

ОТДЕЛЕНИЕ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Важнейшие научные результаты за 2019 год

Содержание

Измерение спектра поперечного импульса p_{\perp} ($l = e, \mu$) и угловой переменной ϕ^* в процессе распада Z-бозона на лептонную пару в эксперименте ATLAS.-----стр. 3

μ SR-исследование динамики внутренних магнитных корреляций в мультиферроике Tb(Vi)MnO₃ в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях.стр. 4

Распределения ядерной материи в протонизбыточных ядрах ⁷Be и ⁸B из данных по упругому рассеянию протонов промежуточной энергии в инверсной кинематике.стр. 5

Открытие нарушения CP инвариантности в распадах D⁰ мезонов.стр. 6

Обнаружение трёх новых пентакварковых состояний.стр. 7

Хронометрия эволюции плотной адронной среды в центральных столкновениях ультррелятивистских тяжелых ядер на БАК.стр. 8

Эксклюзивное фоторождение J/Ψ на ядре в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВстр. 9

Фоторождение J/Ψ мезонов в ультрапериферических протон-ядерных столкновениях на Большом Адронном Коллайдере.стр. 10

Уменьшение потерь в системе медленного вывода пучка 400 ГэВ/с протонов из ускорителя SPS в CERN путем каналирования части пучка изогнутым кристаллом.стр. 11

Изучение свойств бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS. -----стр. 12

Поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса Стандартной модели в эксперименте ATLAS. -----стр. 13

Высокопрецизионные измерения масс нуклидов на ловушке PENTATRAP. -----стр. 14

Измерения масс сверхтяжёлых элементов на установке SHIPTRAP. -----стр. 15

Поиск тяжелых векторных бозонов в эксперименте ATLAS. -----стр. 16

Разработка проекта масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА. -----стр. 17

Исследование нейтронно-избыточных ядер астата в лазерном ионном источнике на установке ISOLDE (CERN): оболочечный эффект инверсия четно-нечетного эффекта. ---стр. 18

Разработка высокотемпературного метода выделения радионуклидов альфаэмиттеров из мишени карбида тория. -----стр.19

Измерение спектра поперечного импульса p_{\perp} ($l = e, \mu$) и угловой переменной ϕ^* в процессе распада Z -бозона на лептонную пару в эксперименте ATLAS

А.Е. Ежилов, М.П. Левченко, В.П. Малеев, Ю.Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В.М. Соловьёв, О.Л. Федин – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Прецизионное измерение спектров поперечного импульса Z -бозона, p_T , и угловой переменной ϕ^* позволяет выполнить их сравнение с теоретическими расчетами, полученными с учетом поправок различных порядков пертурбативной квантовой хромодинамики (КХД), и тем самым проверить расчеты в рамках пертурбативной КХД.

Для анализа использовались данные, соответствующие интегральной светимости $36,1 \text{ фб}^{-1}$, накопленные в 2015 и 2016 годах работы Большого адронного коллайдера на детекторе ATLAS. Для измерений отбирались события распадов Z -бозонов на электрон-позитронную (ee) и мюонную ($\mu\mu$) пары. Измерения выполнялись в области инвариантных масс пар лептонов, близких к массе Z -бозона ($66 - 116 \text{ ГэВ}$). Для восстановления неискаженных (за счет отбора событий и конечного разрешения детектора) спектров по p_T и ϕ^* осуществлялась процедура обратной свертки.

В результате были измерены дифференциальные (см. рис. 1) и интегральные сечения в ограниченном фазовом пространстве (англ. fiducial phase space) в электронном и мюонном каналах распада Z -бозона. Измеренные сечения были объединены с помощью χ^2 минимизации, а также выполнено сравнение полученного объединенного результата с теоретическими предсказаниями. Измеренное интегральное сечение распада Z -бозона в

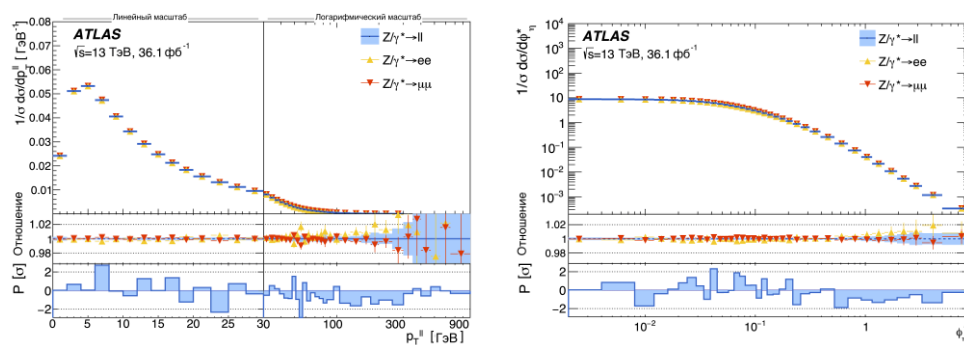


Рис. 1. Измеренные дифференциальные сечения для электронного и мюонного канала распада Z -бозона, а также комбинированный результат для сечения распада в лептоны, как функция p_T (слева) и ϕ^* (справа). P – разница в измеренных сечениях между электронным и мюонным каналом, деленная на ошибку сечения комбинированного результата.

лептоны составило $\sigma_{\text{fid}}(pp \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow ll) = 736.2 \pm 0.2$ (стат) ± 6.4 (сист) ± 14.7 (свет) пб [1].

[1] ATLAS Collaboration, A. Ezhilov, M. Levchenko, V. Maleev, Y. Naryshkin, D. Pudzha, V. Solovyev, O. Fedin: arXiv:1912.02844

μ SR-исследование динамики внутренних магнитных корреляций в мультиферроике $Tb(Bi)MnO_3$ в магнитоупорядоченном и парамагнитном состояниях

С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Е.И. Головенциц, В.А. Санина – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

С помощью μ SR-метода изучена динамика внутренних магнитных корреляций в мультиферроике $Tb_{0.95}Bi_{0.05}MnO_3$ в диапазоне температур 10 – 290 К.

При исследовании мультиферроика $Tb_{0.95}Bi_{0.05}MnO_3$ с помощью μ SR-метода был обнаружен ряд особенностей, которые не наблюдались при изучении других мультиферроиков-манганитов, в том числе и $TbMnO_3$.

В интервале температур 80–150 К в поперечном магнитном поле 290 Гс обнаружено расслоение образца на две фазы. Фаза с временем магнитных корреляций больше времени наблюдения (10 мкс), что потребовало гауссовой формы функции релаксации, составила примерно 50% и относилась к областям фазового расслоения, содержащим пары ионов Mn^{3+} и Mn^{4+} , а также перезаряжающие их электроны. Вторая фракция формируется парными корреляциями ионов ($Mn^{3+}-Mn^{3+}$) в областях ближнего

магнитного порядка в матрице исходного кристалла, на которые магнитное поле 290 Гс слабо влияет.

В области температур магнитоупорядоченного состояния $T < T_N = 40$ К наблюдались два мюониевых канала релаксации поляризации мюонов. Первый канал связан с образованием мюонных ферромагнитных комплексов ($Mn^{3+}-Mn-Mn^{4+}$) в областях фазового расслоения. В этих комплексах мюон теряет поляризацию в результате сверхтонкого взаимодействия в мюонии за время меньше 10^{-8} с.

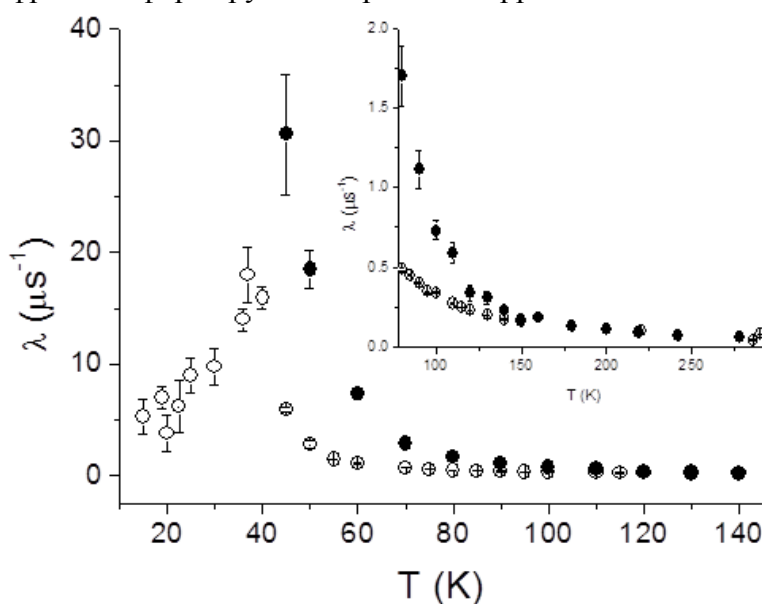


Рис. Температурная зависимость скорости релаксации поляризации мюона; λ_s – светлые точки ($H = 0$), λ_F – тёмные точки ($H = 290$ Гс).

