



# Очаровательная и прелестная физика тяжёлых кварков



**Дмитрий Мелихов**

Юбилейная Конференция НИИЯФ МГУ

15-17 февраля 2021 г.

Открытие адронов, содержащих очарованный (c) и прелестный (b) кварки -  
завершение построения СМ

1974: c - заполнили 2ое поколение кварков

1977: b - открытие 3его поколение кварков

u	c	t
d	s	b

СМ:

- калибровочная теория, основанная на  $SU_c(3) \times SU_L(2) \times U_Y(1)$  группе со спонтанно нарушенной (за счёт механизма Хиггса) симметрией  $SU_L(2) \times U_Y(1) \rightarrow U_{e.m.}(1)$
- содержащая три поколения полей материи (лептонов и кварков)

$SU_c(3)$  сектор СМ - КХД - динамически особенно сложный в силу конфайнмента цвета: Лагранжиан КХД содержит кварковые и глюонные поля, в природе наблюдаются их связанные состояния - адроны.

С точки зрения сильных взаимодействий c и b-кварки "тяжёлые"

$$m_b = 4.2 \text{ GeV}, m_c = 1.3 \text{ GeV} \gg \Lambda_{\text{QCD}} \sim 220 \text{ MeV}$$

Благодаря этому многие непертурбативные эффекты оказываются подавленными. (В частности, для тяжёлых кварков не возникают независимые кварковые конденсаты).

Это позволяет строить эффективные теории для КХД в случае тяжёлых кварков путём построения двойного разложения амплитуд по  $\alpha_s$  и  $\Lambda_{\text{QCD}}/m_q$

## Флейворный сектор и соответствующая физика - наиболее загадочная часть СМ:

- Почему 3 поколения частиц?  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
- Почему такая иерархия масс полей материи ( $m_u \sim 3 \text{ MeV}$ , ...,  $m_t \sim 160 \text{ GeV}$ ) хотя все они  $\sim \langle \phi \rangle = 250 \text{ GeV}$  (т.е. откуда такая иерархия констант взаимодействия поля Хиггса с полями материи)
- Слабое взаимодействие смешивает кварки разных поколений. Почему возникает иерархическая структура матрицы смешивания кварков

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \simeq \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

и, возможно, "демократическая" структура матрицы смешивания нейтрино.

Флейворная физика (все явления, в которых центральную роль имеет флейвор участвующих кварков) - особенно  $b$  и  $c$  физика (Heavy Quark Physics) - окно в новую физику.

## Стратегии поиска новой физики

- *прямой поиск*: пытаться рождать новые частицы (если хватает энергии)
- *непрямой*: получить предсказания СМ для различных наблюдаемых величин, измерить данные величины и идентифицировать отличия от СМ, Например, прецизионные измерения структуры слабых токов.

В **слабом секторе** СМ на древесном уровне кварковые токи:

- заряженные левые  $b \rightarrow (c, u) + W^*$  [ $V_{cb}, V_{ub}$ ]  $c \rightarrow (d, s) + W$  [ $V_{cd}, V_{cs}$ ]
- нейтральные токи без изменения аромата  $q \rightarrow q + (Z, A)$

**FCNC (нейтральные токи с изменением аромата):  $b \rightarrow (s, d)$ ;  $c \rightarrow u$  отсутствуют на древесном уровне и идут через квантовые петлевые поправки.**

В последние годы был обнаружен целый ряд т.н. **флейворных аномалий** - т.е. отклонений результатов экспериментов от ожиданий СМ на уровне  $\sim 3$  станд. отклонения.

LHCb, 1903.09252

$q^2 \in [1.1, 6.0] \text{ GeV}^2$

$$R_K \equiv \frac{\Gamma(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\Gamma(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)} = 0.846 \begin{matrix} +0.060 & +0.016 \\ -0.054 & -0.014 \end{matrix}$$

2.5  $\sigma$  below the SM

Процессы на ускорителе с участием  $b$  и  $c$  кварков происходят в соответствии со следующей схемой:

I. Рождение пар  $b$ - и  $c$ -кварков в соударении адронов или лептонов при высокой энергии

II.  $b$ - и  $c$ -кварки живут долго на масштабе сильных взаимодействий и успевают адронизоваться; на этой стадии возникают адроны, содержащие  $b$  и  $c$  кварки:

