

Отзыв научного руководителя на диссертационную работу

Дмитриевой Ульяны Александровны

«Изучение ультрапериферических столкновений ядер на коллайдерах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 — физика атомного ядра и элементарных частиц

В диссертации Дмитриевой Ульяны Александровны представлены научные результаты, полученные ею во время работы в Лаборатории релятивистской ядерной физики Института ядерных исследований РАН с 2016 по 2022 годы. Уже в бакалавриате МФТИ в 2015 году у У. А. Дмитриевой сформировался интерес к изучению электромагнитных взаимодействий релятивистских ядер в их ультрапериферических столкновениях (УПС), приводящих к электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер. В таких столкновениях адронные взаимодействия с участием короткодействующих ядерных сил полностью исключены благодаря прицельным параметрам, превышающим сумму радиусов ядер. Особенностью УПС релятивистских ядер является небольшая множественность вторичных частиц и ядерных фрагментов. При этом в столкновениях тяжелых ядер высоких энергий полные сечения электромагнитных процессов в десятки раз превосходят полное сечение адронного взаимодействия тех же ядер. Помимо академического интереса к изучению возбуждения ядер рекордно лорентц-сжатыми кулоновскими полями и сопутствующих им процессов, актуальность исследования УПС в коллайдерах ядро-ядро связана с решением ряда практических задач. Среди них можно отметить необходимость оценки выходов определённых вторичных ионов, являющихся продуктами электромагнитных взаимодействий, которые могут воздействовать на элементы ускорителя. При этом УПС существенно ограничивают время жизни пучков тяжелых ядер в коллайдерах.

Для решения поставленных задач, во-первых, было решено исследовать УПС ядер теоретически, моделируя события ЭМД, приводящие к эмиссии ядрами нейтронов и протонов вперёд в результате фотоядерных реакций под действием эквивалентных фотонов. Во-вторых, было запланировано изучение ЭМД в УПС ядер свинца в эксперименте ALICE на LHC. Активным участником этой коллаборации У. А. Дмитриева стала ещё в бакалавриате. Помимо анализа данных передних калориметров, выполненного в рамках настоящей диссертационной работы, она неоднократно принимала участие в дежурствах во время сеансов сбора данных ALICE, будучи ответственной (on-call) по детектору T0, отвечала за контроль качества получаемых с этого детектора данных. Таким образом, ею был сделан весомый личный вклад в последующие публикации коллаборации ALICE.

Успешная работа по исследованию УПС ядер была продолжена У. А. Дмитриевой в магистратуре, которая завершилась защитой ВКР с наивысшей оценкой. Имея хороший научный задел, в 2018 году У. А. Дмитриева поступила в очную аспирантуру МФТИ и одновременно была принята в ИЯИ РАН на должность стажера-исследователя. Благодаря эффективной работе, уже в первые месяцы аспирантуры У. А. Дмитриевой была опубликована в Nucl. Instr. Meth. A первая статья, заложившая прочный фундамент диссертации в отношении запланированного на LHC измерения сечений ЭМД. В этой публикации на основе предсказаний модели RELDIS был сформулирован обобщённый вероятностный метод учета эффективности регистрации многонуклонных событий ЭМД в передних калориметрах и обосновано его применение для измерений в экспериментах на LHC и NICA.

Одновременно с анализом данных эксперимента ALICE, с помощью модели RELDIS У. А. Дмитриевой были вычислены разнообразные характеристики вторичных ядер,

образующихся в результате ЭМД ядер на LHC, NICA и будущем адронном коллайдере FCC-hh. В работе, опубликованной в Acta Phys. Pol., были убедительно показаны преимущества столкновений средних по массе ядер индия в сравнении со столкновениями ядер свинца в отношении соотношений электромагнитных и адронных событий на FCC-hh. Образующиеся вторичные ядра были классифицированы по величине сечения их образования и близости их Z/A-отношения к аналогичному отношению у первичных ядер, что важно для оценки вероятности транспортировки их магнитным полем вблизи ядер пучка и невозможности удаления их системой коллиматоров ускорителей. У. А. Дмитриевой была проведена большая работа по соотнесению сечений эмиссии нуклонов и сечений образования определённых вторичных ядер в результате ЭМД, была теоретически обоснована возможность оценки сечений выходов ядер путем детектирования сопутствующих их образованию нейтронов и протонов. Было показано, что благодаря небольшой энергии возбуждения ядер в их электромагнитных взаимодействиях, в большинстве событий ЭМД конечное состояние представлено одним ядром-остатком и несколькими свободными нуклонами. Был также показан малый вклад электроделения ядер, что говорит в пользу доминирования образования одиночного остаточного ядра. Следует подчеркнуть, что прямое детектирование вторичных ядер с идентификацией их зарядов и массы на LHC невозможно, поэтому полученные У. А. Дмитриевой теоретические результаты убедительно обосновали реализованный ею в дальнейшем метод оценки выходов вторичных ядер на основе измеренных сечений эмиссии нуклонов.

