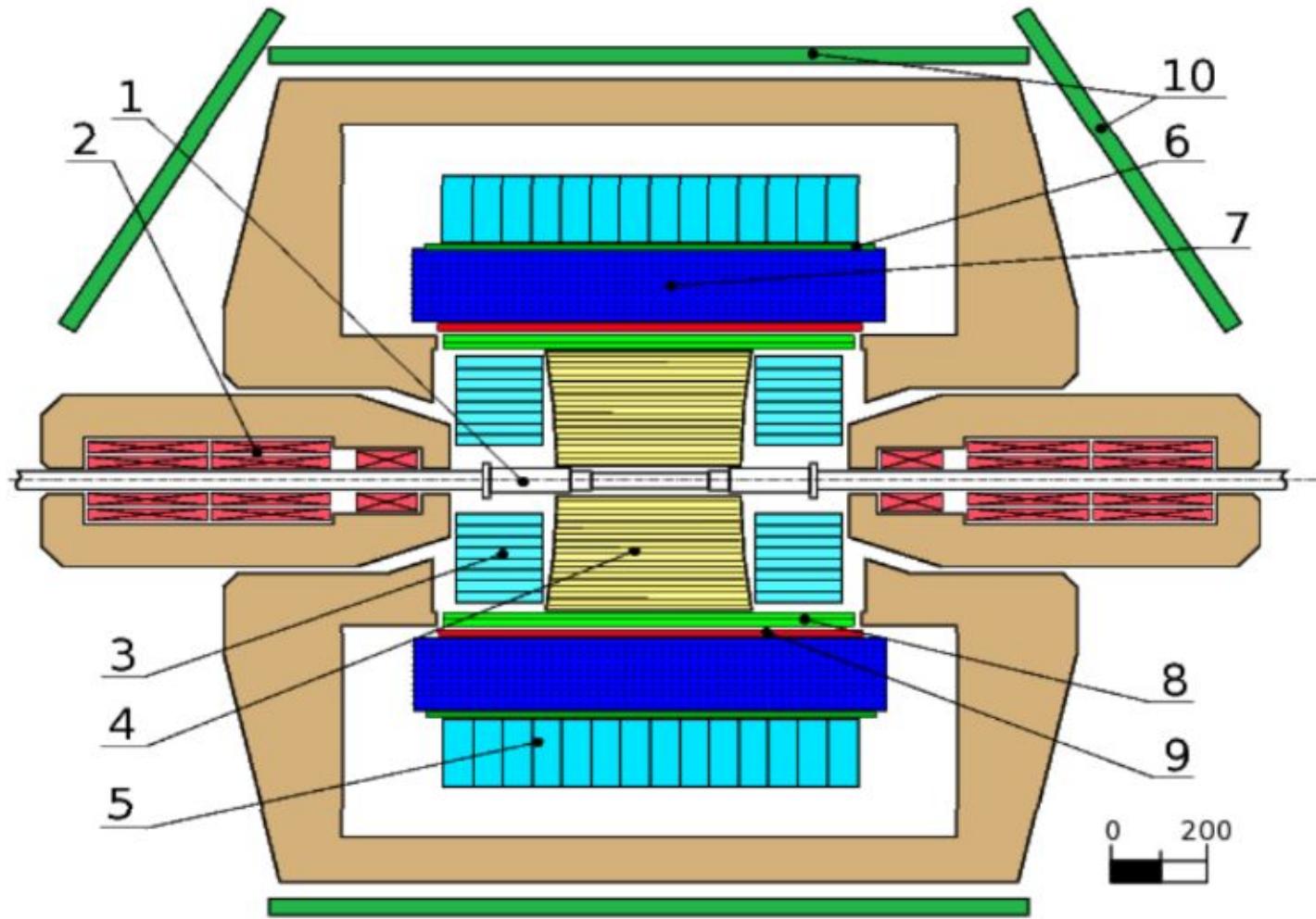
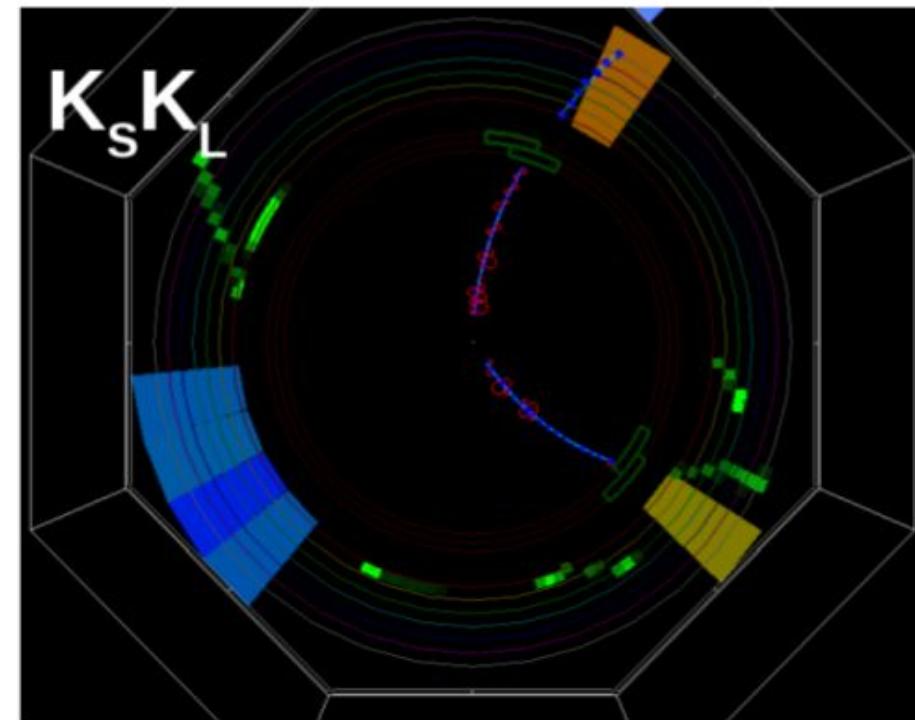