- тяжелые адроны  $D, \Lambda_c, \Sigma_c, \Xi_c, \dots, B, \Lambda_b, \Sigma_b, \Xi_b, \dots$
- дважды тяжёлые адроны  $J/\Psi, \Psi', \Xi_{cc}, \dots, B_c, \Xi_{bc}, \dots, Y, \Xi_{bb}, \dots$
- трижды тяжёлые барионы (?)  $ccc, ccb, bbc, bbb, \dots$
- экзотические тетра-, пента- и т.д. кваркониено-подобные состояния

III. Слабые распады тяжёлых адронов (адронные, полулептонные, лептонные, ...)

На всех этапах доминируют КХД эффекты, как пертурбативные, так и непертурбативные (связанные со структурой сталкивающихся адронов в адрон-адронных соударениях, с формированием адронов, со слабыми распадами адронов).

Главная сложность - надёжное вычисление КХД вкладов.

Проблема изучения бьюти и чарма - это в большой степени проблема КХД

Для проверки СМ и поиска новой физики в секторе тяжёлых кварков необходимо:

- (a) Теоретическое описание механизма рождения тяжёлых адронов/кваркониев в соударениях адронов/лептонов при высоких энергиях
- (b) Теоретическое описание слабых распадов тяжёлых адронов
- (c) Создание МК генераторов событий на основе теоретических результатов (a) и (b) + симуляция детекторов - на основе этого получение ожидаемых распределений для физических наблюдаемых
- (d) Анализ данных и сравнение результатов эксперимента с теорией

**Сотрудники НИИЯФа вносят заметный вклад в  $b$  и  $c$  физику - как в теорию/феноменологию, так и в подготовку и анализ экспериментов:**

- ZEUS@HERA
- SELEX@FNAL
- ATLAS@LHC
- LHCb@LHC
- NICA
- $\tau$ -charm factory

# **Рождение чарма и бьюти на ускорителях (теория и эксперимент)**

## Феноменология рождения тяжёлых адронов и кваркониев в адрон-адронных соударениях

- Изучена возможность наблюдать эффекты **двойного партонного рассеяния** ассоциированном рождении электрослабых бозонов и тяжёлых мезонов в адрон-адронных соударениях (А. Липатов, М. Малышев, А. Снигирев, Н. Зотов)
- Показано доминирование **двойного партонного рассеяния** в ассоциированном рождении  $\Upsilon$ -мезона и  $c\bar{c}$ -пары. Это позволило определить эффективное сечение двойного партонного взаимодействия (А. Бережной)
- Исследованы корреляции в рождении пар  $J/\psi$  в протон-протонных и ядро-ядерных на LHC. Предсказано усиление выхода пар  $J/\psi$  за счёт **двойного партонного рассеяния** в ядро-ядерных столкновениях (А. Снигирев)
- Получены оценки **тройного партонного рассеяния** в рождении трёх пар тяжёлых кварков (А. Снигирев)
- Предсказана возможность изучения **возбуждённых состояний**  $B_c(2S)$  и  $B^*c(2S)$  в спектре  $B_c(S)\pi^+\pi^-$  на LHC. [Обнаружены в ATLAS и CMS]. Расчёт сечения парного рождения  $B_c$  мезонов в  $e^+e^-$ -аннигиляции в однопетлевом приближении, оценка сечения рождения P- и D-волновых возбуждений дважды очарованных барионов (А. Бережной)
- Теоретическое описание процессов рождения тяжелых кваркониев в **NRQCD**. В рамках NRQCD предложен специальный механизм перехода промежуточных (октетных по цвету) состояний пары тяжелых кварков в наблюдаемый кварконий (А. Липатов)



## Публикации:

D. d'Enterria, [A. M. Snigirev](#),

Enhanced  $J/\Psi$ -pair production from double parton scatterings in nucleus-nucleus collisions at the Large Hadron Collider, PLB727 (2013) 157

S.P. Baranov, [A.M. Snigirev](#), [N.P. Zotov](#), A. Szczurek, W. Schäfer,

Interparticle correlations in the production of  $J/\psi$  pairs in proton-proton collisions, PRD87 (2013) 034035

[A.V. Berezhnoy](#), A.K. Likhoded ,

Associated production of  $Y$  and open charm at LHC, Int.J.Mod.Phys. A30 (2015), 1550125