Второй канал возникает из-за образования мюонии с разорванной сверхтонкой связью в исходной матрице образца. В этом случае скорость релаксации поляризации большая, но мюон остаётся квазисвободным при взаимодействии с локальными магнитными полями циклоиды. Вклады в деполаризацию мюонов этих двух каналов примерно одинаковы.

[1] С.И. Воробьев, А.Л. Геталов, Е.И. Головенциц, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, В.А. Санина, Г.В. Щербаков. Письма в ЖЭТФ, 2019, том 110, вып. 2, с. 118 – 125.

[2] А.Л. Геталов, С.И. Воробьев, Е.Н. Комаров, С.А. Котов, Г.В. Щербаков. Программа MNK2018 для обработки данных μ SR-эксперимента. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019663498 от 17.10.2019.

Распределения ядерной материи в протонизбыточных ядрах ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ из данных по упругому рассеянию протонов промежуточной энергии в инверсной кинематике

Г.Д. Алхазов, А.А. Воробьев, А.В. Добровольский, А.Г. Инглесси, Г.А. Королев, Г.Е. Петров, Л.О. Сергеев, А.В. Ханзадеев, В.И. Яцюра –

Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

С целью изучения пространственных распределений материи в протонизбыточных экзотических ядрах ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$ были измерены абсолютные дифференциальные сечения упругого рассеяния $p{}^7\text{Be}$ и $p{}^8\text{B}$ в области малых углов в инверсной кинематике при энергии 0,7 ГэВ/нуклон. Эксперимент проводился в Ядерном центре тяжелых ионов GSI в Дармштадте. Основной частью экспериментальной установки была ионизационная камера ИКАР, наполненная водородом при давлении 10 бар, которая служила одновременно газовой мишенью и детектором протонов отдачи. Активная мишень ИКАР была разработана в ПИЯФ и первоначально использовалась в экспериментах по малоугловому адронному упругому рассеянию. Протоны отдачи регистрировались в ИКАР в совпадении с рассеянными частицами пучка. Анализ формы измеренных дифференциальных сечений позволяет определить распределения ядерной материи и радиусы ядерных кора и гало.

Измеренные сечения были проанализированы с использованием теории многократного рассеяния Глаубера и применением четырех параметризаций феноменологических распределений ядерной плотности, обозначенных как SF (симметризованное распределение Ферми), GH (гауссиан-гало), GG (гауссиан-гауссиан), GO (гауссиан-осциллятор). Были определены среднеквадратичные радиусы (с.к.р.) ядерной материи $R_m = 2,42(4)$ фм у ${}^7\text{Be}$ и $R_m = 2,58(6)$ фм у ${}^8\text{B}$. Полученные распределения плотности показаны на рисунке. Согласно данной работе [1], ${}^7\text{Be}$ является довольно компактным ядром, тогда как протяженное радиальное распределение плотности ядра ${}^8\text{B}$ указывает на наличие у этого ядра протонного гало с с.к.р. $R_h = 4,24(25)$ фм. Определен также с.к.р. распределения протонов $R_p = 2,76(9)$ фм.

Отметим, что полученные результаты для ядер ${}^8\text{B}$ и ${}^7\text{Be}$ важны для ядерной астрофизики, так как эти ядра играют существенную роль в образовании солнечных нейтрино.

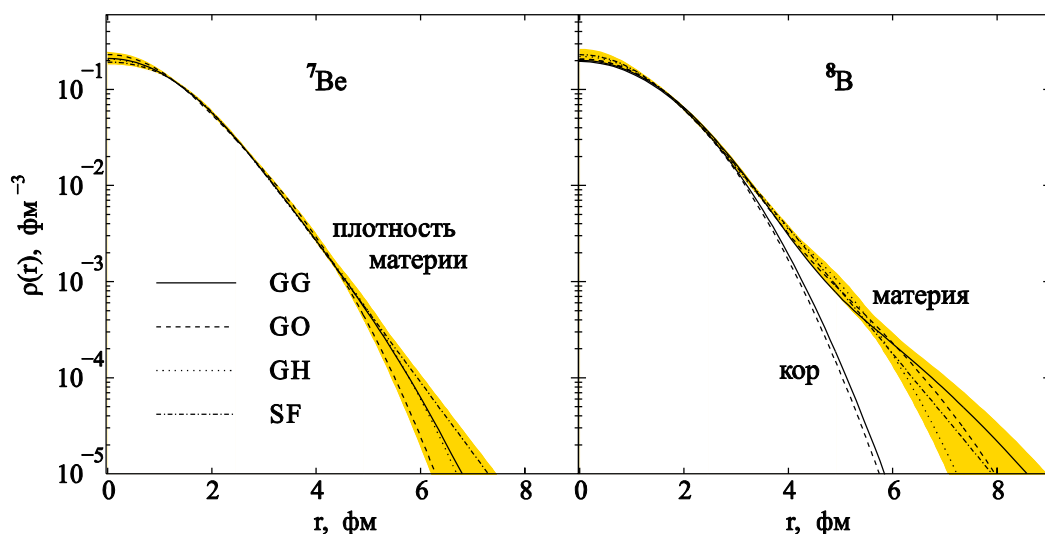


Рис. Распределения плотности материи ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^8\text{B}$, полученные в результате анализа измеренных сечений с использованием параметризаций распределений плотности GG, GO, GH and SF.

Открытие нарушения CP инвариантности в распадах D^0 мезонов

Коллаборация LHCb,

Г.Д. Алхазов, Н.Ф. Бондарь, А.А. Воробьев, Н.И. Воропаев, А.А. Дзюба, К.А. Ившин, А.Г. Инглесси, С.Н. Котряхова, О.Е. Маев, Д.А. Майсузенко, Н.Р. Сагидова, А.Д. Чубыкин – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Поиски новых источников нарушения CP четности важны для понимания эволюции Вселенной в первые секунды после Большого взрыва. Отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении CP инвариантности, является одним из условий, сформулированных А.Д. Сахаровым, необходимых для объяснения образования барионной асимметрии Вселенной. В Стандартной модели физики частиц (СМ) CP инвариантность нарушается в кварковом секторе. Этот эффект связан с ненулевой комплексной фазой элементов матрицы кваркового смешивания (матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы). До 2019 года было экспериментально известно лишь о процессах CP нарушения для превращений кварков «нижнего» типа: d , s , b . Очарованные кварки относятся к кваркам «верхнего» типа: u , c , t . СМ предсказывает малые (порядка 10^{-3} – 10^{-4}) величины эффекта CP нарушения для очарованных частиц.

В 2019 году эксперимент LHCb объявил об обнаружении нарушения CP инвариантности в распадах очарованных D^0 мезонов. Для того, чтобы экспериментально зафиксировать эффект, необходимо было найти различие вероятностей распадов D^0 мезонов и анти- D^0 мезонов для какого-нибудь канала распада. Подсчет начального числа частиц и античастиц осуществлялся при помощи процедуры тегирования. В работе LHCb [1] использовались D мезоны из распадов D^* (заряд π -мезона определял аромат начального состояния) и полуплептонных распадов B мезонов (аромат D^0 мезона определялся по заряду мюона). Для того, чтобы свести к нулю асимметрию детектирования частиц конечного состояния, регистрировались так называемые CP -четные распады: $D^0 \rightarrow K^- K^+$ и $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+$. Для устранения влияния асимметрии рождения D^0 мезонов и асимметрии детектирования тегирующей частицы измерялась разница асимметрий для $K^- K^+$ и $\pi^- \pi^+$ каналов. Отличие от нуля соответствующей наблюдаемой (ΔA_{CP}) свидетельствовало о нарушении CP -симметрии.