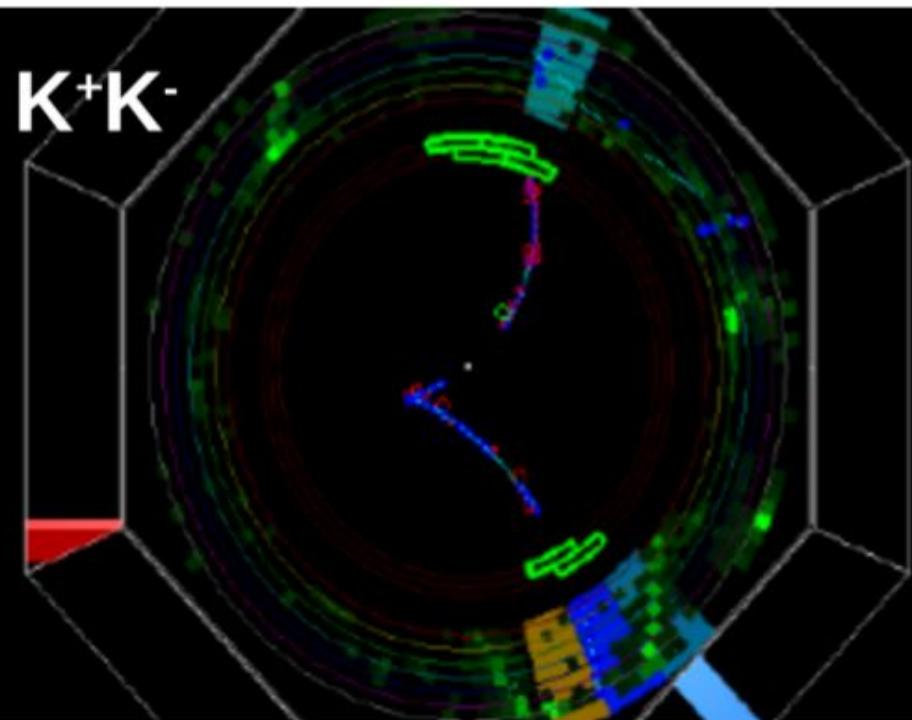
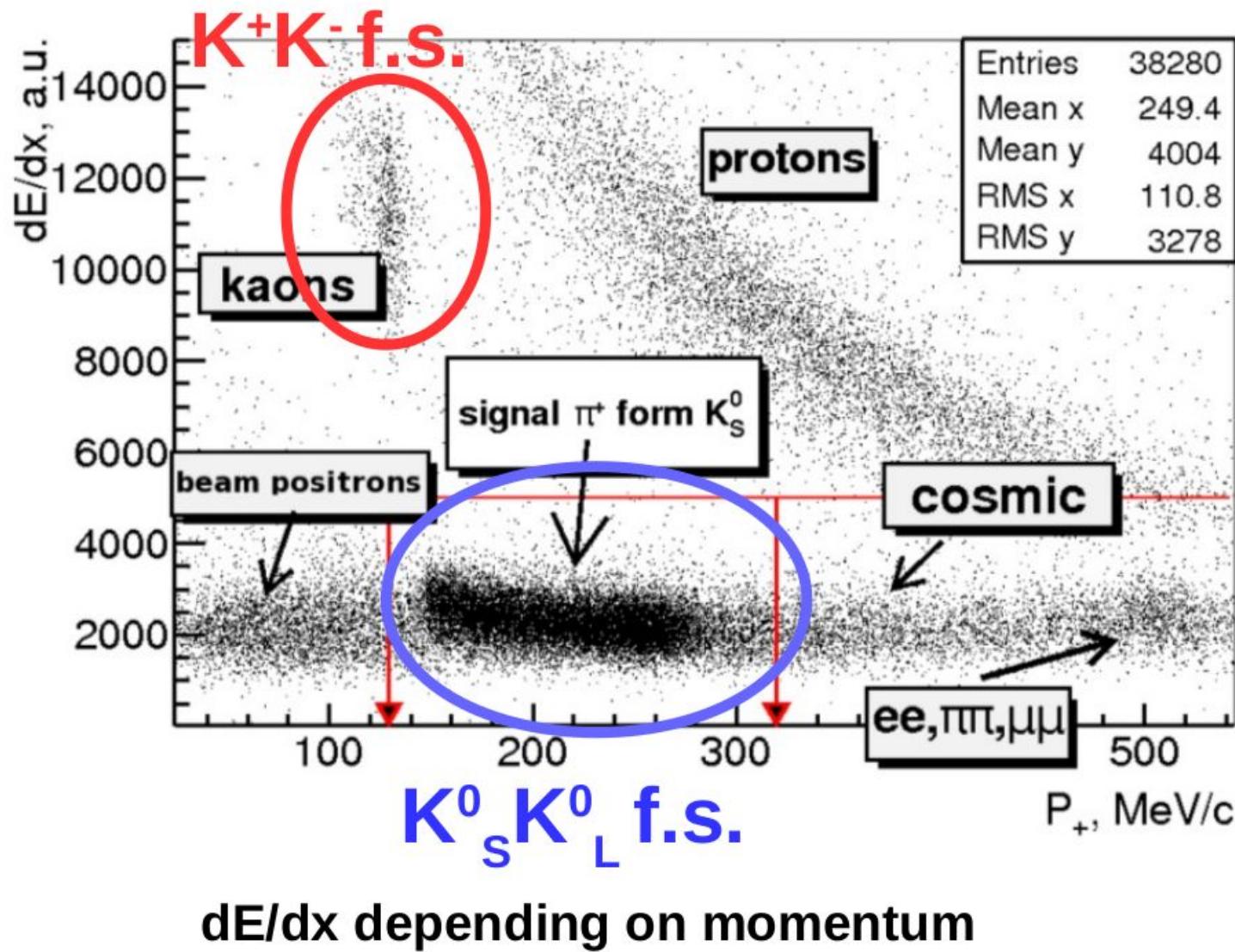


