

# Потенциальные модели дважды тяжелых барионов

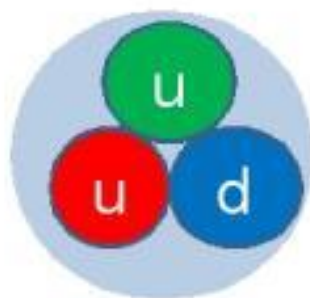
**А. М. Пучков**

**LUNER, НИИФ СПбГУ**

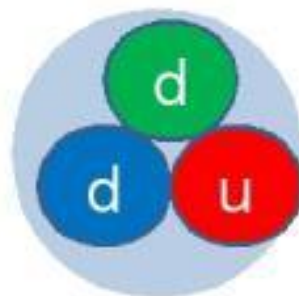
**6 марта 2018 г.**

# Строение барионов

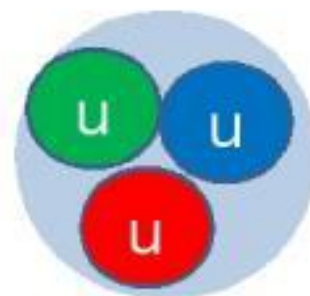
Барионы состоят из трех кварков



p - протон



n - нейтрон



$\Delta^{++}$  - гиперон

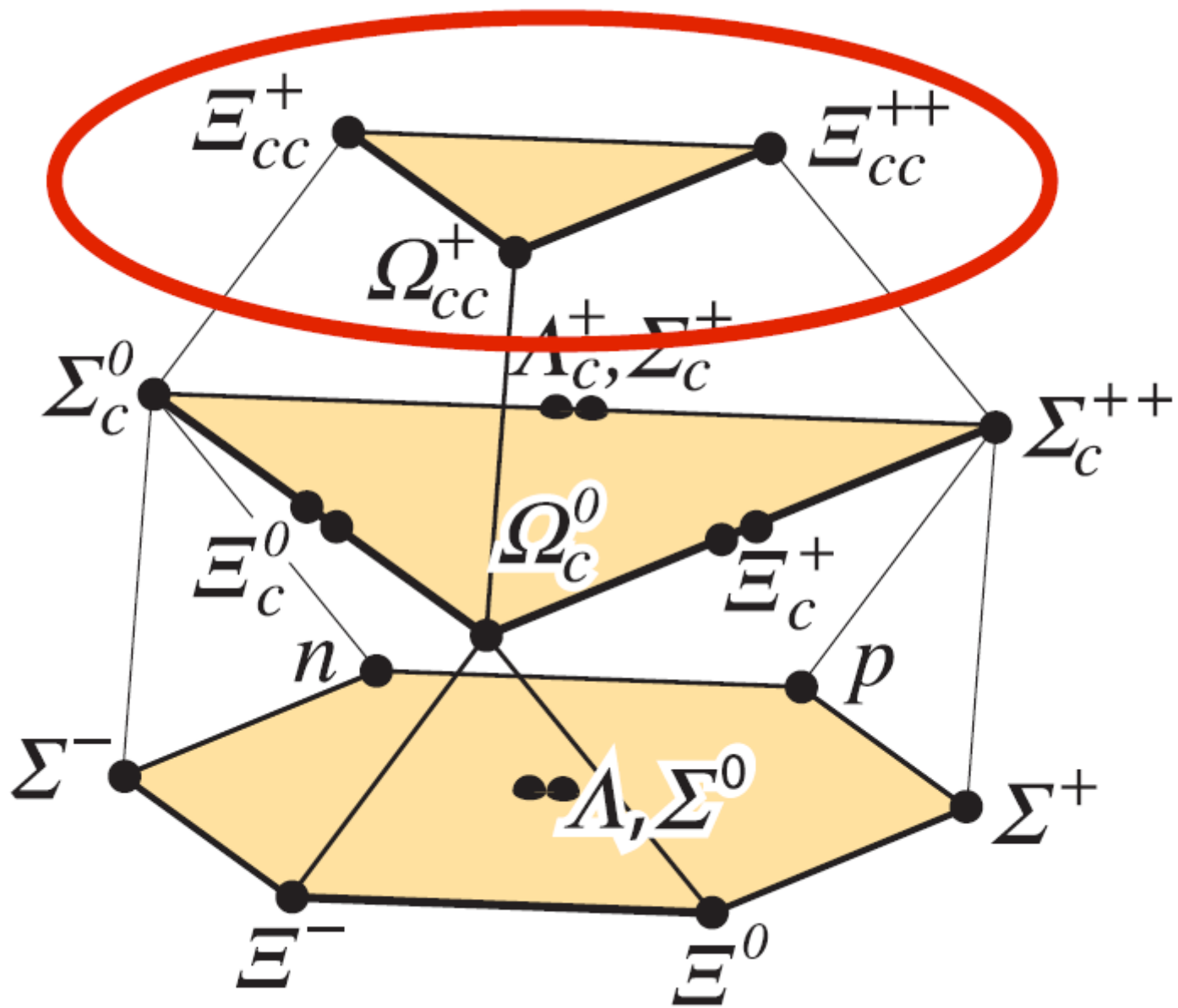
Частица	Протон	Нейтрон	Гиперон
Заряд	$+2/3+2/3-1/3= +1$	$+2/3-1/3-1/3= 0$	$+2/3+2/3+2/3=$
Заряд частицы определяется суммарным зарядом кварков			

