

УДК 539.17.013

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА, ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЙ (ПО МАТЕРИАЛАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ “ЯДРО-2020”)

© 2021 г. А. К. Власников^{1, *}, В. И. Жеребчевский¹, Т. В. Лазарева¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: a.vlasnikov@spbu.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 28.12.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

Обсуждаются наиболее перспективные направления развития ядерной физики и физики элементарных частиц. Одно из них сводится к синтезу достижений ядерной физики и нано-, био-, информационных и социальных наук для создания природоподобных технологий и углубления представлений о человеке (НБИКС-парадигма). Второе – переход к сверхвысоким энергиям и экзотическим состояниям вещества (пример – кварк-глюонная плазма). Доклады на 70-й конференции по ядерной физике дают для этого обсуждения обширный материал.

DOI: 10.31857/S0367676521050276

С 12 по 17 октября 2020 г. в Санкт-Петербургском государственном университете проходила LXX международная конференция по ядерной физике “Ядро-2020. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии”. Эта конференция является уникальнейшим явлением не только на пространстве бывшего Советского Союза, но и среди всех проводимых ныне конференций. С 1951 г. без единого перерыва ежегодно проходит крупнейший научный форум, собирающий ведущих ученых со всего мира. Его предшественниками были всесоюзные конференции по атомному ядру (Ленинград, 1933 г., Москва, 1935 г.) и совещания по физике атомного ядра (Ленинград, 1938 г., Харьков, 1939 г., Москва, 1940 г.). Великая Отечественная война прервала складывавшуюся тенденцию проведения ежегодных ядерно-физических конференций. И только в феврале 1951 г. в небольшом зале Президиума Академии наук СССР в Москве состоялось 1-е Совещание по ядерной физике [1], которому стало суждено прожить долгую и славную жизнь. Многие годы оргкомитет Совещания возглавлял член-корреспондент Академии наук СССР Борис Сергеевич Желепов. Благодаря его авторитету, энергии и организаторскому таланту конференции стали ежегодными, причем проводились они в разных городах, что способствовало развитию ядерной физики в стране. И хотя многие годы конференция называлась “Совещанием по ядерной спектроскопии”, ее тематика становилась заметно

шире. Ведь в стране не было других ежегодных конференций, на которых физики-ядерщики могли обсудить актуальные проблемы развития науки. Со временем название конференции изменилось на “Всесоюзное совещание по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра”. С 1960 г. мероприятие де-факто стало международным, хотя по-прежнему называлось всесоюзным. В начале 2000-х в названии конференции прочно закрепились слово “Ядро” и год проведения. Судьба конференции во многом повторяет судьбу развития в нашей стране науки вообще и ядерной физики в частности. Численность представленных тезисов докладов в периоды 1951–1970 гг. (рис. 1а) и 1990–2020 гг. (рис. 1б) хорошо иллюстрирует развитие советской и российской ядерной физики. Стремительный подъем первых двух десятилетий сменился на тенденцию к снижению с начала 1990-х. Однако в последнее пятилетие намечается рост. Пусть и не равномерный, но он дает надежду на восстановление роли науки в современном обществе.

Конференция 2020 г. уникальна. И не только потому, что она 70-я по счету. И не потому, что в ней приняли участие большое количество ученых. Она уникальна еще и необычностью условий, в которых проходила. Коронавирусная инфекция сделала невозможным очный формат проведения конференции. За относительно короткое время удалось создать команду, способную успешно провести крупнейшее совещание в

on-line формате. В ситуации, когда многие конференции были отменены, совместные усилия СПбГУ, Курчатовского института, ОИЯИ и организационного комитета привели к выработке правильных стратегических и организационных решений. Удалось наладить стабильные каналы связи и обеспечить не только трансляцию выступлений, но и дискуссию между участниками заседаний.

Научная программа конференции охватывала широчайший спектр ядерно-физических проблем: экспериментальные и теоретические исследования структуры атомного ядра, исследования ядерных реакций, современные методы и технологии в области ядерной физики, физика элементарных частиц и высоких энергий, физика нейтрино и ядерная астрофизика. Помимо традиционных тем, в программу конференции вошли исследования в области синхротронной и нейтронной физики, ядерно-физических методов в исследовании объектов культурного наследия. Особое внимание было уделено проблемам ядерной медицины.

