

УДК 539.1

М.В. Шумейко

Ключевые этапы развития физики тяжелых ионов: попытка реконструкции

Аннотация:

В статье дана характеристика ключевых этапов развития физики тяжелых ионов. Автор описывает историю дисциплины с момента появления первых представлений об атомах в античной философской мысли до новейших открытий XXI в. Ядерные реакции с тяжелыми ионами позволили получить уникальные данные по строению и эволюции ядерной материи, открыть уникальные физические явления, такие как каскадный распад тяжелых ядер, протонная радиоактивность, ядерная изомерия формы, а также синтезировать новые химические элементы, сама возможность существования которых была важной частью научной дискуссии в XX в.

Ключевые слова: история физики, физика тяжелых ионов, радиоактивность, тяжелые ионы, сверхтяжелые элементы, искусственные ядерные реакции.

Об авторе: Шумейко Максим Владимирович, Государственный университет «Дубна», аспирант кафедры ядерной физики; эл. почта: shumeyko@jinr.ru

Научный руководитель: Багдасарьян Надежда Гегамовна, Государственный университет «Дубна», доктор философских наук, профессор кафедры социологии и гуманитарных наук; эл. почта: ngbagda@mail.ru

С античной поры жили представления об атомах как о неделимых сущностях – кирпичиках материи, из которых складываются и состоят вещества. Первые рассуждения об атоме, известные как учение Левкиппа, были предложены Демокритом в 4 в. до н. э. В какой-то мере эти представления просуществовали до конца 19 в. – так, химия того времени была формализована в виде таблицы Менделеева, описывающей фундаментальные свойства 63 атомов различных химических элементов. Радиохимия, изучающая химию радиоактивных изотопов, элементов и веществ, законы их физико-

химического поведения, химию ядерных превращений и сопутствующих им физико-химических процессов, появилась лишь в первой четверти XX в. До этого концепция атомизма, сформулированная в 1808 г. Дж. Дальтоном, постулировала, что атомы – это химические элементы, которые нельзя создать заново либо уничтожить путем химических превращений [5, с. 97].

Начало истории физики ядра начинается с открытия радиоактивности – установления факта самопроизвольного распада атомных ядер. Концепция неделимых частиц, называемых элементарными частицами, была пересмотрена. По мере изучения взаимодействия радионуклидов и элементарных частиц с атомными ядрами, развития техники, квантовой теории и методики экспериментов, появилась возможность наблюдать и осуществлять все более сложные и редкие ядерные превращения, частицы, радиоактивные ядра.

Физика тяжелых ионов исследует наиболее экзотические и экстремальные состояния материи атомных ядер, связанные с высокими энергиями возбуждения продуктов ядерных реакций. Часто объектом ее изучения становятся атомные ядра, которые искусственно синтезированы человеком и не встречаются на нашей планете. Тяжелые ионы – это ионы элементов с $Z > 2$ и $A > 4$ (тяжелее гелия). Взаимодействие тяжелых ионов с ядрами характеризуется коренной перестройкой участвующих в реакции ядерных систем, содержащих иногда сотни нуклонов. Все это приводит к разнообразию каналов реакции – путей, по которым проходят изменения взаимодействующих ядер.

Открытие радиоактивности

В 1896 г. А. Беккерель проводил эксперименты по изучению свойств соединений урана, сделав случайное открытие [5, с. 28.]. Он завернул фотопластинку в черную бумагу и поместил ее рядом с образцом солей урана, ожидая, что не увидит никакого эффекта на пластинке. Однако, проявив пластинку, он обнаружил, что она была выставлена так, как если бы ее подвергали воздействию света. Беккерель понял, что соли урана испускают новый тип излучения, которое может проникать сквозь материалы и оставлять изображение на фотопластинке. Исследование Беккереля в области радиоактивности было новаторским, поскольку показало, что определенные элементы могут испускать излучение без какого-либо внешнего стимула. Это отличалось от других форм излучения, таких как рентгеновские лучи, для получения которых требовался внешний источник энергии.