В результате измерения получено следующее значение: $\Delta A_{CP}^{\text{exp}} = (-15,4 \pm 2,9) 10^{-4}$, где статистические и систематические погрешности объединены. Таким образом, CP -нарушение зафиксировано на уровне 5,3 стандартных отклонения, что позволяет говорить о первом экспериментальном наблюдении этого эффекта в распадах очарованных частиц.

[1] LHCb Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, 2019, Vol. 122, p. 211803.

Обнаружение трёх новых пентакварковых состояний

Коллаборация LHCb,

Г.Д. Алхазов, Н.Ф. Бондарь, А.А. Воробьев, Н.И. Воропаев, А.А. Дзюба, К.А. Ившин, А.Г. Инглесси, С.Н. Котряхова, О.Е. Маев, Д.А. Майсузенко, Н.Р. Сагидова, А.Д. Чубыкин – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Вследствие конфайнмента кварки и антикварки образуют строго определенные (синглетные по цвету) связанные состояния. Два самых широко распространённых типа адронов – это *барионы* (три валентных кварка) и *мезоны* (пары кварк-антикварк). Теоретически возможно существование и других комбинаций, например, тетракварка (два кварка и два антикварка) или пентакварка (четыре кварка и один антикварк). Большим достижением эксперимента LHCb в 2015 году стало открытие тяжелых пентакварков – частиц, состоящих из четырёх кварков и одного антикварка, причем в их состав входит пара тяжелых кварков – *c* и анти-*c*. Изучался распад $\Lambda_b^0 \rightarrow pK J/\psi$. Результаты модельного и модельно-независимого анализов данных свидетельствовали о наличии промежуточных каналов распада типа $\Lambda_b^0 \rightarrow K P_c^+ (\rightarrow J/\psi p)$.

В 2019 году LHCb опубликовал анализ данных, посвященный поиску промежуточных резонансных пентакварковых состояний со скрытым очарованием в распаде $\Lambda_b^0 \rightarrow pK J/\psi$ [1], используя данные, набранные в ходе второго этапа работы БАК 2015–2018 гг. Набранная статистика увеличилась в 10 раз благодаря возросшей интегральной светимости, увеличению сечения рождения очарованных барионов при переходе к энергии взаимодействия протонов 13 ТэВ, а также благодаря улучшенным алгоритмам отбора событий.

В спектре масс $J/\psi p$ наблюдаются три узких пика (см. рисунок), соответствующие узким резонансам $P_c(4312)^+$, $P_c(4440)^+$ и $P_c(4457)^+$. В результате одномерной аппроксимации спектра масс системы $J/\psi p$ были получены массы, ширины и вклады узких резонансов в распад прелестного бариона. Обнаруженные резонансы имеют массы чуть ниже энергетических порогов образования частиц с открытым очарованием: $\Sigma_c^+ \bar{D}^0$ и $\Sigma_c^+ \bar{D}^{*0}$. Такая близость к энергетическим порогам позволяет интерпретировать эти резонансы как слабосвязанные мезон-барионные состояния. Однако не исключена также возможность интерпретации открытых резонансов как сильносвязанных кластеров.

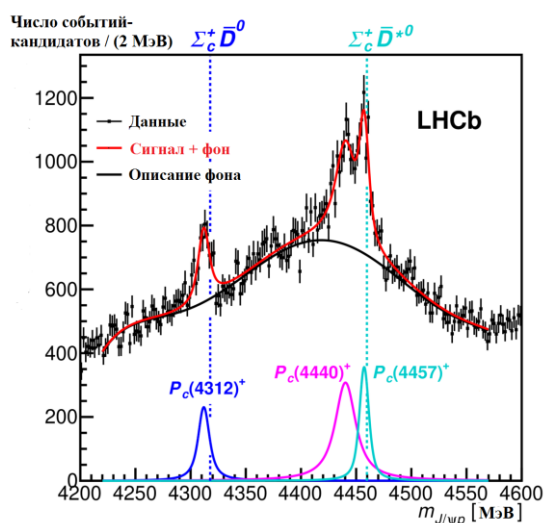


Рис. Спектр массы системы $J/\psi p$. Синими, розовыми и голубыми линиями показаны вклады трёх узких состояний. Вертикальные пунктирные линии соответствуют энергетическим порогам для распада прелестного бариона с испусканием частиц с открытым очарованием.

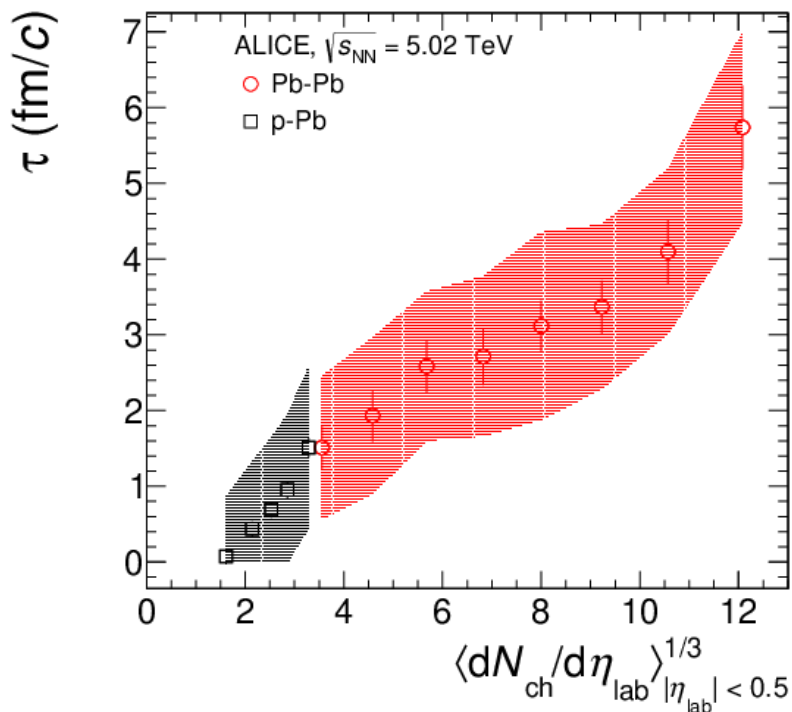
[1] LHCb Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, 2019, Vol. 122, p. 222001.

Хронометрия эволюции плотной адронной среды в центральных столкновениях ультрарелятивистских тяжелых ядер на БАК.

В.В. Иванов, Е.Л. Крышень, А.В. Ханзадеев, М.В. Малаев, В.Н. Никулин,
В.Г. Рябов, Ю.Г. Рябов, В.М. Самсонов, М. Б. Жалов (ПИЯФ, Коллаборация ALICE)

Одним из ключевых параметров при описании эволюции высокотемпературной Кварк-Глюонной Плазмы (КГП), которая формируется в зоне взаимодействия при центральном столкновении ультрарелятивистских ядер, является время жизни τ_A адронной среды, возникающей в процессе адронизации КГП. Оценку этой характеристики можно получить, сравнивая в центральных и периферических столкновениях ядер выходы адронных резонансов, имеющих разное время жизни: ρ -мезонов, каонов, ϕ -мезонов, пионов. Такой анализ был проведен при доминирующем вкладе группы ПИЯФ, изучая столкновения ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}}$ равном 2.76 и 5.02 ТэВ [1,2] в эксперименте ALICE.

На рисунке (e-Print: arXiv:1910.14419 [nucl-ex]) показано полученное время жизни адронной



среды в ядро-ядерном и протон-ядерном столкновении при $\sqrt{s_{NN}}$ равном 5.02 ТэВ в зависимости от множественности рожденных заряженных адронов. Видно, что при большой множественности, характерной для событий с формированием кварк-глюонной плазмы, время жизни достигает значений 6 фм/с, сравнимых с временем жизни КГП.