География участников конференции также очень обширна: было представлено более четырехсот докладов участниками из 38 стран (рис. 2). Общее число зарегистрированных участников составило более 575 человек. Несмотря на то, что конференция проходила в онлайн режиме, а значит участникам приходилось подключаться к конференции в рабочее время и независимо от часового пояса (например, докладчица из США, из университета Иллинойса делала свой доклад в 5:30 утра по местному времени!), интерес к докладам был очень высоким.

Открытие конференции состоялось в понедельник 12 октября. Теплые слова приветствия высказали главы ведущих российских ядерно-физических центров: директор НИЦ Курчатовский Институт А.Е. Благов, директор ОИЯИ академик В.А. Матвеев, а также директор одного из ведущих мировых центров ядерных исследований GSI П. Джиубеллино (Германия). От имени СПбГУ участников приветствовали проректор по науке С.В. Микушев и сопредседатель конференции В.И. Жеребчевский.

На открытии с пленарным докладом “Синхротронно-нейтронные исследования – база нового научно-технологического прорыва” выступил директор НИЦ “Курчатовский институт” А.Е. Благов. Участники конференции прослушали интересный доклад о становлении атомной отрасли в нашей стране, а также о современных возможностях синхротронных и нейтронных исследований. Докладчик подчеркнул, что “Курчатовский институт” в настоящее время ставит перед собой задачу развития нового технологического уклада, ядром которого являются конвергенция нано-, био-, информационных, когнитивных и со-

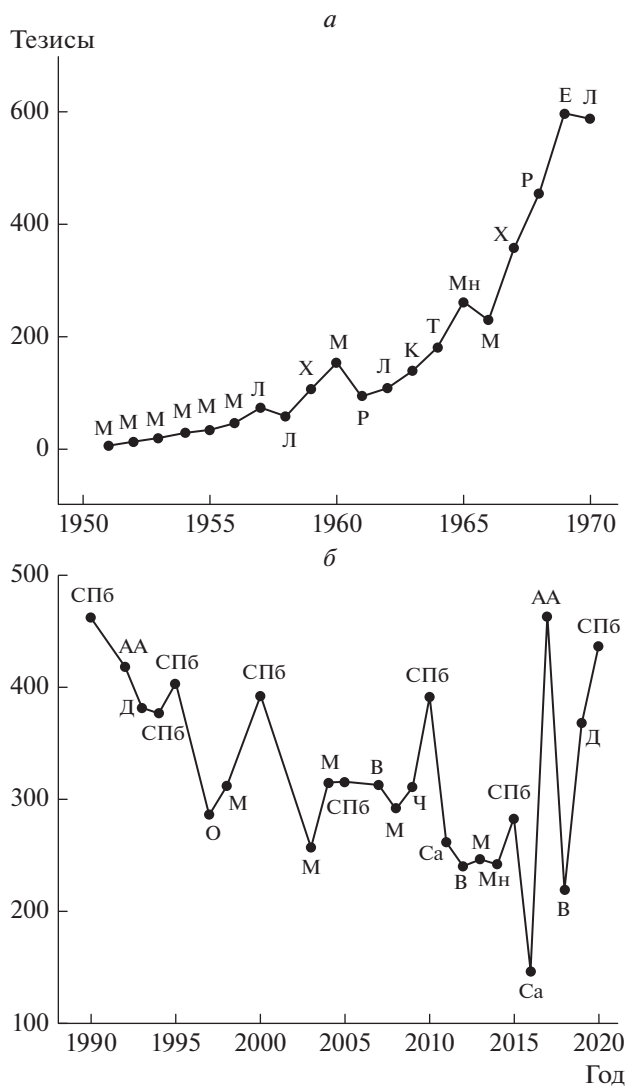


Рис. 1. Изменение количества докладов, включенных в программу ежегодных совещаний: *a* – 1951–1970 гг.; *б* – 1990–2020 гг. Обозначения места проведения конференции: AA – Алма-Ата, В – Воронеж, Д – Дубна, Е – Ереван, К – Киев, Л – Ленинград, М – Москва, Мн – Минск, О – Обнинск, Р – Рига, Са – Саров, СПб – Санкт-Петербург, Т – Тбилиси, Х – Харьков, Ч – Чебоксары.