Работа Беккереля по радиоактивности проложила путь для дальнейших исследований другими учеными, включая Марию и Пера Кюри. Они смогли развить открытия Беккереля и выделить новые радиоактивные элементы, такие как радий и полоний. Об открытии они впервые сообщили 18 июля на заседании Парижской академии наук в 1898 г. в докладе под названием «О новом радиоактивном веществе, содержащемся в смоляной обманке» [2, с. 26]. Развивая и совершенствуя химические методы выделения радиоактивных веществ из больших объемов руды, они первыми приступили к изготовлению источников радиоактивного излучения большой интенсивности и сделали определяющий вклад в становление радиохимии как науки. Вклад Беккереля в изучение радиоактивности был отмечен Нобелевской премией по физике в 1903 г., которую он разделил с семьей Кюри.

Позднее Э. Резерфорд, новозеландский физик, провел серию экспериментов по облучению альфа-частицами золотой фольги между 1908 и 1913 гг. [16]. Гипотеза Резерфорда заключалась в том, что альфа-частицы будут проходить через золотую фольгу без какого-либо значительного отклонения. Однако он заметил, что некоторые альфа-частицы отклонялись под большими углами, а некоторые даже отскакивали назад в том направлении, откуда они прилетели. Этот результат был неожиданным и противоречил господствовавшей в то время модели строения атома, известной как модель Томсона [17, с. 237.]. Модель Томсона предполагала, что атомы состоят из положительно заряженной сферы с вложенными в нее отрицательно заряженными электронами. Согласно этой модели, альфа-частицы должны были пройти через золотую фольгу без какого-либо значительного отклонения. Однако эксперимент Резерфорда показал, что в центре атома должно быть маленькое, плотное, положительно заряженное ядро, которое отклоняет альфа-частицы.

Открытие Резерфордом атомного ядра стало значительным прорывом в понимании атомной структуры. Он предложил новую модель атома, известную как модель Резерфорда, которая состояла из небольшого плотного ядра в центре атома, окруженного вращающимися по орбитам электронами. Эксперименты Резерфорда с альфа-частицами также привели к открытию изотопов. Изотопы – это атомы одного и того же элемента, которые имеют разное количество нейтронов в своих ядрах. Резерфорд заметил, что некоторые альфа-частицы отклонялись под несколько иными углами, чем другие, что

наводило на мысль о том, что в золотой фольге присутствовали разные типы атомов. Это привело к открытию изотопов золота и других элементов.

Первые эксперименты по проведению искусственных ядерных реакций

От первых опытов по обнаружению и выделению радиоактивных веществ уже в 1930-е гг. был сделан важный шаг – исследователи создали устройства, с помощью которых можно изучать микромир субатомных объектов. Это были ускорители ионов, которые могли разгонять заряженные частицы до таких энергий, на которых они могли особым образом взаимодействовать с атомными ядрами и выявлять особенности их внутреннего строения. Первые шаги сделал Ван дер Граф, создавший импульсный ускоритель в 1929 г. [9, с. 312.]. Электростатический генератор высокого напряжения, принцип действия которого основан на электризации движущейся диэлектрической ленты позволял получить разность потенциалов до 80 киловольт (кВ).

Но уже в 1932 г. Дж. Кокрофт и Э. Уолтон провели эксперимент, который включал использование линейного ускорителя частиц для расщепления атома. Они ускорили пучок протонов на каскадном генераторе с разностью потенциалов 800 кВ на тонкий кусочек металлического лития, зафиксировав распад его атомов на два ядра гелия [7]. Это был первый случай, когда ученые искусственно вызвали ядерную реакцию. В дополнение к своей работе с ускорителями элементарных частиц Кокрофт внес много других важных вкладов в физику на протяжении всей своей карьеры. В 1951 г. ему была присуждена Нобелевская премия по физике за его работу по ядерным реакциям, и он занимал пост директора нескольких крупных исследовательских институтов в Великобритании.