Рис.: 1 — вакуумная камера; 2 — сверхпроводящие фокусирующие соленоиды ВЭПП-2000; 3 — торцевой калориметр на основе кристаллов BGO; 4 — дрейфовая камера; 5 — калориметр на основе кристаллов CsI; 6 — время-пролетная счетчики; 7 — калориметр на основе жидкого ксенона; 8 — Z-камера; 9-сверхпроводящий соленоид; 10 — мюонная система.



Визуализация типичных событий

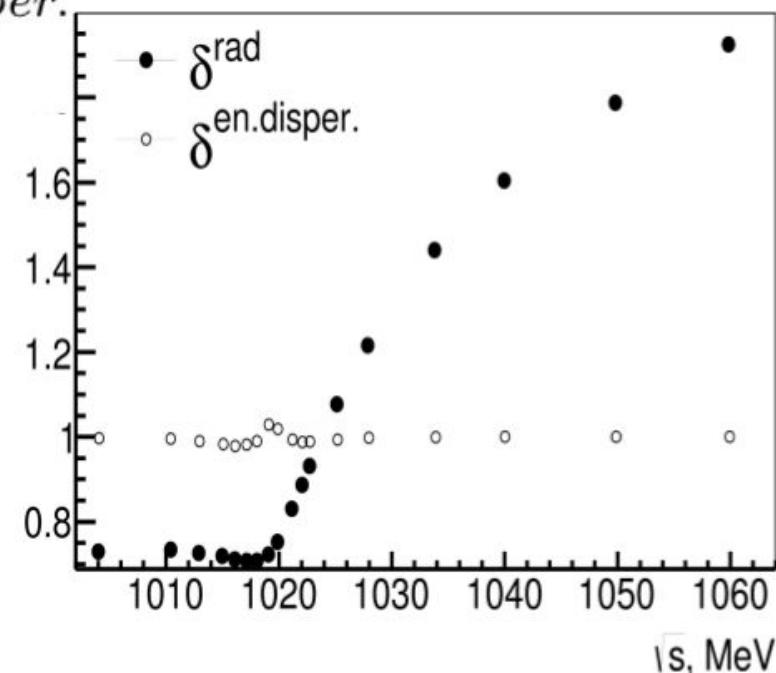
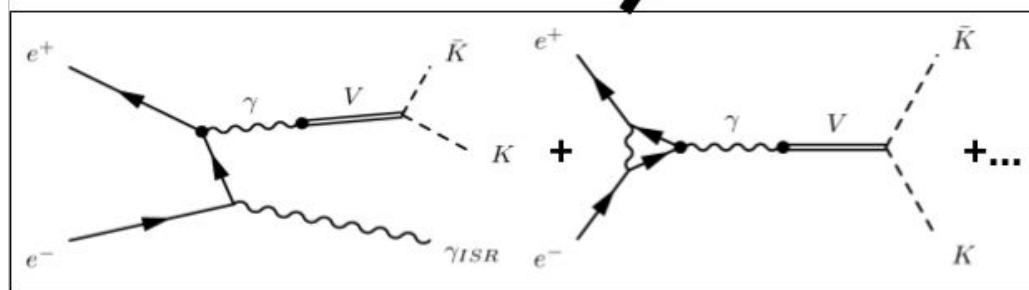
# Идентификация сигнала