циогуманитарных знаний (так называемая НБИКС-парадигма). Природоподобные технологии, порождаемые этим укладом, позволят создавать биологические системы и материалы с заранее заданными свойствами, экономящие природные ресурсы и энергию. Достижение столь амбициозных целей требует широкой программы исследований, в том числе с применением синхротронного и нейтронного излучений. А.Е. Благов отметил, что комплекс синхротронно-нейтронных исследований Курчатовского института является одним из немногих мест в мире, где на одной площадке находятся синхротрон (с энерги-



Рис. 2. География участников конференции. Показаны страны и количество участников из данной страны (в кружках).

ей электронов до 2.5 ГэВ, 16 действующих станций) и исследовательский реактор, что позволяет добиться принципиально нового уровня фундаментальных и прикладных исследований. Среди направлений этих исследований — кристаллография, материаловедение, структурная химия, белковая кристаллография, молекулярная биология, медицина, исследование органических и гибридных многослойных систем, исследование когнитивных процессов и изучение объектов культурного наследия. Курчатовский институт является головным в развитии синхротронных и нейтронных исследований в Российской Федерации. Поэтому особый интерес вызвала представленная программа развития синхротронно-нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры. В рамках этой федеральной программы будет создана сеть центров синхротронного излучения, включающая модернизированный источник синхротронного излучения Курчатовского института, источник синхротронного излучения на о. Русский (Владивосток), источник синхротронного излучения 4-го поколения СКИФ с энергией электронов 3 ГэВ (Кольцово, Новосибирская область). Особую роль в развитии синхротронных исследований мирового уровня будет играть флагманский источник синхротронного излучения 4-го поколения (энергия электронов 6 ГэВ), соединенный общей инфраструктурой с линейным ускорителем и рентгеновским лазером на свободных электронах (проект «СИЛА» — синхротрон + рентгеновский лазер в г. Протвино, Московская область). Специализированный источник синхротронного излучения будет иметь рекордный в своем классе эмиттанс $90 \text{ пм} \cdot \text{рад}$, а фемтосекундный лазер —

длину волны на уровне лучших мировых установок — 0.1 нм . Подобные параметры позволят исследовать объекты атомарного размера и быстро протекающие процессы.

Пленарный доклад и. о. руководителя Курчатовского комплекса синхротронно-нейтронных исследований Н.В. Марченкова «Курчатовский комплекс синхротронно-нейтронных исследований: текущий статус и перспективы» позволил участникам конференции более подробно ознакомиться с исследованиями, ведущимися на головной площадке Курчатовского института.

Одним из примеров НБИКС парадигмы является применение методов ядерной физики к объектам культурного наследия (доклад «Ядерно-физические методы в историческом материаловедении в НИЦ «Курчатовский институт»», представленный Е.Б. Яцышиной). Среди полученных интересных результатов — неразрушающее исследование содержимого крестов-реликвариюв 10–11 веков из Суздальского Ополя (территории Северо-Восточной Руси, интенсивно заселявшейся в Средние века). Был применен метод нейтронной томографии, позволивший установить, что при одинаковом внешнем виде крестов их содержимое заметно отличалось (человеческие волосы, овечья шерсть, льняная и шелковая ткани). Особый интерес вызвали совместные исследования ученых Курчатовского института и Государственного музея изобразительных искусств им. А.С. Пушкина 10 мумий египтян 20 в. до н. э. методом компьютерной томографии. Особенность заключалась в том, что мумии находились в саркофагах, вскрытие которых было невозможно.

Удалось установить метод мумификации, возраст, пол, болезни, ранения и в ряде случаев — причины смерти. Реконструкция мягких тканей головы по методу Герасимова позволило восстановить внешний вид людей, живших 4000 лет назад. Ядерно-физические методы исследования артефактов впервые были представлены в рамках данной конференции и привлекли большое внимание. Хочется надеяться, что они прочно закрепятся в программах будущих конференций.

Одной из крупнейших установок класса мегасайенс Российской Федерации является высокопоточный исследовательский реактор ПИК (Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ Курчатовский институт, г. Гатчина, Ленинградская обл.). В пленарном докладе заместителя директора ПИЯФ В.В. Воронина “Международный центр нейтронных исследований на основе реактора ПИК” рассказал о введении в эксплуатацию и планируемых экспериментах на реакторе. Докладчик отметил, что первое упоминание о реакторе ПИК появилось в 1966 г. Несмотря на более чем полувековую историю проекта, установка по своим параметрам и сейчас превосходит современные исследовательские реакторы. Планируется, что все возможности исследовательского комплекса, включая максимальную мощность 100 МВт, 25 экспериментальных нейтронных станций, исследования с использованием ультрахолодных и холодных нейтронов, станут доступны в 2024 г. Будут проводиться исследования в области физики конденсированного состояния, наносистем, биологии, ядерной физики, физики фундаментальных взаимодействий и элементарных частиц.