Изобретение Э. Лоуренсом циклотрона стало крупным прорывом в физике атомного ядра и частиц. Линейные ускорители казались Лоуренсу несовершенными, так как в них время от времени происходил пробой изоляции и возникал высоковольтный разряд, подобный молнии. В 1929 г. Лоуренсу попала на глаза статья инженера скандинавского происхождения Р. Видер⁰⁹, в которой рассматривалась предложенная ранее шведским физиком Г. Изингом схема ускорителя частиц [18]. Хотя Лоуренс недостаточно владел немецким языком, чтобы разобраться во всех тонкостях, основная идея была ему ясна из иллюстраций к статье: частицы можно ускорять, повышая напряжение постепенно, а не создавая один большой «горб». Идея состояла в том, что заряженные частицы движутся по окружности в однородном магнитном поле и многократно проходят ускоряющий промежуток с разностью потенциалов.

После первого, довольно несовершенного циклотрона, построенного в 1930 г., Лоуренс и его коллеги из Беркли быстро создали одну за другой более крупные модели. Используя 80-тонный магнит, предоставленный ему Федеральной телеграфной компанией, Лоуренс 2 января 1931 г. добился ускорения протонов до энергий 80 000 электрон-вольт (эВ), а уже через неделю 1 220 000 эВ [13, с. 75-82, 46-49, 83-100.].

Циклотроны оказались идеальными экспериментальными приборами. В отличие от частиц, испускаемых ядрами при радиоактивном распаде, пучок частиц, выводимых из циклотрона, был однонаправленным, их энергию можно было регулировать, а интенсивность потока была несравненно выше, чем от любого радиоактивного источника. Облучение атомов с помощью циклотрона позволило расщепить их ядра на радиоактивные изотопы, измерять энергию связи и пороги возбуждения атомных ядер, а также экспериментально проверить открытое А. Эйнштейном соотношение между массой и энергией. Именно с этого момента берет начало физика тяжелых ионов.

В знак признания его вклада в науку Лоуренс был удостоен Нобелевской премии по физике в 1939 г. Впоследствии он стал ведущей фигурой в Манхэттенском проекте, в рамках которого была разработана первая атомная бомба во время Второй мировой войны. После войны он продолжил свои исследования в области ядерной физики и основал Национальную лабораторию Лоуренса в Беркли, которая прославилась своими открытиями новых химических элементов.

Первый циклотрон в СССР и Европе появился уже в 1937 г. в Радиевом Институте имени Хлопина [3]. Проект был предложен в 1932 г. группой советских ученых, в которую входили И. В. Курчатов, Л. В. Мысовский и Г. А. Гамов. Циклотрон позволил приступить к изучению сделанного в 1938 г. открытия О. Ганом и Ф. Штрассманом процесса деления ядер урана под действием нейтронов. Большим событием явилось участие сотрудников Радиевского института в открытиях явления изомерии искусственных радиоактивных ядер (1935 г. с участием Л. В. Мысовского) и спонтанного деления ядер урана (1940 г. с участием К.А. Петржака). В 1940-е гг. Президиум АН СССР создал «Урановую комиссию» во главе с директором Радиевского института В. Г. Хлопиным. Комиссией рассматривались вопросы поиска месторождений урана, с возможностью осуществления цепной реакции в природной и обогащенной по урану-235 смеси, разработки методов разделения изотопов урана.