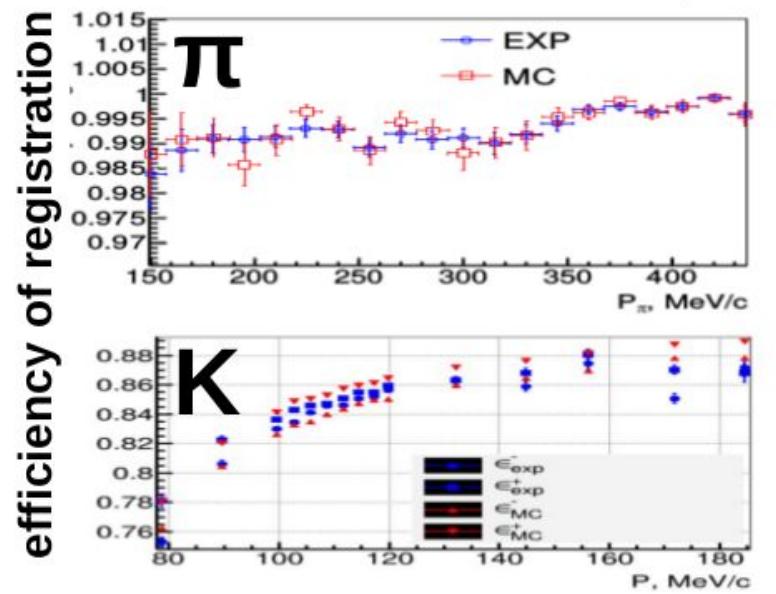
# Сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \text{KantiK}$

$$\sigma^{born} = \frac{N^{exp}}{\epsilon_{reg}\epsilon_{trig}L(1 + \delta_{rad})} \delta^{en.disper.}$$

$ee \rightarrow ee, ee \rightarrow \gamma\gamma$



source	systematic error, %
signal idenfication	1.5
efficiency of registration	0.7
radiative correction	0.5
energy dispersion correction	0.3
trigger efficiency	0.1
luminosity	1.5
<b>total</b>	<b>2.4</b>



# Сечения процесса $e^+e^- \rightarrow KantiK$

$$\sigma = \frac{8\pi\alpha}{3s^{5/2}} p^3 \left| \frac{g_{\phi\gamma} g_{\phi} \kappa \kappa}{D_{\phi}(s)} \pm \frac{c}{n} A_{\rho} + A_{\omega} + A \right|^2; g_{V\gamma} = \sqrt{\frac{3m_V^3 \Gamma_V B_{Vee}}{4\pi\alpha}}; g_{VKK} = \sqrt{\frac{6\pi m_V^2 \Gamma_V B_{VKK}}{p_K^3(m_V)}}$$

$$D_V(s) = m_V^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_V(s) \quad \sigma_{e^+e^- \rightarrow K\bar{K}} \equiv \sigma_{\phi} + \sigma_{NR}$$

$$J_{\mu}^{hadr} = \frac{1}{\sqrt{2}} J_{\mu}^{\rho} + \frac{1}{3\sqrt{2}} J_{\mu}^{\omega} - \frac{1}{3} J_{\mu}^{\phi} \rightarrow g_{\phi\gamma}^2 : g_{\omega\gamma}^2 : g_{\rho\gamma}^2 = 2 : 1 : 9 \quad EXP : 1.6 : 1 : 11.8$$

	$\mathbf{l}^3$	$\mathbf{Y}$	$\mathbf{B}$
u	1/2	1/3	1/3
d	-1/2	1/3	1/3
s	0	-2/3	1/3
$K^+$	1/2	1	0
$K^0$	-1/2	1	0

$$g_{\phi K^+ K^-} : g_{\omega K^+ K^-} : g_{\rho K^+ K^-} = -1 : 1/\sqrt{2} : 1/\sqrt{2}$$

$$g_{\phi K_S K_L} : g_{\omega K_S K_L} : g_{\rho K_S K_L} = -1 : 1/\sqrt{2} : -1/\sqrt{2}$$