S.P. Baranov, [A.V. Lipatov](#), [M.A. Malyshev](#), [A.M. Snigirev](#), [N.P. Zotov](#),

Associated production of electroweak bosons and heavy mesons at LHCb and the prospects to observe double parton interactions, PRD93 (2016) 094013

D. d'Enterria, [A.M. Snigirev](#),

Triple parton scatterings in high-energy proton-proton collisions, PRL 118 (2017) 122001

[A.V. Berezhnoy](#), A.K. Likhoded, [A.I. Onishchenko](#), S.V. Poslavsky,

Next-to-leading order QCD corrections to paired  $B_c$  production in  $e^+e^-$  annihilation, NPB 915 (2017) 224;

[I. N. Belov](#), [A.V. Berezhnoy](#), A.K. Likhoded,

Production of doubly charmed baryons with the excited heavy diquark at LHC, Int.J.Mod.Phys. A34 (2019), 1950038.

S.P. Baranov, [A.V. Lipatov](#), Phys. Rev. D100, 114021 (2019);

[N.A. Abdulov](#), [A.V. Lipatov](#), Eur. Phys. J. C 79, 830 (2019); Eur. Phys. J. C 80, 486 (2020) ;

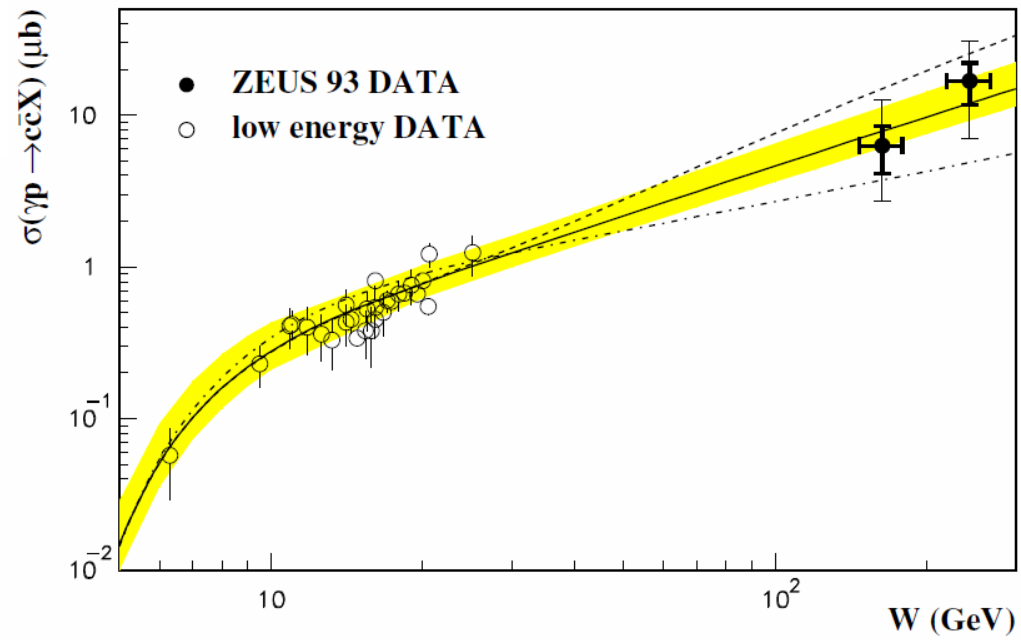
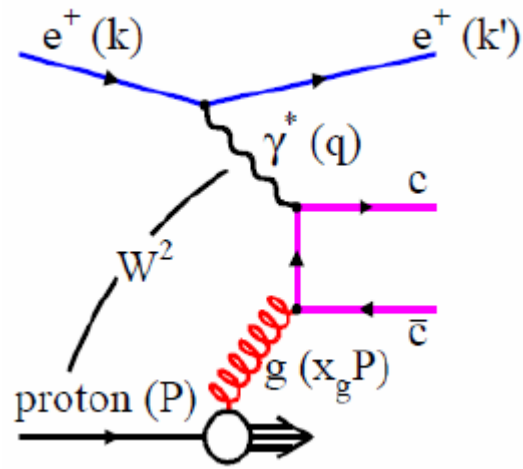
S.P. Baranov, [A.V. Lipatov](#), Eur. Phys. J. C 79, 621 (2019)