Начало синтеза трансурановых химических элементов

К середине XX в. достижения в области радиохимических методов выделения изотопов, создания высокоинтенсивных источников излучения и ускорительной техники позволили приблизиться к известным границам химических элементов. Поскольку возраст Земли оценивается в 4,54 млрд лет (с погрешностью в $\pm 1\%$), радиоактивные изотопы с значительно меньшим периодом полураспада, которые могли существовать при рождении нашей планеты, претерпели радиоактивный распад, а их концентрация уменьшилась до исчезающе малой для наблюдения [8]. К 1940 г. таблица Менделеева насчитывала всего 92 химических элемента, самым тяжелым из которых был уран с массовым числом (количеством протонов и нейтронов в ядре) 238. Постановка экспериментов по ядерным реакциям с наиболее тяжелыми атомами дала исследователям возможность понять механизмы ядерных превращений и углубить представления об атомном ядре – но также получить новые атомы тяжелее урана, то есть трансурановые элементы.

В 1940 г. Эдвин Макмиллан проводил эксперименты на циклотроне по бомбардированию урановой мишени нейтронами в радиационной лаборатории Лоуренса. Макмиллан заметил, что часть облученных атомов урана подвергалась расщеплению, а часть захватывала нейтроны. Ядра, которые захватывали нейтроны, подвергаясь бета-распаду, повышали свой атомный номер с 92 до 93 и образовывали новый элемент. Этот новый элемент получил название нептуний – так как планета Нептун является следующей планетой после Урана. В ноябре того же года Макмиллан был вынужден временно оставить Беркли. Коллеги Эдвина под руководством Г. Сиборга усовершенствовали окислительно-восстановительный метод Макмиллана для выделения нептуния. Глен спросил у Эдвина разрешение продолжить его исследования в области нептуния и поиск 94-го элемента, а Макмиллан согласился на сотрудничество.

В феврале 1941 г. Сиборг и Макмиллан в своих экспериментах бомбардировки октаоксида триурана-238 ядрами дейтерия наблюдали образование нептуния, 93-го элемента, который подвергался бета-распаду, образуя новый элемент с 94 протонами. Они назвали этот новый элемент плутонием в честь Плутона – карликовой планеты, чья орбита пролегает за орбитой Нептуна. Было обнаружено, что ядерные реакции с плутонием-239 характеризуются выделением большого количества энергии. Таким образом, 28 марта 1941 г., Г. Сиборг, физик Э. Сегре и химик из Беркли Дж. Кеннеди показали, что плутоний обладает характеристиками, которые наиболее подходят для создания ядерной бомбы, а

это имело важное значение для решений, принимаемых в выборе направления исследований Манхэттенского проекта.

Элемент америций, названный в честь Америки, был получен искусственно в 1944 г. в Металлургической лаборатории Чикагского университета Сиборгом с сотрудниками, при этом открытие было засекречено. В 1949 г. там же был синтезирован элемент кюрий, названный в честь Марии Кюри путем облучения атомов изотопа плутония-239 альфа-частицами.

Химические элементы берклий и калифорний были получены в Национальной лаборатории им. Лоуренса в 1944, 1949 и 1950 гг. В коллектив исследователей помимо Сиборга входили также А. Гиорсо, Л. Морган, С. Томпсон и другие. Их получали путем последовательного облучения недавно синтезированных тяжелых атомов плутония, америция и кюрия альфа-частицами, ускоренных на 60-дюймовом циклотроне. В 1955 г. таким же образом в реакции эйнштейния с альфа-частицами был получен менделевий, 101-й элемент периодической таблицы химических элементов, названный в честь ее создателя.

Первое в мире испытание термоядерного оружия на основе дейтерия было произведено США на атолле Эниветок 1 ноября 1952 г. Оценочная мощность взрыва составила 10-12 мегатонн тротилового эквивалента. Группа исследователей из Лос-Аламосской лаборатории под руководством А. Гиорсо путем выделения изотопов из осадков и пыли, собранных в области взрыва, обнаружила новые тяжелые химические элементы, которым дали названия в честь Эйнштейна и Ферми – эйнштейний и фермий с зарядовыми числами 99 и 100 [12, с. 174].