Второй день конференции начался с доклада директора музея Радиевого института (г. Санкт-Петербург) С.В. Хлебникова “История одной календарной даты. К 80-летию открытия спонтанного деления урана”. Докладчик подчеркнул, что это открытие, сделанное ленинградскими физиками Г.Н. Флеровым и К.А. Петржаком, стало возможным благодаря интенсивному развитию исследований по физике атомного ядра, радиохимии и радиогеологии, крупнейший вклад в которые внес Радиевый институт Академии наук. Именно в Радиевом институте в 1937 г. запущен в эксплуатацию первый в Европе циклотрон (идея ускорять заряженные частицы полем переменного тока высокой частоты была высказана 15 годами ранее сотрудником Радиевого института Л.В. Мысовским). Радиевый институт был организатором Первого Всесоюзного совещания по радиоактивности (1932 г.), положившего начало ядерным конференциям в Советском Союзе. Любопытно, что хотя открытие спонтанного деления атомных ядер датируется 1940 г., однако первый отчет, написанный сотрудником Радиевого института К.А. Петржаком, появился годом ранее.

В этот же день были представлены доклады от участников крупных мировых проектов в области физики нейтрино. А. Гарфанини (Италия) в докладе “Статус и перспективы нейтринной подземной обсерватории Цзянмынь” рассказал о международной коллаборации JUNO, объединяющей ученых из 19 стран (включая Россию). Эксперименты по изучению параметров осциллирующей нейтрино будут проводиться в Китае в строящемся на глубине 700 м экспериментальном зале, в котором будет находиться крупнейший в мире жидкосцинтилляционный антинейтринный детектор (сцинтиллятор массой 20000 т находится в сфере радиусом более 30 м, 20000 больших и 26500 малых фотоэлектронных умножителей регистрируют излучение Вавилова—Черенкова в результате рассеяния электронных антинейтрино на протонах). Источниками антинейтрино являются две ядерных электростанции, находящиеся на расстоянии около 50 км от установки. Эксперимент JUNO будет использовать нейтринные осцилляции для измерения иерархии масс нейтрино и других параметров. Благодаря уникальным параметрам точность результатов, полученных на других установках, будет повышена в несколько раз. JUNO также обладает большим потенциалом по изучению солнечных и атмосферных нейтрино, нейтрино от сверхновых, геонейтрино. В программу исследований входят также эксперименты по поиску распада протона (предсказываемого рядом теорий за пределами Стандартной модели), а также стерильных нейтрино. Последним посвящен доклад члена-корреспондента РАН А.П. Сереброва “Наблюдение осциллирующей стерильного антинейтрино в эксперименте Нейтрино-4 на реакторе СМ-3” о революционных открытиях нового вида нейтрино. В настоящее время установлено существование трех типов нейтрино, соответствующих трем поколениям лептонов: электронное, мюонное и тау-нейтрино. Была выдвинута гипотеза, что существуют и другие виды нейтрино (стерильные, претендующие на частицы “темной” материи Вселенной), участвующие только в гравитационном взаимодействии, но смешивающиеся с другими видами нейтрино. Тогда по изменению количества электронных антинейтрино в зависимости от расстояния от ядерного реактора можно судить о параметрах перехода традиционных антинейтрино в стерильные. Эксперимент “Нейтрино-4”, проводившийся с 2014 по 2019 г., дает указание на существование стерильного нейтрино (названного нейтрино-4), что соответствует результатам предыдущих экспериментов LSND и MiniBooNE. Авторы получили значения разностей квадратов масс массовых состояний нейтрино 1 и 4, а также значение синуса удвоенного угла смешивания этих состояний. Используя данные других работ и полагая, что справедлива простейшая модель, включающая