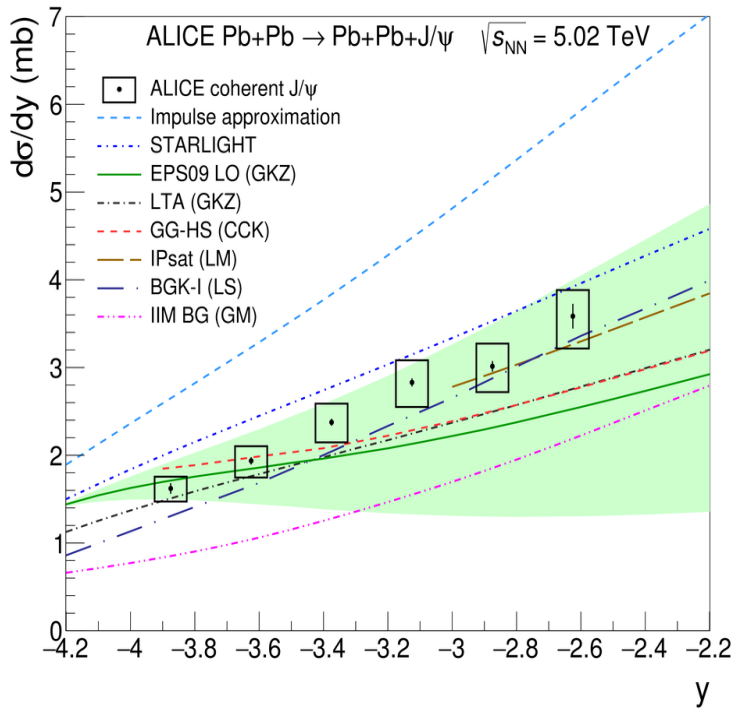
[1]. Production of the $\rho(770)$ meson in pp and PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
Коллаборация ALICE, Phys.Rev. C99 (2019) no.6, 064901

[2]. Evidence of rescattering effect in Pb-Pb collisions at the LHC through production of K(892) and $\phi(1020)$ mesons, Коллаборация ALICE, e-Print: arXiv:1910.14419 [nucl-ex]

Эксклюзивное фоторождение J/Ψ на ядре в ультрапериферических столкновениях при $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ .

В.В. Иванов, Е.Л. Крышень, А.В. Ханзадеев, М.В. Малаев, В.Н. Никулин, В.Г. Рябов, Ю.Г. Рябов, В.М. Самсонов, М.Б. Жалов, В.А. Гузей (ПНПФ, Коллаборация ALICE)

Плотность мягких глюонов в ядрах $G_A(x, \mu^2)$ является ключевым параметром, характеризующим свойства высокотемпературной кварк-глюонной среды, формирующейся в центральных столкновениях ультрарелятивистских ядер. Одним из способов исследования $G_A(x, \mu^2)$ при малых x является изучение процессов фоторождения кваркониев. Эксклюзивное фоторождение векторных мезонов J/Ψ и $\Psi(2S)$ в ультрапериферических столкновениях ядер свинца при $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ ТэВ, показанное на рисунке, измерено коллаборацией ALICE в области быстрот $-4 < y < -2.5$ [1]. Измеренные сечения с разумной точностью согласуются с теоретическими предсказаниями GKZ [2], полученными в лидирующем порядке теории возмущения КХД. Анализ этих данных позволил практически безмодельно определить фактор ядерной экранировки $R_g \approx 0.8 - 0.9$ в области $0.03 < x < 0.07$ при $\mu^2 \approx 3.0$ ГэВ². Кроме того, измеренное отношение сечений фоторождения $\Psi(2S)$ и J/Ψ в этой области x равно $R = 0.150 \pm 0.018(\text{stat.}) \pm 0.021(\text{syst.})$, что в пределах ошибок фактически совпадает с предсказаниями в [2] и с соответствующим отношением сечений на нуклоне, измеренным в



эксперименте HERA. Исходя из этого, можно сделать вывод, что в фоторождении векторных мезонов J/Ψ и $\Psi(2S)$ величины ядерных экранировок отличаются незначительно.

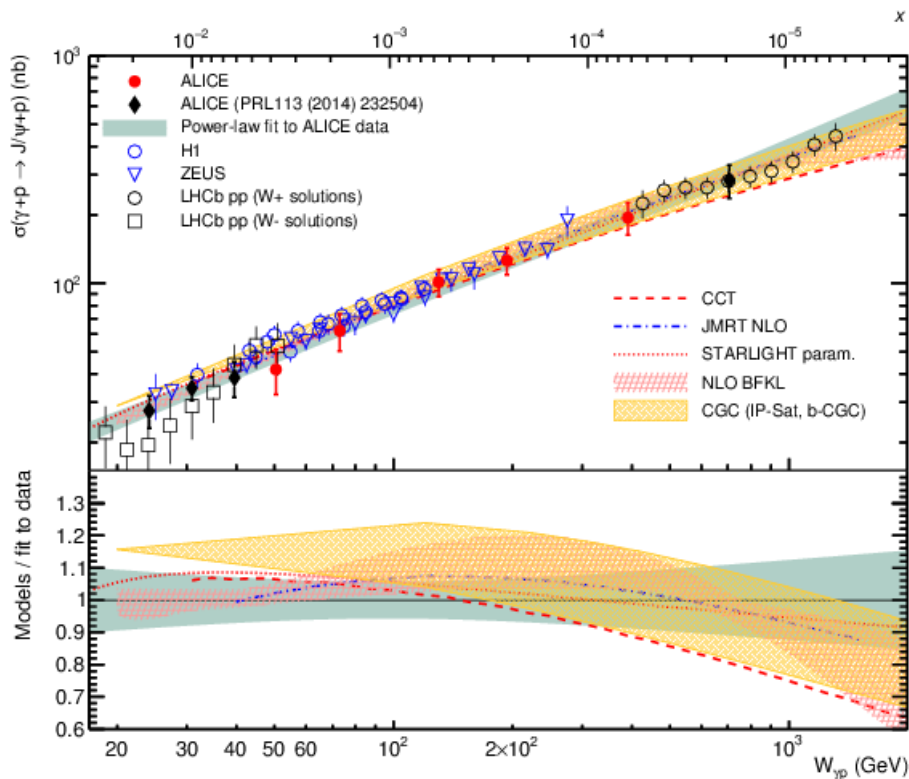
[1] *Coherent J/Ψ photoproduction at forward rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV* Collaboration ALICE Phys.Lett. B758 (2019) 134926.

[2] *Coherent photoproduction of vector mesons in ultraperipheral heavy ion collisions: Update for run 2 at the CERN Large Hadron Collider,* V.Guzey, E.Kryshen, M.Zhalov (PNPI NRCKI) Phys.Rev. C93 (2016) 055206

Фоторождение J/ψ мезонов в ультрапериферических протон-ядерных столкновениях на Большом Адронном Коллайдере

В.В. Иванов, Е.Л. Крышень, А.В. Ханзадеев, М.В. Малаев, В.Н. Никулин, В.Г. Рябов, Ю.Г. Рябов, В.М. Самсонов, М.Б. Жалов, В.А. Гузей (ПИЯФ, Коллаборация ALICE)

Ультрапериферические протон-ядерные столкновения (УПС), в которых релятивистское ядро является интенсивным источником квази-реальных фотонов, а протон - мишенью, позволяют изучать на БАК фотон-протонные взаимодействия при беспрецедентно высоких энергиях. Используя уникальные возможности детектора ALICE, при значительном вкладе группы ПИЯФ, из анализа накопленных данных в 2019 году было определено сечение фоторождения J/ψ на протонах в интервале фотон-протонных энергий от 50 ГэВ до 500 ГэВ [1] (красные точки на рисунке из [1]). В рамках пертурбативной Квантовой Хромодинамики сечение этого процесса определяется плотностью глюонов в протоне. Представленное на рисунке сравнение полученного сечения с теоретическими расчетами, основанными на приближениях NLO BFKL, Color Glass Condensate (CGC) с учетом насыщения глюонных плотностей, позволяет не только существенно ограничить коридор неопределенности в поведении глюонной плотности в нуклоне при малых x , но и способствует прогрессу в понимании фундаментальных свойств физики сильных взаимодействий.



[1] Energy dependence of exclusive J/ψ photoproduction off protons in ultra-peripheral p - Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV Коллаборация ALICE *Eur.Phys.J. C*79 (2019) no.5, 402.

Уменьшение потерь в системе медленного вывода пучка 400 ГэВ/с протонов из ускорителя SPS в CERN путем каналирования части пучка изогнутым кристаллом.

Ю.М. Иванов, Ю.А. Гавриков, Б.Л. Горшков, А.С. Денисов, М.А. Кознов, Л.Г. Маляренко

Совместно с сотрудниками НИЦ КИ ИФВЭ и ЦЕРН подготовлен и выполнен эксперимент по применению изогнутого кристалла для снижения потерь на электродах электростатического септума при выводе пучка из ускорителя SPS. Актуальность работы связана с повышением интенсивности выведенного пучка для проекта SHiP по поиску темной материи.