Новый этап – использование реакций с тяжелыми ионами

К середине 1950-х гг. возможность получения неизвестных ранее химических элементов с зарядовым числом больше 100 посредством облучения веществ легкими частицами, нейтронами и альфа-частицами, была исчерпана. Требовался новый подход для дальнейшего продвижения. Сама возможность синтеза более тяжелых ядер была предметом научной дискуссии. В согласии с капельной моделью ядерных реакций, заложенных Н. Бором и Дж. Уилером в 1930-х гг., тяжелое ядро с зарядовым числом более 102 становится абсолютно неустойчивым по отношению к спонтанному делению (его время жизни должно составлять всего $\sim 10^{-20}$ с) [6].

Ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами были начаты в СССР в начале 1950-х гг. по инициативе академика И. В. Курчатова и члена-корреспондента АН СССР Г. Н. Флерова в Институте атомной энергии (ИАЭ), который носит теперь имя Курчатова. На 1.5-метровом циклотроне института были ускорены ионы углерода, азота и кислорода до энергии около 100 МэВ. В те годы это была рекордная энергия для таких ионов. Определяющее значение в получении высокоэнергетических тяжелых ионов сыграла разработка в отделе академика Л. А. Арцимовича (ИАЭ) сотрудниками отдела Б. Н. Маковым, Н. М. Морозовым и М. С. Иоффе мощного источника многозарядных ионов [1, с. 4].

В 1954 г. Флеров покидает советский проект по разработке ядерного оружия и при поддержке своего учителя, академика И. В. Курчатова, приступает к опытам по синтезу трансурановых элементов. В 1957 г. в составе Объединенного Института Ядерных Исследований (ОИЯИ) была создана Лаборатория Ядерных Реакций (ЛЯР). В основе нового подхода – использование реакций с тяжелыми ионами, циклотрон нового поколения У-300, обеспечивающий пучки рекордной интенсивности с массой магнита 2000 тонн и диаметром полюса 300 сантиметров, запуск которого был осуществлен под руководством Ю. Ц. Оганесяна в 1960 г. Сотрудники ЛЯР получили в свое распоряжение ускоритель тяжелых ионов, который по интенсивности пучков и многообразию ускоряемых ионов в течение десятка лет занимал лидирующее положение в мире. В результате проведенных на нем экспериментов был открыт новый класс ядерных реакций с тяжелыми ионами, который получил название реакций глубоконеупругих передач (РГНП).

В 1963 г. в ходе экспериментов на циклотроне У-300 исследователи Объединенного института ядерных исследований в Дубне под руководством Г. Н. Флерова получили изотопы 102 химического элемента, названного в честь А. Нобеля – нобелий. Элемент был получен в реакции пучка ионов неона-22 с мишенью, состоящей из ядер урана-238.

С течением времени как в СССР, так и за рубежом все более отчетливо складывалось убеждение, что для дальнейшего развития этого перспективного направления необходимо сооружение специальных ускорителей тяжелых ионов. В 1961-1967 гг. исследователи в Беркли и Дубне независимо друг от друга синтезировали химические элементы 103 лоуренсий и 104 резерфордий. Элемент 105, дубний, впервые

получен на ускорителе в Дубне в 1970 году группой Г. Н. Флерова и независимо в Беркли (США) в том же году. Элемент 106, сиборгий, был синтезирован в 1974 г. в Беркли группой под руководством Альберта Гиорсо в реакции калифорния-249 с кислородом-18. В том же году в Дубне группа Г. Н. Флерова и Юрия Оганесяна провела синтез 106-го элемента в реакциях слияния ядер свинца-208 и хрома-54 [10, с. 181-192; 11, с. 1490].