В большом количестве публикаций разных авторов рассматривалась ЭМД ядер в результате превышения энергии их возбуждения над энергией связи нейтрона. Но важно отметить, что возбуждения дискретных уровней релятивистских ядер, сталкивающихся в коллайдерах, с последующей эмиссией гамма-квантов, рассматривались только в двух работах. В них такие возбуждения связывались с рождением электрон-позитронных пар при взаимодействии фотонов. При этом самый простой процесс, аналогичный ядерной резонансной флуоресценции (ЯРФ), известной из ядерной физики низких энергий, на удивление, никем ранее не рассматривался. Теория ЯРФ под действием эквивалентных фотонов, разработанная У. А. Дмитриевой, была блестяще изложена ею в работе, опубликованной в Eur. Phys. J. А. Вычисленные ею в аналитическом виде распределения фотонов от ЯРФ ядер ^{208}Pb , происходящей в результате УПС на LHC и на проектируемом коллайдере FCC-hh, показывают так называемый прожекторный эффект, имеют компактную и удобную для дальнейших применений форму. Они позволяют оценить загрузку передних детекторов от излучаемых ядрами вторичных фотонов.

У. А. Дмитриевой методом Монте-Карло было выполнено моделирование эмиссии нейтронов и протонов в результате ЭМД ядер ^{208}Pb в УПС на LHC, и их транспорт в установке ALICE. Был вычислен отклик передних адронных калориметров Zero Degree Calorimeters (ZDC) ALICE и поправки на эффективность регистрации в них нуклонов для каждой отдельной множественности (от 1 до 5 нейтронов и от 0 до 3 протонов). Для расчета эффективности ею были разработаны три независимых метода вычисления поправочных коэффициентов, применяемых индивидуально для каждой множественности нуклонов. Их результаты в целом согласуются с результатами обобщённого вероятностного метода, служат подтверждением его достоверности.

С учетом результатов моделирования эффективностей ZDC У. А. Дмитриевой был выполнен анализ данных по выходам нуклонов от ЭМД ядер ^{208}Pb в эксперименте ALICE на LHC. Ею были измерены сечения эмиссии определённого количества – от одного до пяти – нейтронов без сопровождения протонами в ЭМД. Сечения неплохо согласуются с предсказаниями модели RELDIS и позволяют оценить сечения образования соответствующих остаточных ядер: $^{203,204,205,206,207}\text{Pb}$. Известно, что такие ядра могут оказывать

воздействие на элементы ЛНС, поэтому работа имеет большую практическую ценность. Полученные У. А. Дмитриевой данные по сечениям эмиссии нейтронов в результате ЭМД позволяют проверить предсказания моделей ЭМД и оценить выходы вторичных ядер на ЛНС, которые могут влиять на работу ускорителя.

Полученные экспериментальные результаты и детали обработки данных были представлены У. А. Дмитриевой на нескольких совещаниях рабочей группы UPC по ультрапериферическим столкновениям в коллаборации ALICE. По результатам измерений сечений эмиссии нейтронов была подготовлена статья «Neutron emission in ultraperipheral Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV», которая одобрена группой UPC и направлена на завершающее рецензирование в коллаборации ALICE, прошла его первый раунд, а затем будет направлена в журнал Phys. Rev C. Следует сказать о том, что, по моему мнению, выделяет диссертационную работу У. А. Дмитриевой на фоне других известных мне кандидатских диссертаций. Стоит отметить разнообразие использованных методов для оценки эффективности и акцептанса передних калориметров ALICE. Разница в результатах этих методов дает основу для надежной оценки систематических ошибок выполненных измерений. Не в каждой диссертации можно найти всестороннее осмысление, интерпретацию и детальную сверку результатов различных вариантов Монте-Карло моделирования с разработанной самим автором аналитической моделью. Разработанная У. А. Дмитриевой аналитическая модель позволяет количественно объяснить миграцию истинных многочастичных событий к регистрируемым событиям с меньшей множественностью. Наконец, можно высоко оценить широкий охват физических явлений, связанных с электромагнитными возбуждениями ядер: рассмотрение как ЭМД, так и ЯРФ, в результате которых образуются вылетающие вперед нуклоны и фотоны.

Я считаю диссертацию Дмитриевой Ульяны Александровны законченным научным трудом, в котором всесторонне исследованы процессы электромагнитных взаимодействий ядер на коллайдерах ЛНС, NICA и будущем адронном коллайдере FCC-hh. В диссертационной работе получен ряд важных результатов, которые могут быть использованы при планировании следующих экспериментов по ядро-ядерным столкновениям и учтены в ходе проектирования FCC-hh. В процессе работы над диссертацией У. А. Дмитриева показала себя высококвалифицированным исследователем с широким кругом научных интересов. Она обладает прочными навыками как теоретических, так и экспериментальных исследований. Её работу характеризует тщательность, аккуратность, стремление выполнить разнообразные, независимые друг от друга проверки конечного результата. Считаю, что представленная к защите диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Дмитриева У. А. безусловно заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

3 июня 2022 года

Научный руководитель
ведущий научный сотрудник ИЯИ РАН
доктор физ.-мат. наук

И.А. Пшеничнов

Подпись И.А. Пшеничнова удостоверяю
заместитель директора по научной работе ИЯИ РАН
кандидат физ.-мат. наук

А.Г. Панин