## Рождение чарма в коллаборации ZEUS @ HERA

Коржавина И.А., Катков И.И., Власов Н.Н., Гладилин Л.К

- Study of  $D^*$  (2010) plus/minus Production in ep Collisions at HERA, PLB 349 (1995) 225
- Differential Cross Sections of  $D^{*+-}$  Photoproduction in ep Collisions at HERA, PLB 401 (1997) 192
- $D^*$  Production in Deep Inelastic Scattering at HERA, PLB 407 (1997) 402
- Measurement of inclusive  $D^{*+-}$  and associated dijet cross sections in photoproduction at HERA, EPJC 6 (1999) 67
- Measurement of  $D^{*+-}$  production and the charm contribution to  $F_2$  in DIS at HERA, EPJC 12 (2000) 35
- Measurement of Inclusive  $D_s^{*+-}$  Photoproduction at HERA, PLB 481 (2000) 213
- Measurement of the open-charm contribution to the diffractive proton structure function, NPB 672 (2003) 3
- Measurement of Inelastic  $J/\psi$  Production in Deep Inelastic Scattering at HERA, EPJC 44 (2005) 13
- Diffractive photoproduction of  $D^*$  at HERA, EPJC 51 (2007) 301
- Production of excited charm and charm-strange mesons at HERA, EPJC 60 (2009) 25
- Measurement of the charm fragmentation function in  $D^*$  photoproduction at HERA, JHEP 04 (2009) 082
- *Search for a narrow charmed baryonic state decaying to  $D^{*+-}p$  in ep collisions at HERA, EPJC 38 (2004) 29*

Первая статья ZEUS (и HERA) по рождению чарма в ер столкновениям на данных 1993 года



Подтверждён быстрый рост глюонной компоненты в протонной структурной функции при малых  $X_Bj$

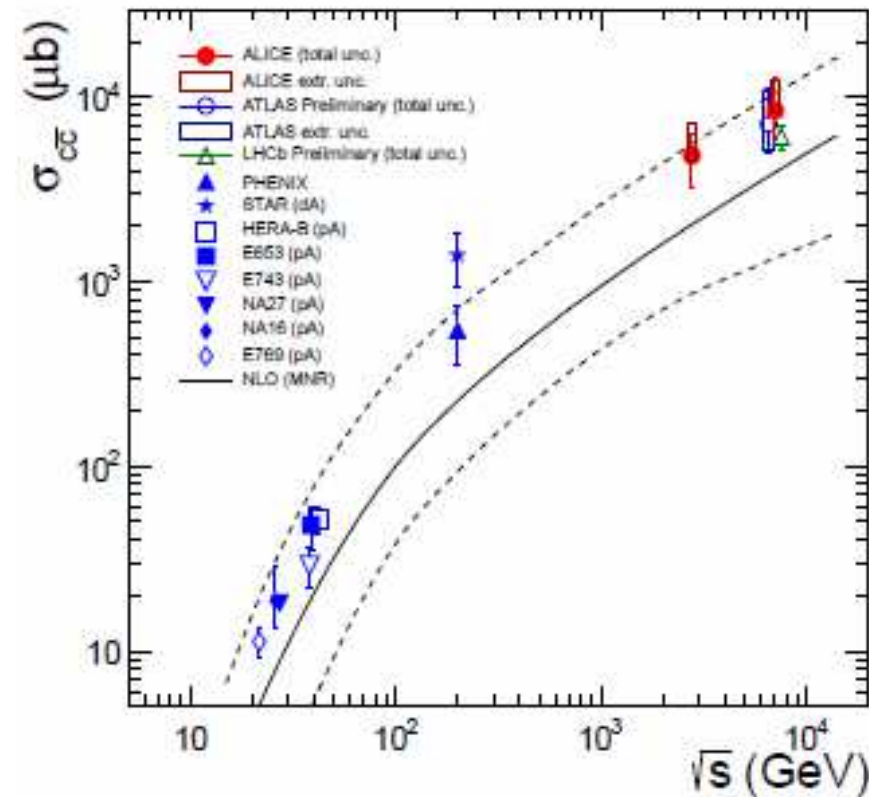
# Изучение рождения чарма в эксперименте SELEX@FNAL

Лейкин Е.М., Филимонов И.С., Рудь В.И., Немиткин А.В.