$$J^{\rho} = \sqrt{2} J^3$$

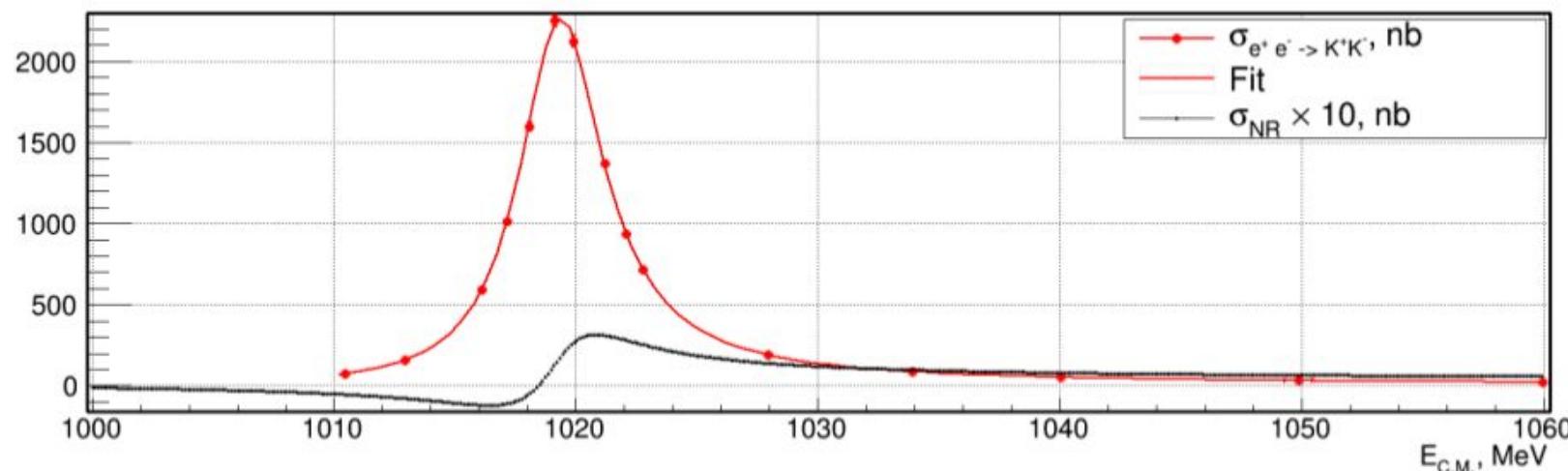
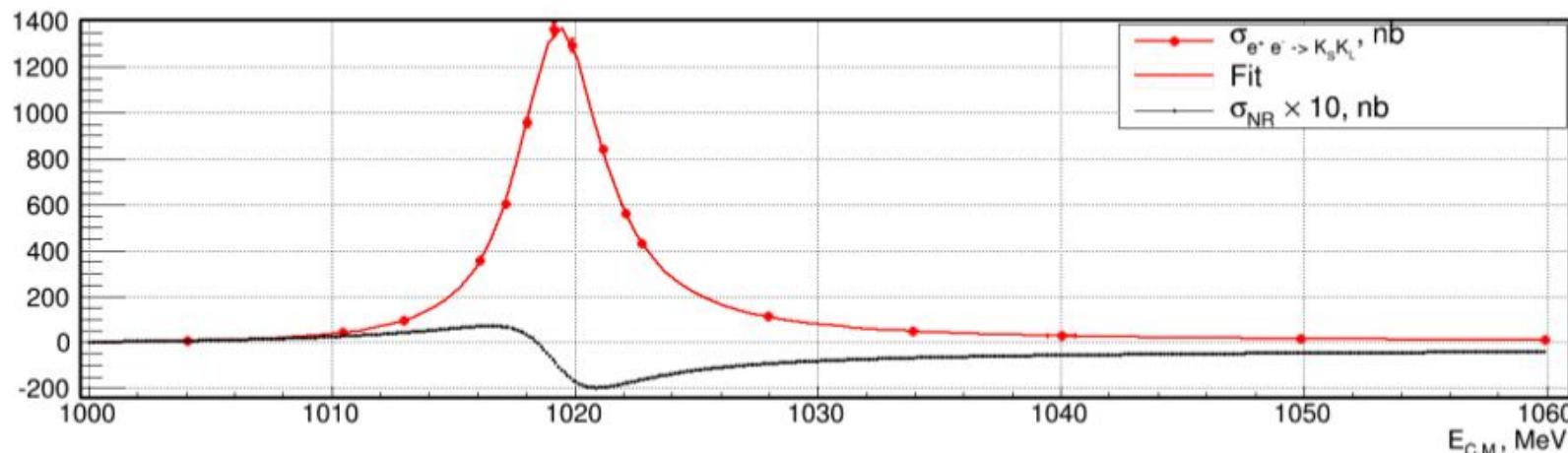
$$J^{\omega} = -\frac{1}{\sqrt{2}} J^Y + \sqrt{2} J^B$$

$$J^{\phi} = -J^Y + J^B$$

$$\sigma = \frac{8\pi\alpha}{3s^{5/2}} p^3 \left| \frac{g_{\phi\gamma} g_{\phi KK}}{D_\phi(s)} \pm \frac{c}{n} A_\rho + A_\omega + A \right|^2; g_{V\gamma} = \sqrt{\frac{3m_V^3 \Gamma_V B_{Vee}}{4\pi\alpha}}; g_{VKK} = \sqrt{\frac{6\pi m_V^2 \Gamma_V B_{VKK}}{p_K^3(m_V)}}$$