стерильное нейтрино (модель $3 + 1$), удалось при некоторых предположениях получить значения эффективных масс нейтрино: $m_{\nu_e} = 0.58 \pm 0.09$ эВ, $m_{\nu_\mu} = 0.42 \pm 0.24$ эВ, $m_{\nu_\tau} \leq 0.65$ эВ, $m_4 = 2.68 \pm 0.13$ эВ. Полученное значение массы электронного нейтрино можно сравнить с результатами прямого измерения верхней границы эффективной массы электронного антинейтрино по данным бета-распада трития (эксперимент KATRIN, Германия, докладчик Н. Титов, ИЯИ РАН, Москва): $m_{\nu_e} < 1.1$ эВ (уровень достоверности 90%). К эффективной массе нейтрино чувствителен и безнейтринный двойной бета-распад ($0\nu\beta\beta$). Однако для того, чтобы происходил такой процесс, наличия массы у нейтрино недостаточно: требуется несохранение лептонного числа и тождественность нейтрино и антинейтрино. В докладе Ф. Саламида (Италия, коллаборация "GERDA") "Поиск безнейтринного двойного бета-распада в рамках проекта GERDA" показано, что нижняя граница периода полураспада ($0\nu\beta\beta$) ^{76}Ge составляет $1.8 \cdot 10^{26}$ лет (С.Л. 90%). В настоящее время это рекордный показатель. Также в этот день прозвучали интереснейшие доклады в области физики космических лучей сверхвысоких энергий. Ни для кого не секрет, что нашу атмосферу пронзают заряженные частицы с энергиями на семь-восемь порядков выше, чем максимально достижимые энергии на самом мощном, созданном человеком ускорителе – Большом адронном коллайдере (ЛHC). Такие частицы создают в нашей атмосфере "ливни" вторичных частиц, и уже эти "ливни" из элементарных частиц, наблюдают в крупнейшей в мире обсерватории имени Пьера Оже (Аргентина). В итоге, регистрируя космические частицы сверхвысоких энергий, происхождение которых до сих пор не получило объяснения, человечество получает уникальную информацию о физике фундаментальных взаимодействий и астрофизике. Кстати, говоря о коллайдерах, нельзя не упомянуть огромное количество докладов, посвященных строящемуся в подмосковной Дубне отечественному коллайдеру NICA.

Практически все крупнейшие мировые коллаборации в области физики элементарных частиц, релятивистской ядерной физики и физики высоких энергий, представили свои доклады в среду 14 октября. Также отметим, что секция "Релятивистская ядерная физика, физика элементарных частиц и физика высоких энергий" стала самой популярной как по количеству докладов, так и по количеству слушателей, что отражает общемировые тенденции в этом направлении физических исследований. На пленарные доклады были вынесены результаты исследований, проводившихся на крупнейших современных ускорителях: коллайдере релятивистских тяжелых ионов (RHIC) в Брукхейвенской национальной лабора-

тории (США) и Большом адронном коллайдере в Центре европейских ядерных исследований (CERN), а также протонном суперсинхротроне (CERN). Эти ускорители являются центрами крупнейших международных коллабораций, в которых заметную роль играют российские ученые. В докладе "Основные результаты эксперимента PHENIX" Ю. Митранков (Санкт-Петербургский политехнический университет) подчеркнул, что основная цель эксперимента PHENIX на RHIC – экспериментальное исследование кварк-глюонной плазмы (КГП) с использованием столкновений релятивистских тяжелых ионов. Преимущество ускорителя RHIC перед LHC заключается в широком выборе сталкиваемых частиц, что позволяет определить зависимость формирования КГП от массовых чисел ядер. Автор представил экспериментальные данные по параметрам, чувствительным к появлению КГП: анизотропии в распределении продуктов реакции – заряженных и нейтральных адронов (эллиптические и триангулярные потоки); факторам ядерной модификации, отражающим влияние КГП на множественность рождаемых адронов; выходу прямых фотонов. Авторы доклада делают вывод, что миниКГП образуется в результате столкновений легких ядер с тяжелыми. Анализируя выходы прямых фотонов, они считают, что источник прямых фотонов во всех тяжелых системах вне зависимости от энергии пучка одной и той же природы (хотя и не указывают, какой). Экспериментам на RHIC посвящен и доклад А.А. Апарина (ОИЯИ) "Последние результаты по столкновениям тяжелых ионов в эксперименте STAR". Одной из важнейших задач физики высоких энергий является исследование фазовой диаграммы в координатах энергии сталкивающихся частиц–плотность вещества для выяснения особенностей фазового перехода от адронной материи в состояние КГП. На ускорителе RHIC в эксперименте STAR планируется расширить диапазон энергий столкновения ядер золота на низкие энергии вплоть до $\sqrt{s_{NN}} = 3$ ГэВ, что может позволить исследовать границу фазового перехода. Докладчик рассказал о программе планируемых исследований, а также об измерении разности масс гипертритона и антигипертритона (что позволяет ответить на вопрос о соблюдении фундаментальной СРТ симметрии). На основании полученных результатов автор приходит к выводу, что нарушения СРТ инвариантности не происходит.