Во второй половине 1970-х – начале 1980-х гг. вошли в строй мощные ускорители тяжелых ионов нового поколения: линейный ускоритель в Дармштадте (ФРГ), четырехметровый изохронный циклотрон У-400 с повышенной напряженностью магнитного поля в ОИЯИ (Дубна), гигантские электростатические тандемные генераторы в Ок-Ридже (США) и Дарсбери (Великобритания), тандем из двух секторных циклотронов в Кане (Франция). С запуском ускорителей нового поколения исследователи получили в свое распоряжение весь возможный набор тяжелых ионов, включая ионы урана-238 и радиоактивные изотопы – и ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами вступили в полосу своей зрелости. Основные направления исследования теперь включали изучение упругих и неупругих процессов рассеяния, реакции передачи нуклонов, распад и формирование составного ядра, изучение составных ядер с высокими энергиями возбуждения и большим собственным моментом импульса – спином [1, с. 18].

Синтез трансурановых элементов также перешел на новый этап – этап синтеза элементов тяжелее фермия, «трансфермиевых элементов». Использование реакции «холодного слияния» различных ионов с ядрами свинца-208 и висмута-209 принесли новые результаты. Реакции с «дважды магическими ядрами» свинца, имеющие полностью заполненные протонные и нейтронные оболочки, назывались реакциями холодного слияния потому, что в результате полного слияния ядер получалось составное ядро с небольшой энергией возбуждения относительно реакций с более тяжелыми ядрами, например, калифорния. При таком подходе можно было дальше наращивать массу и заряд облучающих ионов – именно по этому пути шли исследователи Института тяжелых ионов (GSI) в Дармштадте (Германия), которые смогли синтезировать элементы 107-112 в 1981-1996 гг.: борий-107 в 1981 г., хассий-108 в 1984 г., мейтнерий-109 в 1982 г., дармштадтий-110 и рентгений-111 в 1994 г., коперниций-112 в 1996 г. Параллельно эти изотопы были синтезированы группой Ю. Ц. Оганесяна на базе циклотрона У-400 в Дубне.

Открытие острова сверхтяжелых элементов

Благодаря накопленным данным и развитию новых представлений о свойствах наиболее тяжелых нуклидов учеными ОИЯИ уже в 1966 г. была обоснована возможность существования области повышенной стабильности сверхтяжелых ядер в районе зарядового числа $Z \approx 114$ и числа нейтронов $N \approx 184$, однако долгое время попытки синтеза химических элементов с зарядовым числом больше 112 оставались безуспешными.

В конце 1990-х годов профессором Ю.Ц. Оганесяном была сформулирована задача синтеза изотопов сверхтяжелых элементов в реакциях слияния изотопов от урана-238 до калифорния-251 с ионами кальция-48, ускоренными на циклотроне У-400М. Циклотрон У-400 был модернизирован до У-400М к 1991 г. за счет добавления системы аксиальной инжекции ионов, предназначенной для получения пучков ионов средних масс. Реакции с кальцием-48 обладали существенными преимуществами по сравнению с ранее использованными подходами.

Результаты самых первых экспериментов, полученные в 2000 г. в реакциях плутония-244 с кальцием-48 и $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$, сценарии распада и свойства ядер в цепочках последовательных α -распадов находились в хорошем согласии с расчетами по макро-микроскопической модели. По сравнению с самыми тяжелыми изотопами 110-го и 112-го элементов, полученными в реакциях холодного слияния, изотопы этих элементов, полученные в реакциях с кальцием-48, имеют дополнительно восемь нейтронов. В результате их периоды полураспада возросли примерно в 10^5 раз [4]!

Первооткрыватели и давнишние партнеры из Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Россия) и Национальной исследовательской лаборатории Лоуренса (США) предложили название флеровий (flerovium), символ Fl для элемента с атомным номером 114 и наименование ливерморий (livermorium), символ Lv для элемента с атомным номером 116. Наименование флеровий присвоено в честь Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова. Открытие флеровия было совершено в декабре 1998 г. путем синтеза изотопов через реакцию слияния ядер кальция с ядрами плутония, а ливермория – в 2000 г. путем реакции полного слияния кюрия и кальция.