Предложенное решение проблемы заключается в отклонении узкой области пучка изогнутым кристаллом и создании таким образом «тени» в области проволочных электродов септума (Рис. 1).

Для проведения эксперимента были разработаны кристаллические дефлекторы с

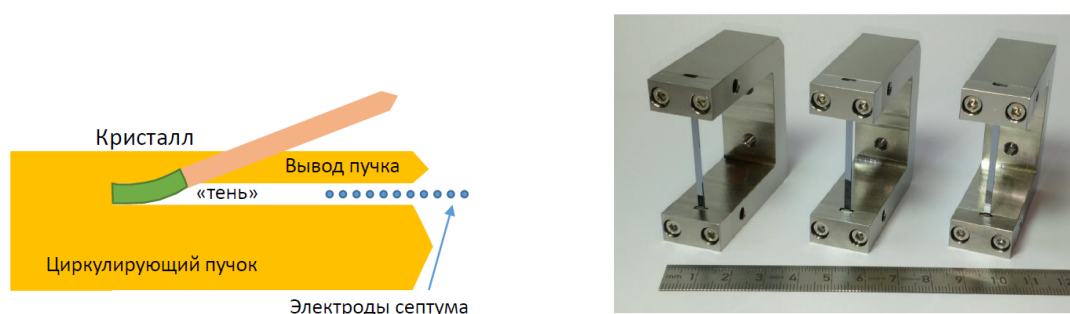
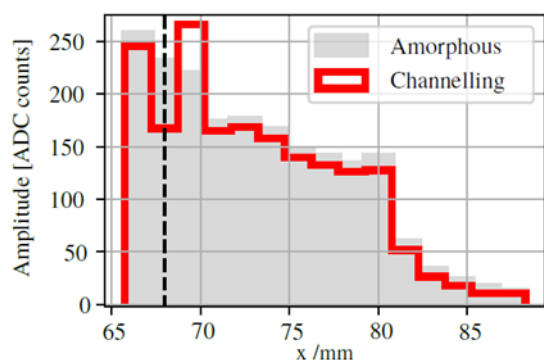


Рис. 1 Схема эксперимента по снижению потерь пучка на электродах электростатического септума ускорителя SPS путем каналирования части пучка изогнутым кристаллом (слева). Кристаллы с антикластическим изгибом, подготовленные в НИЦ КИ ПИЯФ для эксперимента (справа).

оптимальными характеристиками изогнутых кремниевых кристаллов: длина кристаллов вдоль пучка 2.0 мм, ширина поперек пучка 0.8 мм, угол изгиба атомных (110) плоскостей 175 мкрад (Рис. 1).



Анализ экспериментальных данных проволочного профилометра, расположенного между кристаллом и септумом, показал, что в режиме каналирования пучка изогнутым кристаллом образуется тень (Рис. 2), существенно снижающая потери. Результаты работы представлены на конференции IPAC2019 [1, 2].

Рис. 2 Данные с проволочного профилометра

1. L.S. Esposito, P. Bestmann et. al. CRYSTAL FOR SLOW EXTRACTION LOSS-REDUCTION OF THE SPS ELECTROSTATIC SEPTUM, IPAC2019, Melbourne, Australia, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-WEPMP028.

2. F.M. Velotti, P. Bestmann et. al. DEMONSTRATION OF LOSS REDUCTION USING A THIN BENT CRYSTAL TO SHADOW AN ELECTROSTATIC SEPTUM DURING RESONANT SLOW EXTRACTION, IPAC2019, Melbourne, Australia, doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-THXXPLM2.

Изучение свойств бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS

А.А. Воробьев, В.Л. Головцов, В.Т. Грачев, А.Е. Ежилов, Ю.М. Иванов, В.Т. Ким, Е.В. Кузнецова, М.П. Левченко, П.М. Левченко, В.П. Малеев, В.А. Мурзин, Ю.Г. Нарышкин, В.А. Орешкин, Д. Пуджа, И.Б. Смирнов, В.М. Соловьёв, Д.Е. Соснов, В.В. Сулимов, Л.Н. Уваров, О.Л. Федин, Л.А. Щипунов – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Одной из основных задач современной физики высоких энергий является исследование свойств бозона Хиггса Стандартной модели (СМ), открытого в экспериментах ATLAS и CMS в 2012 г. С целью уточнения характеристик бозона Хиггса в 2019 году был продолжен анализ данных, накопленных в экспериментах ATLAS и CMS за первый (2011-2012 гг.) и второй (2015-2018 гг.) периоды работы БАК. В эксперименте ATLAS были измерены парциальные сечения рождения бозона Хиггса в процессах слияния глюонов и векторных бозонов с последующим его распадом $H \rightarrow \tau\tau$: $\sigma(\text{gg} \rightarrow H) \cdot \text{Br} = 3.1 \pm 1.0(\text{стат.}) \pm_{1.3}^{1.6}$ (сист.) пб и $\sigma(\text{WW} \rightarrow H) \cdot \text{Br} = 0.28 \pm 0.09(\text{стат.}) \pm_{0.09}^{0.11}$ (сист.) пб [1], соответственно. В эксперименте CMS было выполнено измерения полного сечения рождения бозона Хиггса, $\sigma_H = 61.1 \pm 6.0(\text{стат.}) \pm 3.7$ (сист.) пб [2] и силы сигнала $\mu = 1.17 \pm 0.10$ [3] с улучшением точности в два раза. Также, CMS и ATLAS уточнили константы связи бозона Хиггса в основных каналах распада: $H \rightarrow ZZ, WW, \gamma\gamma, \tau\tau, bb$ [3,4]. На Рис. 1 показаны значения масштабных факторов k_V и k_F в векторном и фермионном каналах, полученные в CMS [3].

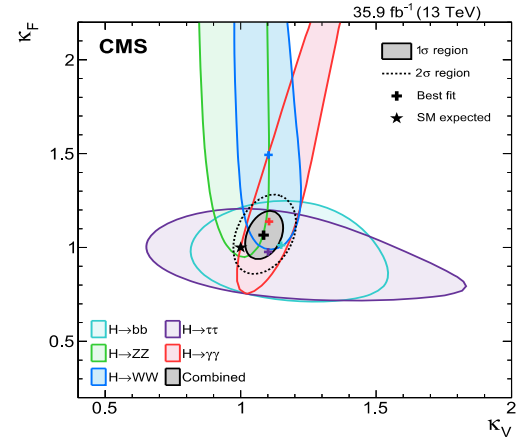


Рис. 1. Значения масштабных факторов k_V и k_F констант связи для различных каналов распадов бозона Хиггса [3].

Важную роль в исследовании свойств бозона Хиггса играют торцевой мюонный детектор (EMU) экспериментальной установки CMS и центральная трековая система экспериментальной установки ATLAS – детектор переходного излучения (TRT), в разработку и создание которых весомый вклад внес ПИЯФ.

[1] ATLAS Collaboration, M. Aaboud, ..., O. Fedin, A. Ezhilov, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, D. Pudzha, V. Schegelsky, V. Solovyev et al., Phys.Rev. D **99** (2019) 072001.

[2] CMS Collaboration, A. Sirunyan, ..., L. Chtchipounov, V. Golovtsov, Yu. Ivanov, V. Kim, E. Kuznetsova, P. Levchenko, V. Murzin, V. Oreshkin, I. Smirnov, D. Sosnov, V. Sulimov, L. Uvarov, A. Vorobyev et al., Phys. Lett. B **792** (2019) 369-396.

[3] CMS Collaboration, A. Sirunyan, ..., L. Chtchipounov, V. Golovtsov, Yu. Ivanov, V. Kim, E. Kuznetsova, P. Levchenko, V. Murzin, V. Oreshkin, I. Smirnov, D. Sosnov, V. Sulimov, L. Uvarov, A. Vorobyev et al., Eur. Phys. J. C **79** (2019) 421-396.

[4] ATLAS Collaboration, G. Aad, ..., O. Fedin, A. Ezhilov, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, D. Pudzha, V. Schegelsky, V. Solovyev, et al., CERN-EP-2019-097, Phys. Rev. D **101** (2020) 012002

Поиск «невидимых» каналов распада бозона Хиггса Стандартной модели в эксперименте ATLAS

А.Е. Ежилов, М.П. Левченко, В.П. Малеев, Ю.Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В.М. Соловьёв,
О.Л. Федин – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ
Коллаборация ATLAS.