Большое количество пленарных докладов было посвящено исследованиям в CERN. С. Ковальски (Польша) рассказал о последних результатах по программе исследования сильных взаимодействий NA61/SHINE на SPS при импульсах ионов (Ar, Xe, Pb) первичного пучка $13A - 158A$ ГэВ · с⁻¹. Основными задачами программы NA61/SHINE явля-

ются изучение формирования файерболла (сгустка сверхплотной сильновзаимодействующей материи) и систематическое исследование процесса перехода из газа адронов в КГП. Намечено построение фазовых диаграмм сильновзаимодействующих систем в зависимости от температуры, барионного химического потенциала, размера сталкивающихся систем. По сравнению с предыдущими исследованиями на SPS эксперимент NA61/SHINE особое внимание уделяет флуктуациям физических характеристик, являющихся индикаторами фазового перехода. Известно, что одним из сигналов образования КГП является изменение в множественности рождения странных и очарованных частиц. Как подчеркивает автор, только энергетический диапазон, покрываемый ускорителем SPS, позволяет в ближайшем будущем приступить к изучению особенностей рождения очарованных частиц вблизи критической точки фазового перехода первого рода из состояния адронной материи в состояние КГП.

Нельзя не отметить большое количество докладов (в том числе 4 пленарных), представленных коллаборацией ALICE (LHC), в том числе по тематике, связанной с модернизацией эксперимента. Э. Фраджакомо (ЦЕРН) в пленарном докладе рассказал о реакции с протонами и тяжелыми ионами (Pb, Xe) при энергиях от 1 до 13 ТэВ, позволяющих изучить этапы формирования и последующего распада КГП, а также о планах модернизации установки. Известно, что в настоящее время LHC проходит глубокую модернизацию для существенного двухэтапного повышения светимости (приблизительно 10-кратного после 2027 г.). Предполагается, что первый этап этой модернизации завершится в 2021–2022 гг., после чего на LHC вновь можно будет проводить эксперименты с протонами и тяжелыми ионами. Представляющий коллаборацию ALICE В. Трашка (Финляндия) рассказал об особенностях глубокой модернизации детектора тяжелых ионов на LHC, что позволит использовать увеличенную светимость ускорителя. Благодаря обновлению детектора с 2022 г. можно будет резко повысить точность измерения редких сигналов, таких, например, как рождение адронов с тяжелыми кварками с малыми значениями поперечного импульса (что позволит проследить взаимодействие кварков со средой), излучение дилептонов КГП (дает информацию о восстановлении киральной симметрии в КГП). С большим интересом участники конференции заслушали доклад еще одного представителя коллаборации Г.А. Феофилова (Санкт-Петербургский государственный университет) “Новая внутренняя трековая система установки ALICE на LHC для прямого измерения очарованных частиц: нынешнее состояние и перспективы”. Докладчик рассказал о планах модернизации установки ALICE, свя-

занных с 3 и 4 этапами экспериментальных исследований. Для регистрации короткоживущих адронов с тяжелыми кварками (таких, как D -мезоны) с малыми поперечными импульсами при существенно увеличенной частоте столкновений первичных частиц была создана новая внутренняя трековая система, состоящая из 7 слоев монолитных активно-пиксельных сенсоров, созданных по КМОП технологии. Новая конструкция в три раза повышает пространственное разрешение, позволяет регистрировать частицы с поперечными импульсами от $50 \text{ МэВ} \cdot \text{с}^{-1}$ (для очарованных частиц от нулевых значений импульса), причем повышенное быстродействие соответствует высокой частоте столкновения первичных частиц в ускорителе. Следует отметить, что по ряду параметров новая внутренняя трековая система ALICE превосходит перспективные детектирующие системы установок ATLAS и CMS LHC. О том, что ALICE может быть использована не только для исследования свойств КГП, но также и свойств экзотических ядер рассказал А.Б. Борисов (МФТИ) в докладе “Новые результаты по рождению (анти)гиперядер на установке ALICE LHC”. В процессе столкновения тяжелых ионов свинца наряду с элементарными частицами рождаются малонуклонные атомные ядра, а также (в редких случаях) гиперядра, то есть ядра, содержащие вместо одного из нейтронов Λ -гиперон. Уникальные возможности установки ALICE позволили не только зарегистрировать гипертрифон, но и измерить его время жизни. Оказалось, что оно близко ко времени жизни Λ -гиперона, что подтверждает теоретические модели, предполагающие слабую связь гиперона с нуклонами ядра. При этом также возможно рождение антигипертрифона. Исследования КГП на LHC не ограничиваются детектором ALICE. Об этом рассказала О. Евдокимова (США) в докладе “Новые результаты исследований с тяжелыми ионами в эксперименте CMS”. Любопытно, что первоначально установка CMS была нацелена на изучение элементарных частиц (в частности, бозона Хиггса). Однако в настоящее время программа исследований дополнена изучением результатов столкновения тяжелых ионов: азимутальной анизотропии рождаемых в столкновениях частиц, рождения частиц, содержащих тяжелые кварки, эффекта гашения струй. Анализ этих процессов дает информацию о формировании КГП в столкновениях тяжелых ионов. При этом автор особое внимание обратила на сигналы о формировании КГП при столкновениях легких ядер.