Первооткрыватели из ОИЯИ (Дубна, Россия), Национальной ливерморской лаборатории им. Лоуренса (США), Ок-Риджской национальной лаборатории (Теннесси, США) и Университета Вандербильта предложили назвать элемент с атомным номером

115 московий (moscovium, символ – Mc), синтезированный в реакции америция с кальцием в 2004 и 2005 гг. Элемент с атомным номером 117 был синтезирован в 2009 г. в реакции берклия с кальцием и назван теннессин (tennessine, символ – Ts). Эти наименования следуют исторической традиции называть новые химические элементы в честь географических регионов. 9 октября 2006 г. российские и американские исследователи из ОИЯИ и Национальной исследовательской лаборатории Лоуренса официально сообщили о получении 118-го элемента, названного впоследствии в честь академика Ю. Ц. Оганесяна [15].

Находясь на пути тяжелых ионов, ядерная физика дала обществу множество полезных технологий, которые сегодня используются во всех сферах жизни. Это и атомные реакторы, и ускорители заряженных частиц, и лазеры, и космические корабли, и многое другое. И, конечно, ядром ядерной физики выступает физика тяжелых ядер, которая в современной науке занимает особое место. В ней сходятся многие проблемы современной науки – от физики элементарных частиц до физики конденсированного состояния вещества.

Помимо ядерной энергетики, сюда можно отнести магнитно-резонансную томографию и позитронно-эмиссионную томографию, которые применяются в медицинской диагностике, технику неразрушающего анализа материалов и изделий, которую применяют в производстве. Радиоизотопные технологии и методы детектирования излучений применяются в сельском хозяйстве для борьбы с вредителями и болезнями сельскохозяйственных культур, улучшения их свойств, мониторинга экологического состояния. Специализированные комплексы нейтронных источников и детекторов применяются в геологической разведке. Ускорительная техника находит применение во множестве отраслей, включая производство микроэлектроники вплоть до терапии онкологических заболеваний. Все эти прикладные технологии стали возможны благодаря фундаментальным знаниям об атомном ядре, полученных с помощью зачастую дорогих и масштабных лабораторных проектов.

Исследования границ стабильности изотопов химических элементов и синтез новых сверхтяжелых элементов были необходимы для проверки существовавших теоретических представлений ядерной физики: механизмов образования составного ядра, влияния ядерных оболочек на период полураспада, основных каналов распада тяжелых ядер, моделей ядерных потенциалов, предложенных разными группами теоретиков. В

XXI в. новую главу фундаментальных исследований открывают коллайдеры, созданные для столкновения очень тяжелых ядер, атомная масса которых приближается к 200, например, свинца и золота. Их фундаментальными задачами становятся изучение фундаментальных основ сильного взаимодействия кварков и глюонов, поиск новых состояний барионной материи.

Примером такого коллайдера служит созданный на базе модернизированного ускорителя Нуклотрон (действует в ОИЯИ с 1993 г.) коллайдер NICA [14]. Комплекс NICA обеспечит широкий спектр пучков: от протонных и дейтронных, до пучков, состоящих из таких тяжелых ионов, как ядра золота. Ядра будут ускоряться до энергии вплоть до 4,5 ГэВ/нуклон, протоны – до энергии 12,6 ГэВ. В коллайдере предусмотрены две точки детектирования: одна для изучения столкновения тяжелых ионов на MPD детекторе, другая – для поляризованных пучков для эксперимента на установке SPD. Первые эксперименты на нем начнутся уже в 2023 г. Дверка в мир сложных кварк-глюонных взаимодействий и первых микросекунд эволюции Вселенной после Большого Взрыва открывается перед Человечеством – кто знает, какие новые технологии и открытия удастся там найти?