В эксперименте ATLAS на Большом Адронном Коллайдере (БАК) выполнен поиск “невидимых” каналов распада бозона Хиггса Стандартной модели (СМ) с целью обнаружения процессов новой физики. “Невидимыми” каналами называются распады бозона Хиггса на частицы, которые не могут быть зарегистрированы детектором, такие как нейтралино, гравискаляр, майорон, нейтрино, или частицы темной материи (ТМ). Признаком таких событий является наличие большой “недостающей” поперечной энергии. В данной работе проводился поиск “невидимых” распадов бозона Хиггса для процессов его рождения через

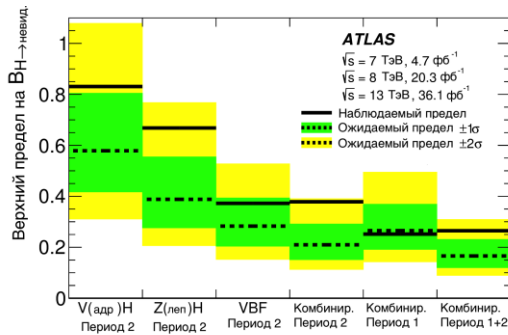


Рис. 1. Верхние пределы для вероятности распада бозона Хиггса СМ по “невидимому” каналу, полученные в эксперименте ATLAS.

слияния векторных бозонов и ассоциативного рождения с W- и Z-бозонами ($Z(\rightarrow \ell\ell)+H$, и $W/Z(\rightarrow \text{адроны})+H$). По результатам анализа данных, накопленных в первом периоде работы БАК (2011-2012 гг.) при энергии pp столкновений $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ и полной светимости 4.7 и 20.3 фб^{-1} и части второго периода набора данных (2015-2016 гг.) при энергии pp столкновений $\sqrt{s} = 13$ ТэВ и светимости 36.1 фб^{-1} , получены ограничения для вероятности распада бозона Хиггса СМ по “невидимому” каналу (см. Рис. 1). На основе комбинирования результатов для разных механизмов рождения бозона Хиггса и

периодов набора данных получен наблюдаемый (ожидаемый) предел вероятности распада бозона Хиггса СМ по “невидимому” каналу 0.26 ($0.17_{-0.05}^{+0.07}$) с уровнем достоверности (CL) 95%, а также установлен предел на сечение распада бозона Хиггса на частицы ТМ. Используя модель, в которой считается, что только бозон Хиггса является медиатором между частицами СМ и ТМ были получены ограничения на сечения рассеяния частиц ТМ на ядрах, которые в интервале масс частиц ТМ $0 - 10$ ГэВ оказались более строгими в эксперименте ATLAS $\sigma < (0.9-3.0) \cdot 10^{-7} \text{ fb}$, чем результаты экспериментов по прямому поиску частиц ТМ.

[1] M. Aaboud, ..., O. Fedin, A. Ezhilov, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, D. Pudzha, V. Schegelsky, V. Solovyev, et al., ATLAS Collaboration, “Combination of searches for invisible Higgs boson decays with the ATLAS experiment”, *Phys.Rev.Lett.* 122 (2019) no.23, 231801.

Высокопрецизионные измерения масс нуклидов на ловушке PENTATRAP

С.А. Елисеев, Ю.Н. Новиков, П.Е. Филянин, О.И. Безроднова – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт»- ПИЯФ и группа PENTATRAP.

Для измерений весьма тонких эффектов, необходимых для решения ряда фундаментальных вопросов современной физики, требуется гораздо большая точность определения физических величин, чем та, которую обеспечивают существующие ионные ловушки. Одной из этих проблем является изучение свойств нейтрино, которой была посвящена деятельность нашей группы в проекте SHIPTRAP в предыдущие годы.

В 2018 г. в институте М. Планка в Хайдельберге была запущена новая система PENTATRAP, состоящая из 5 ловушек Пеннинга, в создании которой активно участвовала Лаборатория Физики Экзотических Ядер ОФВЭ ПИЯФ. Первые стартовые эксперименты показали, что точность прямого измерения масс $\delta M/M$ составляет величину 3×10^{-11} , что на два порядка улучшает точность, достигнутую на SHIPTRAP и других аналогичных установках ($\approx 10^{-9}$).

В 2019 г. были начаты рабочие измерения масс различных изотопов ксенона, призванные впоследствии быть использованными для калибровочных измерений в ультра-прецизионной масс-спектрометрии.

Эксперимент по измерению разницы масс ^{187}Re - ^{187}Os на PENTATRAP в 2019 году привел к точности 3 эВ, что закладывает хороший фундамент для определения массы антинейтрино. Дальнейшее уточнение этого значения в полномасштабном эксперименте коллаборации ECHO позволит рассматривать эту пару нуклидов как дополняющую тритиевый эксперимент KATRIN. Сравнение полученных нами на PENTATRAP значений разности масс совпадают с измерениями энергий распада для ^{187}Re методами криогенной микрокалориметрии и ещё раз подтверждают возможность определения массы нейтрино с использованием болометров.

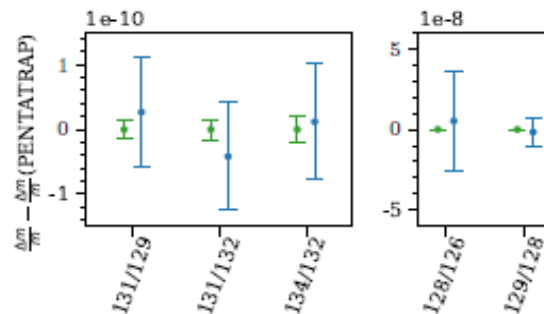


Рис.. Сравнение разностей относительных погрешностей для набора изотопов ксенона с массовыми числами от $A=126$ до $A=132$ по сравнению с литературными данными (и самыми точными в масс-спектрометрии), свидетельствующее о достижении ультра-прецизионной точности. Слева в каждой паре показаны данные PENTATRAP.

Измерения масс сверхтяжёлых элементов на установке SHIPTRAP

С.А. Елисеев, Н.С. Мартынова, Ю.Н. Новиков, П.Е. Филянин, С.В. Ченмарев – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» -ПИЯФ и SHIPTRAP-collaboration

Прямые измерения масс нуклидов трансурановых элементов являются основным направлением деятельности на установке SHIPTRAP, которая, является единственной в мире системой, на которой можно осуществить такие измерения. Эта установка базируется на линейном ускорителе UNILAC, с помощью которого в реакции слияния ионов синтезируются нуклиды сверхтяжёлых элементов. Селектор скоростей SHIP выделяет интересующие для измерений масс нуклиды. В появившейся возможности выхода на пучок ускорителя летом 2018 года были выполнены эксперименты по прямому измерению масс трансфермиевых нуклидов No, Lr и Rf. Эксперимент проходил в модифицированной конфигурации расположения всей системы по отношению к направлению пучка с использованием криогенной камеры торможения пучка, разработанной нашей группой, и нового метода фазового отображения, внедрённого ранее С.А. Елисеевым для определения резонансной частоты. В 2019 г. выполнена обработка и анализ данных, приведшие к получению конкретных количественных результатов. Полученные значения масс нуклидов $^{251-254}\text{No}$, $^{254-256}\text{Lr}$ и ^{257}Rf позволили по известным цепочкам альфа-распадов воспроизвести часть ландшафта сверхтяжёлых нуклидов вплоть до элемента дармштадтия ($Z=110$). Это привело к возможности определения величин щелей в оболочечной структуре, ответственной за стабилизирующие факторы в нуклидах сверхтяжёлых элементов. Данные о ландшафте массовой поверхности, полученные нами и отражённые на рисунке, показывают выделенность чисел нейтронов $N=152$ и $N=162$ в нуклидах, которые характеризуют «квазимагичность» с этим числом нейтронов и приводят к выводу о наличии малых островов стабильности, возникающих на подступах к предполагаемому острову устойчивости сверхтяжёлых элементов, которое получило прямое экспериментальное подтверждение опытами на SHIPTRAP. Другим интересным результатом было прямое измерение масс ряда изомерных состояний.