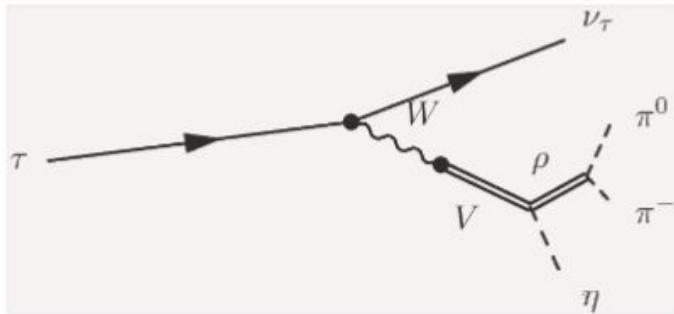
$$D_V(s) = m_V^2 - s - i\sqrt{s}\Gamma_V(s) \quad \sigma_{e^+e^- \rightarrow \kappa\bar{\kappa}} \equiv \sigma_\phi + \sigma_{NR}$$

Сечение в зависимости от энергии в с.ц.м.:

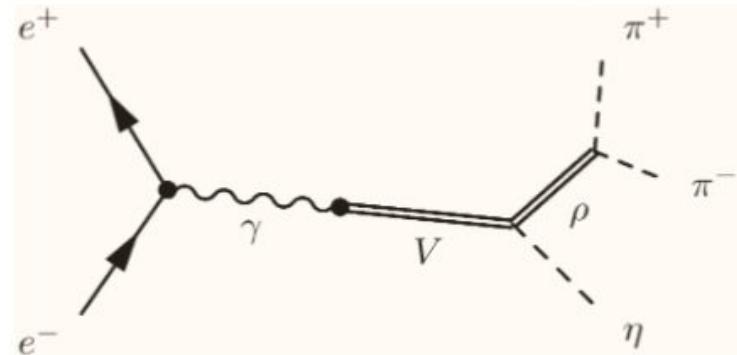


$$R = \frac{g_{\phi K^+ K^-}}{g_{\phi K_S K_L} \sqrt{Z(m_\phi)}} = \frac{R_{c/n}}{R_{phase\ space} \cdot R_{coulomb}} = 0.984 \pm 0.029$$

$$M_{\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau} \sim \langle \rho^- | \bar{d} \gamma_\mu u | 0 \rangle$$

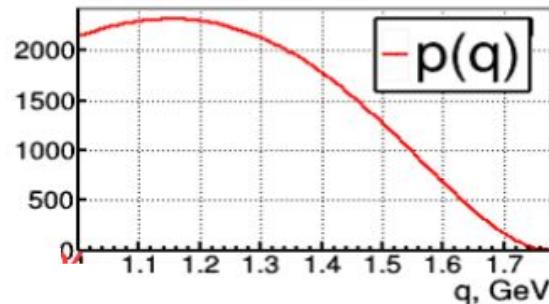


$$M_{e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta} \sim \langle \rho^0 | \frac{\bar{u} \gamma_\mu u - \bar{d} \gamma_\mu d}{\sqrt{2}} | 0 \rangle$$