Библиографический список:

1. Волков В. В. Ядерно-физические исследования с тяжелыми ионами: Избранные работы. Дубна: ОИЯИ, 2012. 390 с.
2. Манолов К. Биография атома. Атом от Кембриджа до Хиросимы / К. Манолов, В. Тютюнник. М.: Мир, 1984. 246 с.
3. Мещеряков М. Г. Памяти Льва Владимировича Мысовского (К семидесятипятилетию со дня рождения) / М. Г. Мещеряков, Н. А. Перфилов // Успехи физических наук: Сборник УФН. М.: Российская академия наук, 1963. С. 575-577.
4. Оганесян Ю. Ц. Синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической таблицы элементов Д. И. Менделеева // Вестник РФФИ. 2019. № 1(101). С. 87-89.
5. Храмов Ю. А. Физики: Биографический справочник под ред. А. И. Ахиезера. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Наука, 1983. 400 с.

6. Bohr N. The Mechanism of Nuclear Fission / N. Bohr, J. Wheeler // *Physical Review*. 1939. Vol. 56. Pp. 426-450.
7. Cockcroft J. Experiments with High Velocity Positive Ions / J. Cockcroft, E. Walton // *Further Developments in the Method of Obtaining High Velocity Positive Ions, Proceedings of the Royal Society*. 1932. Vol. 136. Pp. 619–630.
8. Dalrymple G. The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved. // *Geological Society London Special Publications*. 2001. Vol. 190 (1). Pp. 205-221.
9. Leiter D. *A to Z of Physicists*. New York: Facts on File, 2003. 388 p.
10. Flerov G. On the synthesis of element 105 / G. Flerov [et al.] // *Nuclear Physics*. 1970. Vol. 160, No. 1. Pp. 181-192.
11. Ghiorso A. Element 106 / A. Ghiorso, J. Nitschke, J. Alonso [et al.] // *Physical Review Letters*. 1974. Vol. 33, No. 25. Pp. 1490-1493.
12. Ghiorso A. Einsteinium and fermium // *Chemical & Engineering News Archive*. 2003. Vol. 81, No. 36. P. 174.
13. Heilbron J. *Lawrence and his Laboratory: A History of the Lawrence Berkeley Laboratory* / J. Heilbron, R. Seidel. Berkeley, California: University of California Press, 1989. 586 p.
14. Nuclotron-based Ion Collider facility [Electronic resource] // NICA. Available at: <https://nica.jinr.ru/ru/> (accessed date: 30.03.2023).
15. Oganessian Yu. Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116 in the ^{249}Cf and $^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ fusion reactions / Yu Oganessian, V. Utyonkov, Yu. Lobanov, F. Abdullin, A. Polyakov // *Physical Review C*. 2006. Vol. 74, No. 4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.74.044602>
16. Needham J. *Background to modern science. Ten lectures at Cambridge arranged by the History of science committee*. New York: Cambridge, 1938. 243 p.
17. Thomson J. XXIV. On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the Results to the Theory of Atomic Structure. *Philosophical Magazine Series 6*. 1904. Vol. 7, No. 39. Pp. 237-265.

18. Widerøe R. Ueber Ein Neues Prinzip Zur Herstellung Hoher Spannungen // Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik. 1928. Vol. 21, No. 4. Pp. 387-406.

Shumeyko M.V. **The main stages of the development of heavy ion physics: an attempt at reconstruction**

The article describes the key stages of the development of heavy ion physics. The author describes the history of the discipline from the moment the first ideas about atoms appeared in ancient philosophical thought to the latest discoveries of the XXI century. Nuclear reactions with heavy ions allowed us to obtain unique data on the structure and evolution of nuclear matter, to discover unique physical phenomena such as cascade decay of heavy nuclei, proton radioactivity, nuclear isomerism of form, as well as to synthesize new chemical elements, the very possibility of the existence of which was an important part of the scientific discussion in the XX century.

Keywords: history of physics, heavy ion physics, radioactivity, heavy ions, superheavy elements, artificial nuclear reactions.