- Production Asymmetry of  $D_s$  from 600 GeV/c Sigma- and pi- beam, PLB 558 (2003) 34
- Hadronic Production of  $\Lambda_c$  from 600 GeV/c pi-,  $\Sigma$ - and p beams, PLB 528 (2002) 112002
- Nuclear Dependence of Charm Production, EPJC 64(2009)63

## Рождение чарма и бьюти в коллаборации ATLAS @ LHC

- Charmed meson production in pp at 7 TeV, NPB 907 (2016) 717
- b-hadron cross-section with  $D^*\mu$  in 7 TeV pp, NPB 864 (2012) 341



# Слабые распады адронов, содержащих $c$ и $b$ -кварки (теория и эксперимент)

## Феноменология слабых распадов тяжёлых мезонов

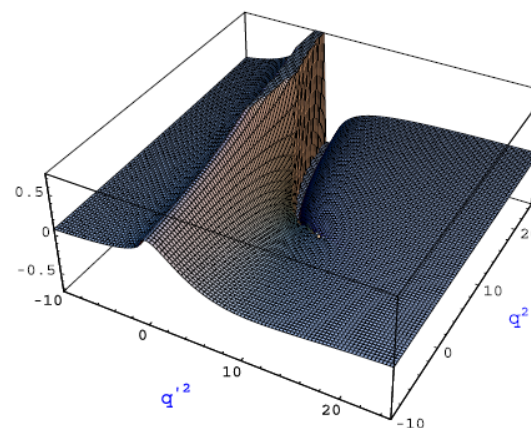
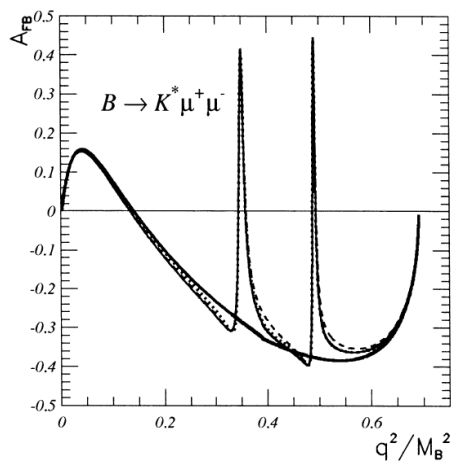
- Предложен и разработан феноменологический подход к форм факторам слабых распадов тяжёлых мезонов, основанный на дисперсионных представлениях
- Вычислены и изучены различные асимметрии в полуплептонных FCNC распадах тяжёлых мезонов и показана их чувствительность к новой физике; получены предсказания для всевозможных дифференциальных распределений в полуплептонных и многолептонных распадах тяжёлых мезонов
- Исследованы нефакторизуемые эффекты петель чарма в FCNC распадах тяжёлых мезонов.
- В методе правил сумм КХД вычислены константы лептонных распадов тяжёлых мезонов и извлечено значение массы  $b$ -кварка

Опубликовано >40 работ по физике тяжёлых кварков в высокорейтинговых журналах

- [D. Melikhov](#), B. Stech, Weak form-factors for heavy meson decays: An Update, Phys.Rev. D62 (2000) 014006 [**344 cites**]
- [D. Melikhov](#), Form-factors of meson decays in the relativistic constituent quark model Phys.Rev. D53 (1996) 2460 [**141 cites**]
- [D. Melikhov](#), [N. Nikitin](#), S. Simula, Rare exclusive semileptonic  $b \rightarrow s$  transitions in the SM, Phys.Rev. D57 (1998) 6814-6828 [**127 cites**]

Работы 2020 года:

- [A.Kozachuk, D.Melikhov](#)  
Constraints on the anomalous  $Wtb$  couplings from B-physics experiments  
Symmetry 12, 1506 (2020)
- [D.Melikhov](#), S. Simula, Non-integrable threshold singularities of two-point functions in perturbation theory, Eur. Phys. J. Plus 136, 106 (2021)
- M. Ivanov, [D.Melikhov](#), S. Simula, Form factors for  $B \rightarrow j_1 j_2$  decays into two currents in QCD, Phys. Rev. D101, 094022 (2020)
- [A. Danilina, N. Nikitin](#), K.Toms, Decays of charged B-mesons into three charged leptons and a neutrino, Phys. Rev. D101, 096007 (2020)



Зарядовая асимметрия в  $B \rightarrow K^* \mu \mu$  (1997)

$\text{Re } F(q^2, q'^2)$  для перехода  $B \rightarrow 4l$  (2020)