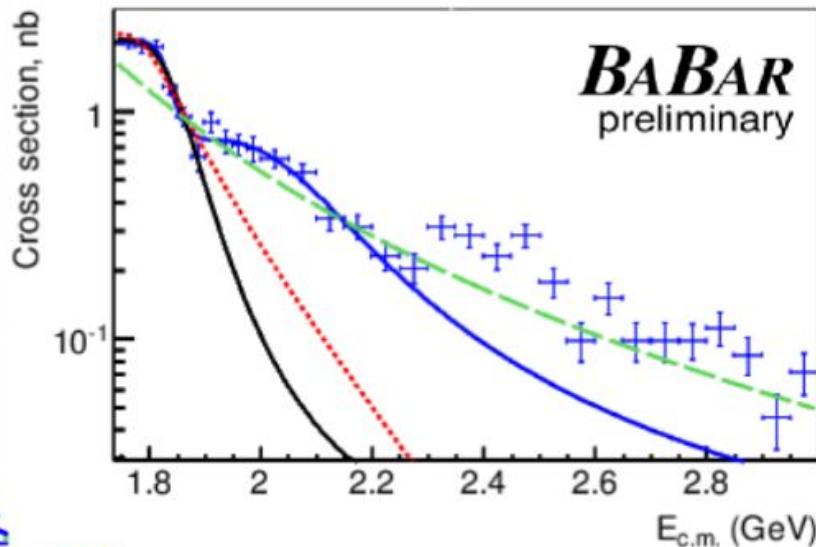
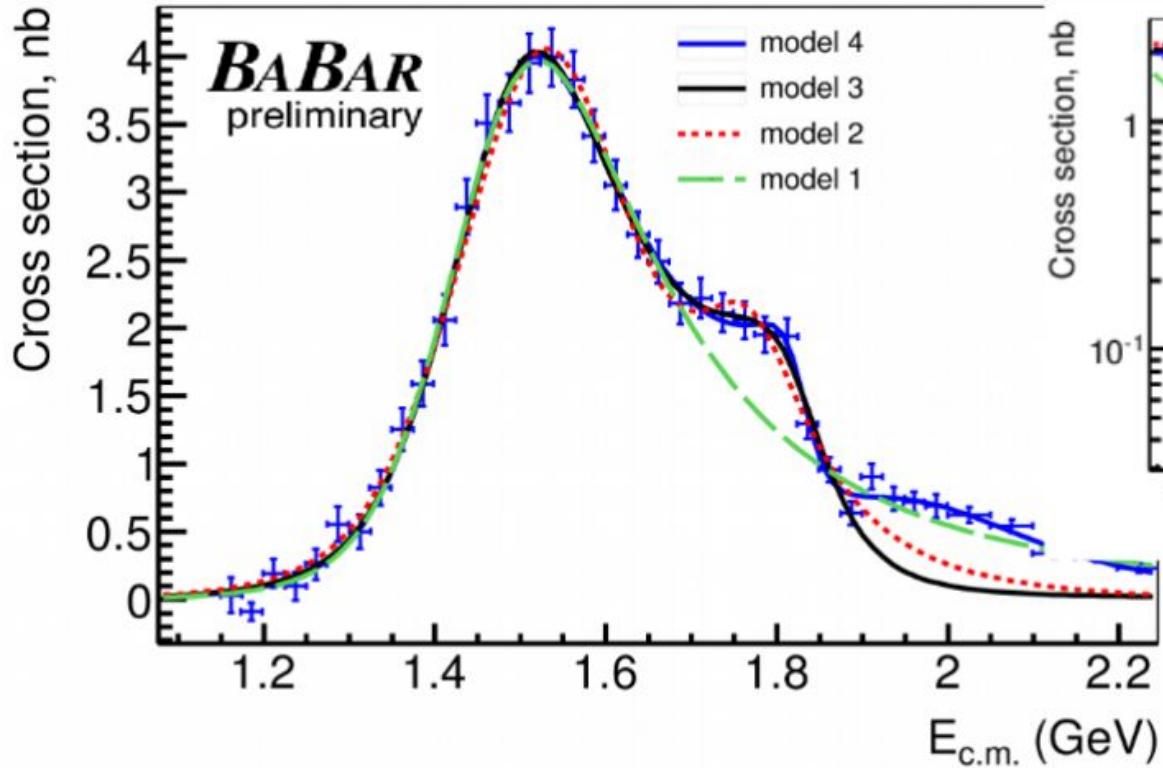
$$\frac{B(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau)}{B(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)} = \int_{(2m_\pi + m_\eta)^2}^{m_\tau^2} dq^2 \sigma_{e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \eta}^{I=1}(q^2) \frac{3|V_{ud}|^2 S_{EW}}{2\pi\alpha^2} \frac{q^2}{m_\tau^2} \left(1 - \frac{q^2}{m_\tau^2}\right)^2 \left(1 + 2\frac{q^2}{m_\tau^2}\right)$$

$$\delta\left(\frac{B(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau)}{B(\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau)}\right)_{stat} = \sqrt{\sum_i^{q < m_\tau} [\delta q_i^2 \delta \sigma(q_i) p(q_i)]^2}$$



$$B(\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \eta \nu_\tau) = 0.135 \pm 0.003 \pm 0.007\%$$

Прямое измерение  
Belle 2009



- The fit №1 with  $\rho$  and  $\rho'(1450)$  covers data  $E_{\text{c.m.}} < 1.9$  GeV
- The fit №2 and №3 with  $\rho$ ,  $\rho'(1450)$  and  $\rho''(1700)$  covers data  $E_{\text{c.m.}} < 1.9$  GeV
- The fit №4 with  $\rho$ ,  $\rho'(1450)$ ,  $\rho''(1700)$  and  $\rho'''$  covers data  $E_{\text{c.m.}} < 2.2$  GeV