Четвертый день конференции был посвящен фундаментальным проблемам в области ядерной физики низких энергий. Свои доклады представили, в том числе, старейшие участники конференции, которые на протяжении десятков лет не

пропускали ни одной такой конференции. Профессор Л.Д. Блохинцев (МГУ) подверг критическому рассмотрению понятие спектроскопических факторов, широко используемого при анализе ядерных реакций. В результате автор пришел к неожиданному заключению, что спектроскопические факторы являются ненаблюдаемыми величинами, которые могут быть определены только в рамках специфического вида ядерного гамилтониана. Профессор В.Е. Бунаков (ПИЯФ) рассмотрел явление хаоса в квантово-механических системах (частным случаем которых является атомное ядро). Можно ли говорить о хаотическом движении в квантовых процессах, где отсутствует понятие траектории? Докладчик ввел критерий хаотичности, применимый и для микромира: система является хаотической, если количество ее интегралов движения (“хороших” квантовых чисел) меньше количества степеней свободы. Причем в набор учитываемых “хороших” квантовых чисел надо включить только те, которые сохраняются при переходе к классическому пределу (то есть не учитывать, например, сохраняемую в сильных взаимодействиях пространственную четность). В своем обзорном докладе профессор Р.В. Джолос (ОИЯИ) рассмотрел многочисленные примеры фазовых переходов в атомных ядрах, происходящих при увеличении энергии возбуждения, углового момента и изменении количества нейтронов. При этом происходит изменение симметрии среднего поля ядра и структуры основного и возбужденных состояний. Среди рассмотренных эффектов – сосуществование форм атомных ядер, переход в состояние с окупольной деформацией при увеличении углового момента, изменение сверхтекучих свойств ядра и др. Докладчик рассказал как о подходе на основе коллективной модели, так и о микроскопических аспектах этих процессов. В докладе В.В. Самарина были представлены результаты группы ученых из ОИЯИ по определению энергетической зависимости полных сечений реакции экзотических ядер-изобар ${}^8\text{Li}$ и ${}^8\text{He}$ на ядрах ${}^{28}\text{Si}$, ${}^{59}\text{Co}$ и ${}^{181}\text{Ta}$. Следует отметить, что реакции с находящимися на границе стабильности экзотическими атомными ядрами, состоящими из кора и нейтронного гало, являются важным инструментом изучения их структуры и сейчас привлекают большой интерес исследователей. Впервые измерения полных сечений охватили диапазон энергий $6\text{--}46 \text{ A} \cdot \text{МэВ}$, и был применен метод регистрации мгновенного нейтронного и гамма-излучения. Сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов (в частности, на основе зависящего от времени уравнения Шрёдингера) подтверждают, что ядро ${}^8\text{Li}$ состоит из остова ${}^7\text{Li}$ (включающего кластеры ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{H}$) и нейтрона. Большой интерес вызвал доклад профессора В.В. Варламова (МГУ) “Физические критерии

достоверности данных и систематические погрешности сечений фотонейтронных реакций” о причинах различий в экспериментальных значениях сечений фотонейтронных реакций, полученных в лабораториях г. Сакле (Франция) и г. Ливермора (США). В докладе профессора С.Г. Кадменского (Воронеж) “Механизмы многоступенчатых ядерных распадов с учетом реальных и виртуальных состояний промежуточных ядер” было предложено включить в цепочки последовательных радиоактивных распадов промежуточные ядра, находящиеся не только в реальных, но и в виртуальных состояниях. Предложенная авторами доклада теория использована для описания тройного и четверного спонтанного и вынужденного деления ядер как виртуальных процессов. Большой интерес вызвали также доклады Е. Литвиновой (Университет Западного Мичигана, США) и Ю.В. Попова (МГУ).