## Редкие FCNC распады B-мезонов на LHCb

- Теоретические результаты встроены в Монте-Карло генератор событий (пакет EvtGen) для более чем пятидесяти редких полулептонных, лептонных радиационных и многолептонных распадов B<sub>d,s</sub> мезонов. Включен в официальный код LHCb (Н. Никитин)
- Впервые обнаружены редкие полулептонные распады  $B_s \rightarrow [f_0(980) \rightarrow \pi^+\pi^-] \mu^+\mu^-$  и  $B_d \rightarrow [\rho^0(770) \rightarrow \pi^+\pi^-] \mu^+\mu^-$  с парциальными ширинами:  
 $Br(B_{0s} \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-) = (8.6 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst}) \pm 0.7(\text{norm})) \times 10^{-8}$   
 $Br(B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-) = (2.11 \pm 0.51(\text{stat}) \pm 0.15(\text{syst}) \pm 0.16(\text{norm})) \times 10^{-8}$   
LHCb (N.Nikitin, I.Komarov), PLB 743, 46 (2015).
- Установлены верхние пределы на парциальные ширины редких 4-лептонных распадов B<sub>d,s</sub> мезонов  $Br(B_{0s} \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-) < 2.5 \times 10^{-9}$  at 95% CL и  $Br(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-) < 6.9 \times 10^{-10}$  at 95% CL  
LHCb (N.Nikitin) PRL 110, 211801 (2013); JHEP 1703, 001 (2017).
- Измерена парциальная ширина распада  $B_s^0 \rightarrow \phi\gamma$  по отношению к известной парциальной ширине распада  $B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$ . Согласие со SM. LHCb (D.Savrina), Phys. Rev. D85 (2012) 112013

## Редкие FCNC распады B-мезонов на ATLAS

А.Болдырев, Л.Гладилин, А.Маевский, С. Сивоклоков, Л.Смирнова, С.Турчихин

- Search for the decay  $B(s) \rightarrow \mu^+\mu^-$  with the ATLAS detector, ATLAS, PLB 713 (2012) 387
- Search for  $B(s) \rightarrow \mu^+\mu^-$  using Run-1 data, ATLAS, EPJC 76 (2016) 513
- $B(s) \rightarrow \mu^+\mu^-$  with 2015+2016 data, ATLAS, JHEP 04 (2019) 098



# Распады нейтральных $B^0$ и $B_s^0 \rightarrow$ (чармоний + лёгкие мезоны) на LHCb и ATLAS

## LHCb

- Впервые наблюдались распады  $B^0 \rightarrow J/\psi\omega$ ,  $B^0 \rightarrow J/\psi\eta'$ ,  $B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-$ ,  $B^0 \rightarrow J/\psi\eta'$  и  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\eta$ ,  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\eta'$ ,  $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\eta$ ,  $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\eta'$ ,  $B_s^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^-$  и измерены их парциальные ширины, LHCb (D.Savrina) Nucl. Phys. B867 (2013) 547; Nucl. Phys. B871 (2013) 403, JHEP 01 (2015) 024
- Измерено эфф. время жизни  $B_s^0$ -мезона в распаде  $B_s^0 \rightarrow J/\psi\eta$ . LHCb (D.Savrina), PLB762 (2016) 484
- Обнаружены распады  $B^+ \rightarrow J/\psi 3\pi^+ 2\pi^-$  и  $B^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+\pi^+\pi^-$  и измерены их парциальные ширины. LHCb (D.Savrina), Eur. Phys. J. C77 (2017) 72.

## ATLAS

- Time-dependent angular analysis of the decay  $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$  and extraction of  $\Delta\Gamma_s$  and the  $CP$ -violating weak phase  $\phi_s$  by ATLAS, JHEP 1212 (2012) 072; PRD90 (2014) 052007