# Из каких кварков могут быть построены барионы?

Барионы состоят из трех кварков

mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	u up	c charm	t top
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	d down	s strange	b bottom

The diagram illustrates the properties of six quarks: up (u), charm (c), top (t), down (d), strange (s), and bottom (b). The charm quark (c) is highlighted with a blue box. Arrows indicate relationships: an orange arrow points from the charm quark to the up quark, a blue arrow points from the charm quark to the down quark, and a red arrow points from the charm quark to the strange quark.



# Общие представления о дважды тяжелых барионах

- Состоят из двух тяжелых кварков и одного легкого ( $Q_1 Q_2 q$ ).
- Характеризуются несколькими шкалами:

$$M_Q \gg m_q \quad r_{QQ'} \Lambda_{QCD} \ll 1, \quad \Lambda_{QCD} \ll M_Q.$$

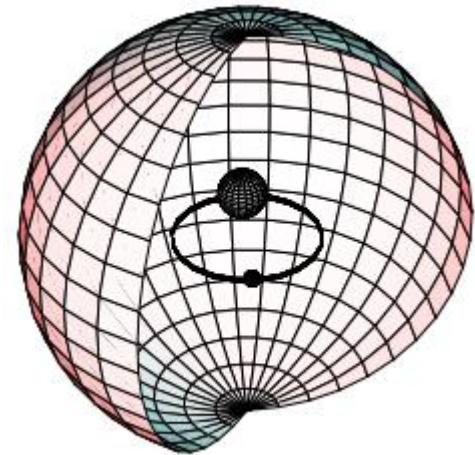
Шкалы для  $\Xi_{bc}$ :

Возможны двухступенчатые вычисления.

В пределе  $m_{Q_1}, m_{Q_2} \rightarrow \infty$

легкий кварк видит тяжелый дикварк как точечный источник глюонного поля.

Идея: построить потенциальную модель (в приближении Борна-Оппенгеймера).



$\hat{H}_{q,D}$  – кварк-дикварковый гамильтониан:

$$\hat{H}_{q,D} = -\frac{\Delta}{2m_{\text{red}}} - \frac{2\alpha_s}{3} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + V_{\text{conf}}(r_1, r_2, R),$$

где  $M_{\text{red}}$  и  $m_{\text{red}}$  – приведенные массы для дикварковой и кварк-дикварковой подсистем:

$$M_{\text{red}} = \frac{M_Q M_{Q'}}{M_Q + M_{Q'}} \approx \frac{M_Q}{2}, \quad m_{\text{red}} = \frac{m_q(M_Q + M_{Q'})}{M_Q + M_{Q'} + m_q} \approx m_q.$$

Тогда масса дважды тяжелого бариона вычисляется следующим образом:

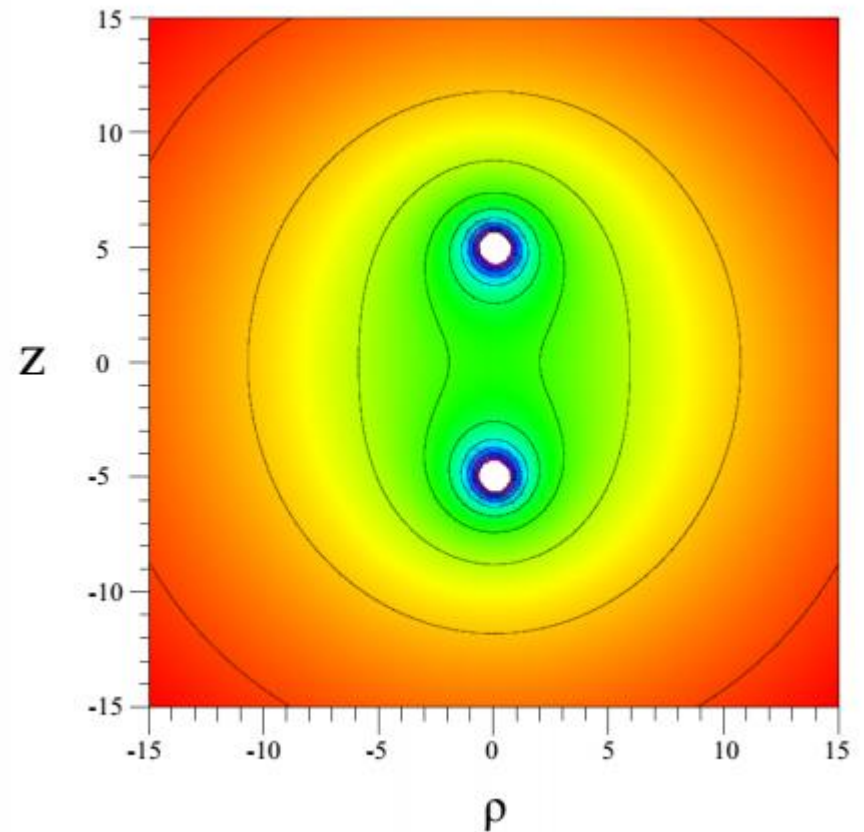
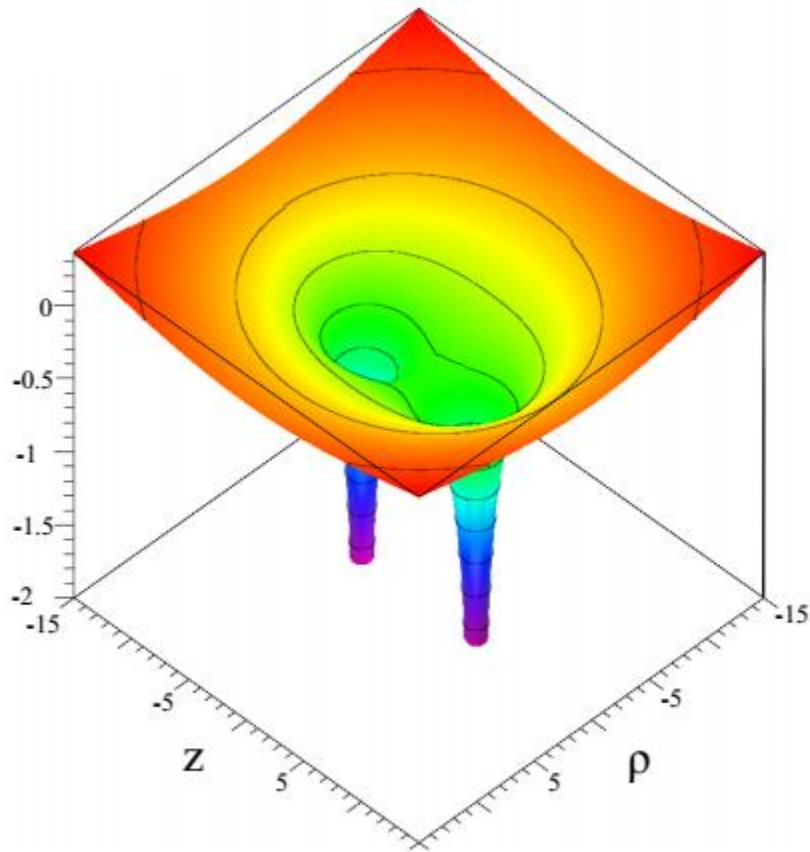
$$M = M_Q + M_{Q'} + m_q + E_{QQ'q},$$

$E_q$  – энергия связи легкого кварка.  $E_{QQ'}$  – энергия связи тяжелых кварков.