В 2020 г. была расширена тематика ядерно-физических методов в медицинских исследованиях. На конференции европейские и российские участники поделились своим опытом внедрения ядерно-физических технологий для терапии и диагностики различных заболеваний. С интереснейшим докладом выступила профессор М. Досанж (ЦЕРН), в котором была упомянута новейшая технология флэш-терапии, открывающая совершенно иные горизонты в лечении онкологических заболеваний. Флэш-терапия – это кратковременное воздействие пучком заряженных частиц, очень большими дозами радиации на раковые опухоли. При этом время облучения является достаточным для разрушения ДНК раковых клеток, но недостаточным для разрушения ДНК здоровых клеток. В.И. Жеребчевским (СПбГУ) был представлен обзорный доклад о самых современных методах лечения онкологических заболеваний с использованием радиоактивных изотопов различных элементов. Было рассказано о важной роли новых радиоизотопов для диагностики (методом позитронной эмиссионной томографии и однофотонной эмиссионной компьютерной томографии) и для терапии (радиоиммунотерапия). Соединение методик радиоизотопной визуализации органов и тканей с радиоизотопной терапией – “тераностика” (неологизм, возникающий в результате терапии, основанной на диагностике), способно дать отличный результат с минимальными побочными эффектами для лечения и диагностики онкологических заболеваний. Пациент будет получать сначала онко-селективный препарат, помеченный диагностическим радионуклидом, и затем с помощью этого радионуклида будет проведена терапия. В докладе отдельное внимание было уделено разработкам и исследованиям физиков и инженеров СПбГУ совместно с коллегами из Государственной корпорации “Росатом”.

Естественно, в короткой статье невозможно упомянуть все доклады, представленные на конференции. С ними можно ознакомиться на сайте [2] и в сборнике тезисов докладов, изданном накануне конференции [3]. Полнотекстовые статьи по материалам лучших докладов, рекомендованные программным комитетом конференции, будут опубликованы в нескольких выпусках журнала “Известия РАН. Серия физическая”, а также в изданиях ЭЧАЯ, “Ядерная физика и инжиниринг”.

В чем же секрет уникальной долговечности традиционной конференции по ядерной физике? Думается, он заключается в гибкости и универсальности ее научной программы, развивающейся вместе с физикой микромира. И если в первые четыре десятилетия большинство докладов были посвящены физике низких энергий, то в настоящее время на первый план вышли физика высоких энергий и прикладные аспекты ядерной физики (включая ядерную медицину и ядерно-физические

методы изучения культурного наследия). И еще одна причина: несмотря на весьма почтенный возраст конференции, ее организаторы – молодые люди, вносящие и новые идеи, и новую энергию.

В заключение отметим, что конференцию делали многие люди. Мы благодарим наших дорогих докладчиков за то, что поделились с нами своими идеями и результатами. Мы благодарим наших дорогих слушателей за вдохновляющие вопросы. И кто знает, возможно именно эти вопросы, послужат толчком для новых открытий? “От мечты – к идеям и Открытиям!”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Известия АН СССР. Сер. физ. 1953. Т. 16. № 3. С. 1.
2. <https://indico.cern.ch/event/839985>.
3. https://indico.cern.ch/event/839985/attachments/2116081/3590424/book_of_abstracts_Nucleus-2.pdf.

Modern problems of nuclear and particle physics and their applications (conclusions from the reports of the International Conference “Nucleus-2020”)

A. K. Vlasnikov^{a,*}, V. I. Zhrebchevsky^a, T. V. Lazareva^a

^a*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia*

**e-mail: a.vlasnikov@spbu.ru*

The most promising areas of the development of nuclear and particle physics are discussed. One of them is the synthesis of the achievements of nuclear physics and the nano-, bio-, information and social sciences to create nature-like technologies and deepen the understanding of a man (NBICS paradigm). The second is the transition to ultra-high energies and exotic states of matter (for example, quark-gluon plasma). The reports at the 70th Conference on Nuclear Physics provide extensive material for this discussion.