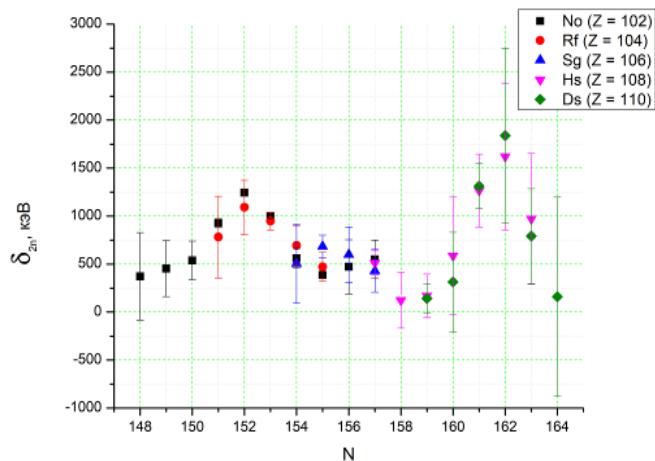


Рис.1. Величины оболочечной щели для трансфермиевых нуклидов в зависимости от числа нейтронов.

Поиск тяжелых векторных бозонов в эксперименте ATLAS

А. Е. Ежилов, М. П. Левченко, В. П. Малеев, Ю. Г. Нарышкин, Д. Пуджа, В. М. Соловьев, О. Л. Федин, В. А. Щегельский – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

В эксперименте ATLAS, с целью поиска явлений новой физики, продолжен поиск тяжелых, с массами более 1 ТэВ, заряженных, W' , и нейтральных, Z' , векторных бозонов, существование которых предсказывается в ряде моделей, расширяющих Стандартную модель (СМ).

Поиск W' - и Z' -бозонов осуществлялся в каналах их распада $W' \rightarrow l\nu$ и $Z' \rightarrow ll$, где l обозначает электрон или мюон, а ν – нейтрино. Для исследования использовались данные, накопленные в эксперименте ATLAS за второй период работы (2015-2018 гг.) Большого адронного коллайдера при энергии сталкивающихся протонов 13 ТэВ и соответствующие интегральной светимости 139 фб^{-1} .

В случае отсутствия сигнала для оценки верхних пределов на сечение рождения таких бозонов в качестве базовой модели использовалась Sequential Standard Model (SSM). В этой модели константы взаимодействия W' - и Z' -бозонов с фермионами совпадают с

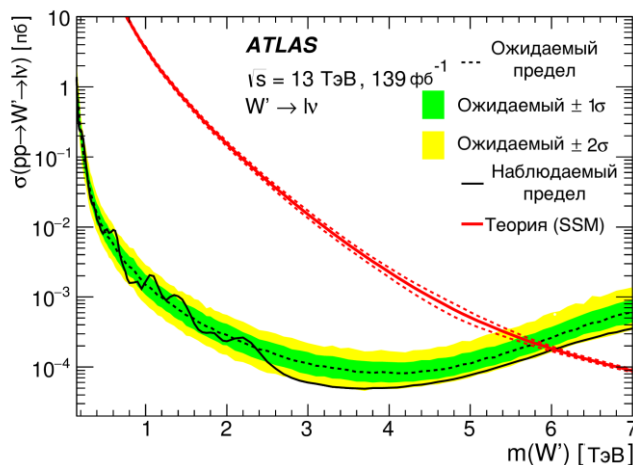


Рис. 1. Наблюдаемые и ожидаемые верхние пределы на сечения рождения SSM W' -бозонов в зависимости от их массы, установленные на уровне достоверности 95% для объединения электронного и мюонного каналов. Также показано теоретическое сечение (с ошибками) рождения SSM W' -бозонов.

аналогичными константами взаимодействия для W - и Z -бозонов СМ. Ширина распада W' - и Z' -бозонов, Γ , в данной модели линейно возрастает с их массой, m . При этом величина отношения Γ/m составляет 3%, что соответствует случаю W - и Z -бозонов СМ.

В результате проведенного исследования статистически значимого отклонения данных от предсказания СМ обнаружено не было. В отсутствие зарегистрированного сигнала от распада тяжелых векторных бозонов были установлены пределы на сечения процессов $pp \rightarrow W' \rightarrow l\nu$ (см. рис. 1) и $pp \rightarrow Z' \rightarrow ll$ в зависимости от масс бозонов W' и Z' на уровне достоверности 95%. Существование SSM W' - и Z' -бозонов с массами ниже 6,0 и 5,1 ТэВ соответственно было исключено на уровне достоверности 95%. Результаты измерений опубликованы в статьях [1, 2].

[1] G. Aad, ..., O. Fedin, A. Ezhilov, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, V. Schegelsky, V. Solovyev, et.al., ATLAS Collaboration, *Phys. Rev. D*, 2019, Vol. **100**, No. 5, p. 052013

[2] G. Aad, ..., O. Fedin, A. Ezhilov, M. Levchenko, V. Maleev, Yu. Naryshkin, V. Schegelsky, V. Solovyev, et.al., ATLAS Collaboration, *Phys. Lett. B*, 2019, Vol. **796**, pp. 68 – 87.

Разработка проекта масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА

В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Л.Х. Батист, В.С. Иванов, Д.В. Федоров, П.Л. Молканов, М.Д. Селиверстов — Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ

Создание масс-сепараторного лазерно-ядерного комплекса ИРИНА (Исследование Радиоактивных Изотопов на Нейтронах) производится в рамках реализации Проекта «Создание приборной базы реакторного комплекса ПИК» [1]. На рис.1 показана часть комплекса, включающая масс-сепаратор, ионные тракты, детектирующие системы и установку ПИТРАП — систему ловушек Пеннинга для прецизионного измерения масс удаленных ядер. Комплекс ИРИНА на канале реактора ПИК позволит проводить уникальные эксперименты по исследованию свойств крайне удаленных от полосы бета-стабильности экзотических ядер, получать и использовать радиоактивные изотопы для исследований по физике твердого тела и разрабатывать новые методы получения изотопов высокой чистоты для медицины. Данная установка будет обеспечивать самые высокие в мире выходы нейтронно-избыточных ядер. Комплекс ИРИНА представляет собой совокупность высокотехнологичного оборудования, размещенного в канале и в экспериментальном зале реактора ПИК.

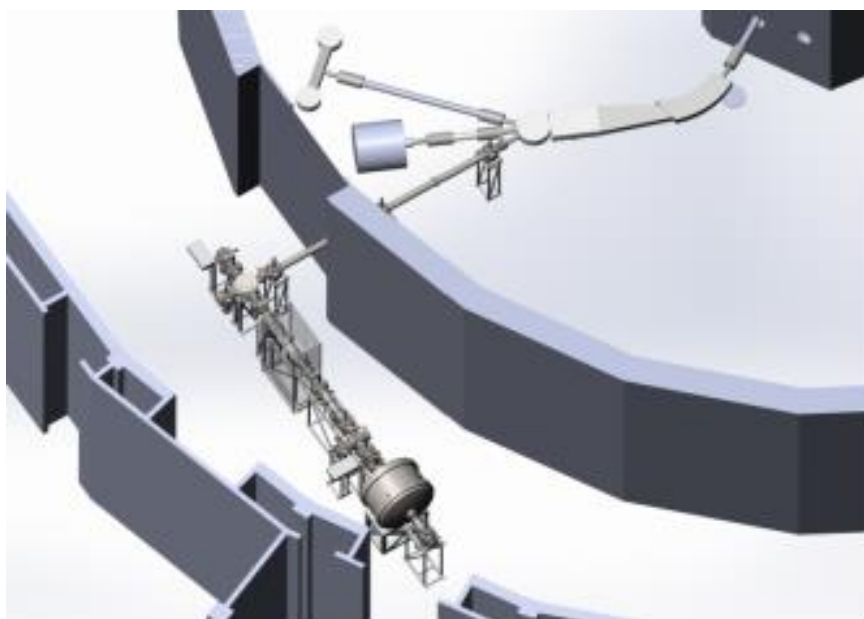


Рис. 1. Схема комплекса ИРИНА.

В настоящее время подготовлены и согласованы с потенциальными изготовителями технические задания на все основные узлы установки — внутриканальную ионооптическую систему масс-сепаратора, масс-сепаратор с ионными трактами, систему ловушек Пеннинга для прецизионного измерения масс нейтронно-избыточных ядер, лазерную установку и горячую камеру специальной конструкции.