## Распады тяжёлых барионов на LHCb и ATLAS

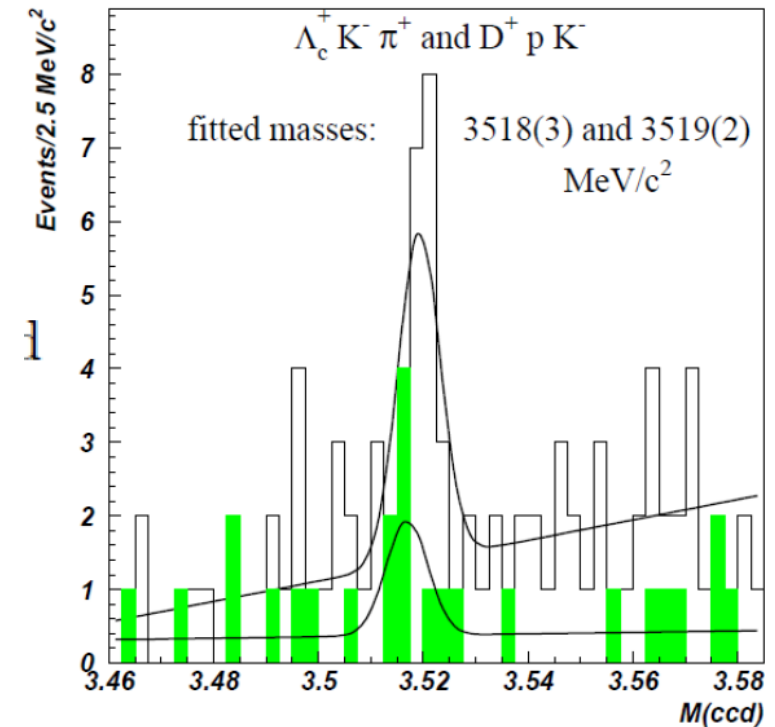
- Observation of  $\Lambda_b \rightarrow \psi(2S)$ , ATLAS, PLB 751 (2015) 63
- Анализ многоадронных распадов прелестных барионов на LHCb в том числе таких, в которых тяжёлый кварк переходит в мезон, например  $\Lambda_b^0 \rightarrow D^+(D^{*+})\pi^-\pi^-$  (LHCb, А.Бережной, И.Горелов).

## Распады дважды тяжёлых мезонов на ATLAS

- Branching fractions of  $B_c \rightarrow J/\psi D(*)$ , ATLAS, EPJC 76 (2016) 1

## Слабые распады чарма ранее изучались в эксперименте SELEX@FNAL

- Observation of the Cabibbo-suppressed decay  $\Xi_{cc}^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ , PRL 84 (2000) 1857
- Precision measurements of the  $\Lambda_{cc}^+$  and  $D_0$  lifetimes, PRL 86 (2001) 5243
- Measurement of the  $D_s$  lifetime, PLB 523(2001) 22
- First Observation of the Doubly Charmed Baryon  $\Xi_{cc}^+$ , PRL 89 (2002) 112002  
Confirmation of the Double Charm Baryon  $\Xi_{cc}^+$ , via its Decay  $\rightarrow p D^+ K^-$ , PLB 628 (2005) 18
- First observation of a narrow charm-strange meson  $D_{sJ}^+(2632) \rightarrow D_s \eta$  and  $D_0 K^+$ , PRL 93 (2004) 242001
- First Observation of the Cabibbo-suppressed Decays  $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Sigma^+ \pi^- \pi^+$  and  $\Xi_{cc}^+ \rightarrow \Sigma^- \pi^+ \pi^+$  and Measurement of their Branching Ratios, PLB 666 (2008) 299



SELEX RESULTS FOR  $\Xi_{cc}^+$

## **Теория и экспериментальный поиск тетра и пентакварков**

## Теория экзотических многокварковых систем

- Исследованы общие свойства функций Грина многокварковых токов в КХД и построены правила сумм КХД, адекватные для описания многокварковых связанных состояний  
W.Lucha, [D.Melikhov](#), H.Sazdjian, Cluster reducibility of multiquark operator, PRD100, 094017 (2019),  
Tetraquark-adequate formulation of QCD sum rules, PRD100, 014010 (2019);  
Tetraquark-adequate QCD sum rules for quark-exchange processes, PRD100, 074029 (2019)  
OPE and quark-hadron duality for two-point functions of tetraquark currents in  $1/N_c$  expansion, PRD103, 014012(2021)
- Изучена возможность существования компактных тетракварков в КХД при большом числе цветов  $N_c$  и получены оценки для ширины таких состояний  
W.Lucha, [D.Melikhov](#), H.Sazdjian, Are there narrow flavor-exotic tetraquarks in large- $N_c$  QCD?, PRD98,094011(2018);  
Tetraquarks and two-meson states at large- $N_c$ , EPJC77, 866 (2017),  
Narrow exotic tetraquark mesons in large- $N_c$  QCD, PRD96, 014002 (2017)
- Показана возможность обнаружения тяжёлых четырёхкварковых состояний на LHC  
[A.V.Berezhnoy](#), A.V. Luchinsky, A.A. Novoselov, Tetraquarks Composed of 4 Heavy Quarks, PRD 86 (2012) 034004  
[A.V. Berezhnoy](#), A.K. Likhoded, A.V. Luchinsky, A.A. Novoselov, Double J/psi-meson Production at LHC and 4c-tetraquark state, PRD84 (2011) 094023.  
В 2020 году структура, которая может быть интерпретирована как 4-тяжёлый тетракварк, обнаружена LHCb.