$$\Psi(R, r) = \sum_n a_n \phi_n(R) \psi_n(R, r),$$

$$\Delta \psi + 2(E - V) \psi = 0.$$

# Потенциал новой МОДЕЛИ дважды тяжелых барионов



$$V = V_{\text{Coul}} + V_{\text{conf}} = -\frac{(Z_1 + Z_2)\xi + (Z_2 - Z_1)\eta}{R(\xi^2 - \eta^2)} + \frac{\beta R \xi (\xi^2 - 1)}{(\xi^2 - \eta^2)} - \frac{4}{3}V_0. \quad V \xrightarrow{\xi \rightarrow \infty} \beta \xi \sim r$$



$$\frac{d^2 X_{mk}(\xi; R)}{d\xi^2} + \left( m_q \left[ -p^2 - \beta R^3 \xi + \frac{a\xi - \lambda_{mk}^{(\xi)}}{(\xi^2 - 1)} \right] + \frac{(m^2 - 1)}{(\xi^2 - 1)^2} \right) X_{mk}(\xi; R) = 0,$$

$$\frac{d^2 Y_{mq}(\eta; R)}{d\eta^2} + \left( m_q \left[ -p^2 + \frac{b\eta + \lambda_{mq}^{(\eta)}}{(1 - \eta^2)} \right] - \frac{(m^2 - 1)}{(1 - \eta^2)^2} \right) Y_{mq}(\eta; R) = 0.$$

$$p_j^2 = -\frac{R^2}{2} \left( E_j(R) + \frac{4}{3} V_0 \right), \quad a = (Z_1 + Z_2)R, \quad b = (Z_2 - Z_1)R.$$

$$X_{mk}(+1; R) = 0, \quad |X_{mk}(\xi; R)| \xrightarrow{\xi \rightarrow \infty} 0, \quad |Y_{mq}(\pm 1; R)| < \infty.$$

Термы легкого кварка находится из условия

$$\lambda_{mk}^{(\xi)}(p, a) = \lambda_{mq}^{(\eta)}(p, b)$$

$$\phi_{nl}(R)\text{-волновая функция дикварка.} \quad \phi_{nl}(R) = \frac{F_{nl}(R)}{R}.$$

$$\frac{d^2 F_{nl}(R)}{dR^2} + \left[ 2M_{\text{red}} \left( E - E_q(R) + \frac{2\alpha_s}{3R} - \beta R \right) - \frac{l(l+1)}{R^2} \right] F_{nl}(R) = 0.$$

$$F_{nl}(0) = 0, \quad |F_{nl}(R)| \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0.$$



Таблица 1 Спектры масс дважды тяжелых барионов

Состояние	Yoshida	Matrasulov	Puchkov	Lattice QCD
$\Xi_{cc}^+$ , GeV				
$(1S1s)\frac{1}{2}^+$	3.685	3.661	3.581	$3.603 \pm 0.015 \pm 0.016$
$(2S1s)\frac{1}{2}^+$	4.079	3.730	3.660	$3.706 \pm 0.022 \pm 0.016$
$(3S1s)\frac{1}{2}^+$	4.159	3.816	3.672	–
$\Xi_{bb}^-$ , GeV				
$(1S1s)\frac{1}{2}^+$	10.314	9.89	10.060	–
$(2S1s)\frac{1}{2}^+$	10.571	9.911	10.178	–
$(3S1s)\frac{1}{2}^+$	10.612	9.939	10.210	–

## Список публикаций

- ❑ В. В. Киселев, А. К. Лиходед, Барионы с двумя тяжелыми кварками”, УФН, **172**, 5, 497 – 550 (2002).
- ❑ D. U. Matrasulov, M. M. Musakhanov, T. Morii, Spectra of doubly heavy quark baryons, Phys. Rev. C, **61**, 045204 (2000)
- ❑ T. Yoshida, E. Hiyama, A. Hosaka, M. Oka, K. Sadato, Spectrum of heavy baryons in the quark model, Phys. Rev. D, **92**, 114029 (2015)
- ❑ Y. Namekawa et al. (PACS-CS Collaboration), Charmed baryons at the physical point in 2 + 1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D **87**, 094512 (2013).
- ❑ V. N. Kovalenko, A. M. Puchkov, The mass spectrum of double heavy baryons in new potential quark models, EPJ Web of Conference, **137**, 13007, (2017)

# Спектроскопия: открытие $\Xi_{cc}$

- Выход:  $313 \pm 33$  события
- Разрешение по инв.массе:  $6.6 \pm 0.8$  MeV
- Локальная значимость  $> 12\sigma$

$$m(\Xi_{cc}^{++}) = 3621.40 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \pm 0.14(\Lambda_c^+) \text{ MeV}$$

$$m(\Xi_{cc}^{++}) - m(\Lambda_c^+) = 1134.94 \pm 0.72(\text{stat}) \pm 0.27(\text{syst}) \text{ MeV}$$

- Точность доли-МэВ для первого наблюдения!
- Полученные значения лежат в интервале предсказаний (включая КХД на решетках)
- Сигнал для Run-I  $> 7\sigma$  локальной значимости ( $113 \pm 21$  событий)