[1]. V.N. Panteleev et al, "PROJECT IRINA AT THE REACTOR PIK", High Energy Physics Division: Main scientific Activities 2013-2018, Gatchina, 2019, p. 336.

Исследование нейтронно-избыточных ядер астата в лазерном ионном источнике на установке ISOLDE (CERN): оболочечный эффект и инверсия четно-нечетного эффекта

А.Е. Барзах, Д.В. Федоров, П.Л. Молканов, М.Д. Селиверстов — Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ

Методом лазерной ионизационной спектроскопии в ионном источнике установки ISOLDE проведены измерения изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления атомных уровней радиоактивных изотопов $^{217,218,219}\text{At}$ на атомном переходе $\lambda = 795.4$ нм. Получены значения изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов ($\delta\langle r^2 \rangle$) магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов исследованных ядер [1].

На рис. 1 показаны изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов ядер астата в окрестности $N = 126$. Хорошо виден излом в изотопической зависимости $\delta\langle r^2 \rangle$ при $N = 126$. Это явление называется оболочечным эффектом. Описание этого эффекта в последнее время рассматривается как важнейший критерий состоятельности ядерных моделей. Полученная информация об оболочечном эффекте у изотопов астата позволит наложить дополнительные ограничения на выбор модели ядра.

Четно-нечетный эффект в зарядовых радиусах ядер — отличие радиуса нечетно-нейтронного ядра от среднего значения радиусов его четно-нейтронных соседей — описывается параметром γ_N :

$$\gamma_N = \frac{2\delta\langle r^2 \rangle_{N-1, N}}{\langle r^2 \rangle_{N-1, N+1}},$$

где N — нечетное число нейтронов. Если этот параметр меньше 1, то имеет место нормальный четно-нечетный эффект (наблюдаемый для подавляющего большинства ядер), если больше 1, — обратный четно-нечетный эффект. Как видно из рис. 2, для изотопов Fr, Ra и Rn с $133 < N < 137$, ранее был обнаружен обратный четно-нечетный эффект ($\gamma_N > 1$). Нами установлено, что для изотопов $^{217-219}\text{At}$ ($N = 132-134$) также наблюдается обратный четно-нечетный эффект. Ранее было

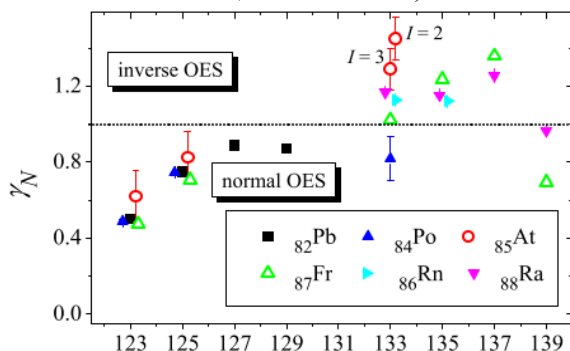


Рис. 2. Параметр четно-нечетного эффекта для ядер в районе свинца.

модели.

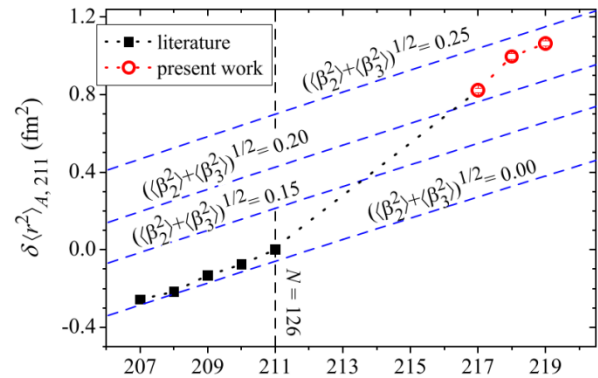


Рис. 1. Изменения среднеквадратичных зарядовых радиусов изотопов астата вблизи $N = 126$.

показано, что обратный четно-нечетный эффект коррелирован с октупольной деформированностью соответствующих ядер. Таким образом, новые данные указывают на возможное наличие октупольной деформации по крайней мере у ^{218}At . Этот вывод подтверждается также анализом магнитных моментов ядер астата, измеренных в нашем эксперименте. Ранее ядра астата считались лежащими вне предполагаемой области октупольной деформации. Исследование октупольно деформированных ядер — одно из актуальных направлений современной ядерной физики в связи с использованием этих ядер для поиска T- и P-нечетных эффектов, описание которых выходит за рамки Стандартной

Разработка высокотемпературного метода выделения радионуклидов альфа-эмиттеров из мишени карбида тория

В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Ю.М. Волков, В.С. Иванов, С.Ю. Орлов, Д.В. Федоров, П.Л. Молканов, М.Д. Селиверстов – Отделение физики высоких энергий НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ

Радионуклиды альфа-эмиттеры являются хорошим инструментом для лечения различных злокачественных образований на раннем этапе их развития. Среди используемых радионуклидов можно выделить изотопы $^{223,224}\text{Ra}$, ^{225}Ac . Указанные изотопы предполагается получать при облучении мишени из карбида тория (ThC) высокой плотности на радиоизотопном комплексе РИЦ-80 [1]. Эксперименты по получению и выделению радионуклида ^{224}Ra проводились на пучке синхроциклотрона СЦ-1000. Альфа-спектр ^{224}Ra , высаженного на охлаждаемый коллектор, показан на Рис.1. Разработанный высокотемпературный метод выделения обеспечивает следующие преимущества по сравнению с используемыми в настоящее время радиохимическими методами: 1) высокую изотопическую чистоту ^{224}Ra ; 2) отсутствие жидких радиоактивных отходов; 3) многократное использование одной и той же мишени. В настоящих исследованиях определены температурные параметры, при которых данное мишенное вещество будет использовано для селективного выделения ^{224}Ra масс-сепараторным методом. Получены следующие результаты: при рабочей температуре мишенного вещества 1550 - 1700°C атомы радия выделяются из мишенного вещества с эффективностью около 80% за время нагрева равное одному часу. Рабочий вакуум в вакуумной камере в процессе выделения составляет величину лучше 10^{-5} мбар, что гарантирует высокоэффективное функционирование мишенно-ионного устройства масс-сепаратора.

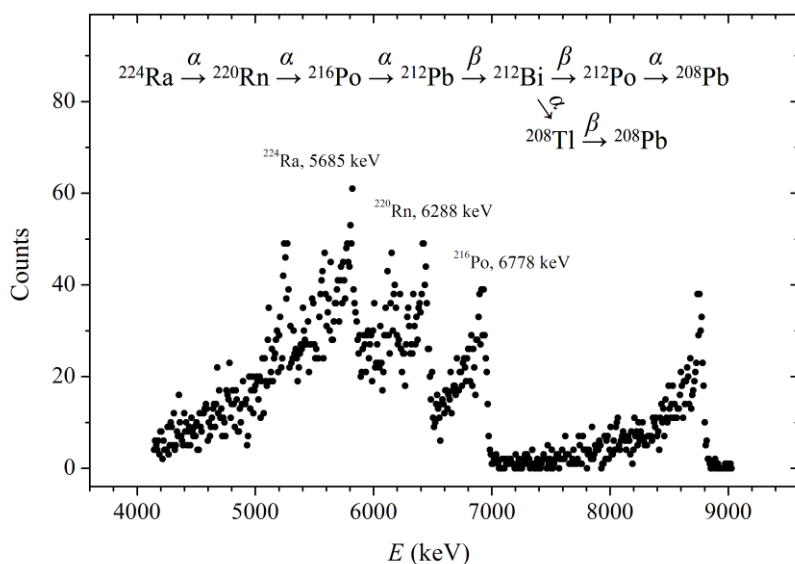


Рис. 1. Альфа-спектр распада нуклида ^{224}Ra с альфа-линиями его дочерних изотопов, измеренный на охлаждаемом коллекторе при температуре мишенного вещества 1500 °C.

[1]. V.N. Panteleev, et al., Development of high temperature and mass-separation methods for selective production of medical radionuclides, INTERNATIONAL CONFERENCE ON RADIATION APPLICATIONS (RAP 2019) 16–19.09.2019 / 88 ROOMS HOTEL / BELGRADE / SERBIA / www.rap-conference.org