## Экспериментальный поиск экзотических тетракварков на ATLAS и LHCb

- Search for tetraquark in  $B_s \pi$  decays, [ATLAS \(L.Gladilin et al\)](#), PRL 120 (2018) 202007  
Ограничения на рождение  $b\bar{u}\bar{d}s$  тетракварка  $X(5568)$
- Поиск чармониеподобных резонансов в  $J/\psi\eta$  канале в распадах  $B^\pm$  и  $B_s^0$  на LHCb ([D. Savrina](#))

# **Теоретико-полевые результаты в КХД с тяжёлыми кварками и в эффективных теориях поля**

## Многопетлевые вычисления в КХД и эфф теориях для КХД с тяжёлыми кварками

- Вычислены пертурбативные вклады высоких порядков в корреляторы токов тяжёлых кварков
- Вычислены пертурбативные поправки высоких порядков к соотношению между полюсной и бегущей массами тяжёлого кварка
- Вычислены пертурбативные поправки к различным амплитудам с тяжёлыми мезонами
- Получены многопетлевые пертурбативные вклады в статический потенциал для тяжёлого кваркония

Опубликовано **несколько десятков работ** по пертурбативным вычислениям **в физике тяжёлых кварков**:

- [P. Baikov](#), K.G. Chetyrkin, J. H. Kuhn, Scalar correlator at  $O(\alpha_s^{**4})$ , Higgs decay into b-quarks and bounds on the light quark masses, Phys.Rev.Lett. 96 (2006) 012003 [**209 cites**]
- M.Beneke, A. Singer, [V.Smirnov](#), Two loop correction to the leptonic decay of quarkonium Phys.Rev.Lett. 80 (1998) 2535-2538 [**193 cites**]
- P. Marquard, A.Smirnov, [V.Smirnov](#), M. Steinhauser, Quark Mass Relations to Four-Loop Order in Perturbative QCD, Phys.Rev.Lett. 114 (2015), 142002 [**191 cites**]
- A.Smirnov, [V.Smirnov](#), M. Steinhauser, Three-loop static potential, PRL 104 (2010) 112002 [**181 cites**]
- D. Broadhurst, [P.A. Baikov](#), [V.A. Ilyin](#), ..., [V.A. Smirnov](#), Two loop gluon condensate contributions to heavy quark current correlators, Phys.Lett. B329 (1994) 103 [**120 cites**]

Работы 2020 года:

- A. Grozin, P. Marquard, A.V. Smirnov, [V.A. Smirnov](#), M.Steinhauser, Matching the heavy-quark fields in QCD and HQET at four loops, Phys.Rev. D102 (2020) 054008
- [V.A. Smirnov](#) et al, Evaluating a family of two-loop non-planar master integrals for Higgs + jet production with full heavy-quark mass dependence, JHEP 2001 (2020) 132

## Заключение, пожелания, благодарности

Сотрудники НИИЯФ в течение предыдущих 30 лет (до и во время ЛНС-эры) принимали и в настоящее время продолжают принимать активное участие как в теоретических исследованиях в секторе тяжёлых кварков, так и в анализе экспериментальных данных по очарованным и прелестным адронам. Был внесён значимый вклад в развитие теории и эксперимента.

Хочется пожелать, чтоб и в следующие 30 лет (в том числе в пост-ЛНС эру) сотрудники НИИЯФ продолжили успешные исследования - в том числе в физике тяжёлых кварков - на том же достойном мировом уровне.

**Новых успехов и достижений!**

Благодарность за подготовку материалов к докладу:

А.Бережному, Л.Гладилину, А.Липатову, Н.Никитину, Д.Савриной