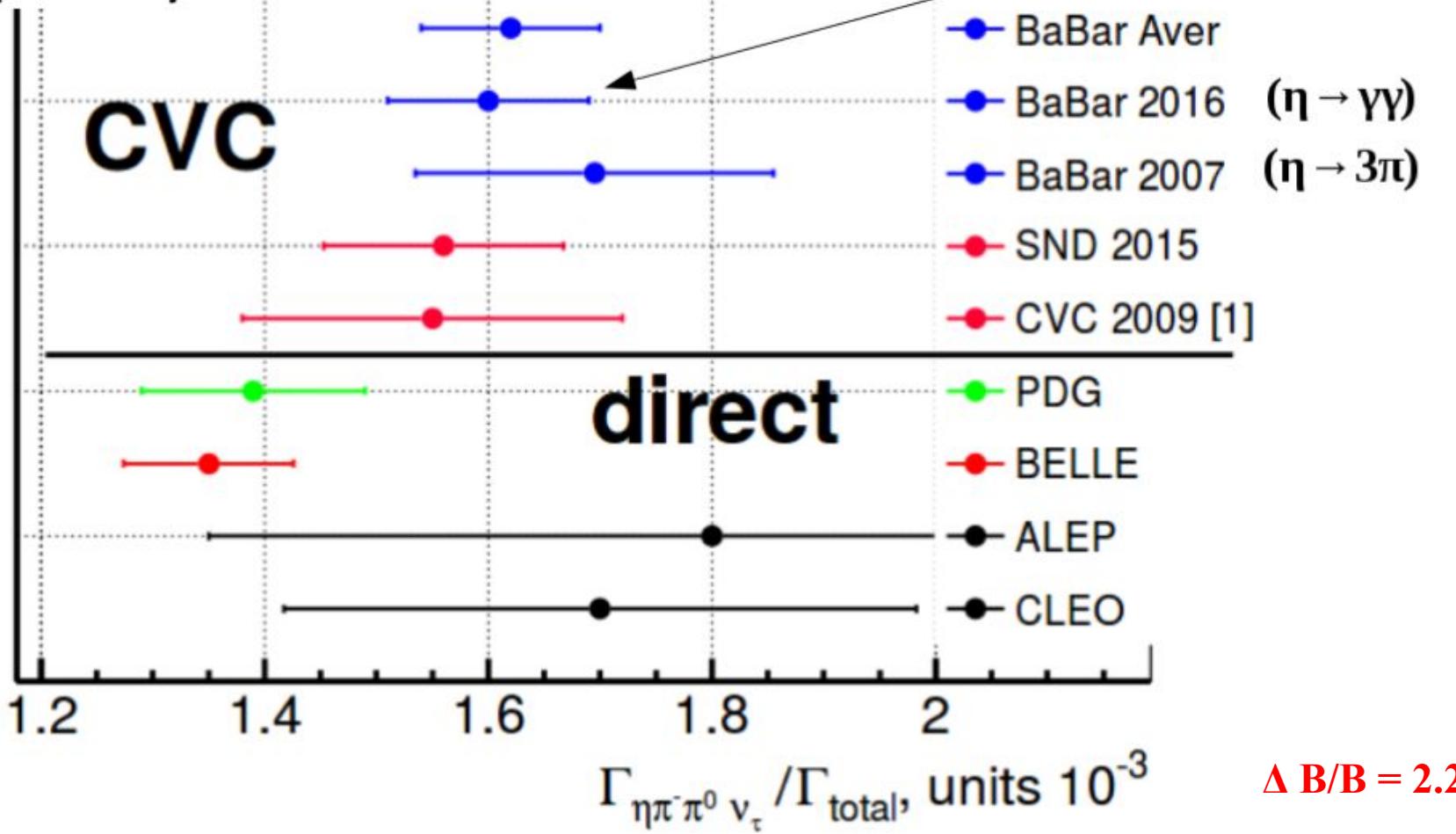
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
$\varphi_V$	$0, \pi$	$0, \pi, \pi$	$0, \pi, 0$	$0, \pi, 0, 0$
$\chi^2/\text{ndf}$	13/18	28/23	17/23	23/28

$$\Gamma(\rho(1450) \rightarrow e^+ e^-) B(\rho(1450) \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-) = 214 \pm 18_{\text{stat}} \pm 10_{\text{syst}} \text{ eV}$$

$$\Gamma(\rho(1700) \rightarrow e^+ e^-) B(\rho(1700) \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-) = 45 \pm 12_{\text{syst}} \pm 3_{\text{syst}} \text{ eV}$$

$$B(\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0 \eta \nu_\tau) = (0.1597 \pm 0.0035_{\text{stat}} \pm 0.0080_{\text{syst}} \pm 0.0011_{\text{model}})\% = (0.160 \pm 0.009)\%$$

**BABAR**  
preliminary



[1] JETP Letters, Vol.89, No.9, pp.429431 (2009).

## Заключение

- изоспин играет важную роль в ядерной физике и физике элементарных частиц.
- изоспиновая инвариантность имеет место в сильных взаимодействиях (с точностью лучше 1%), и не сохраняется в электрослабых процессах.