

О НЕКОТОРЫХ ПРОЕКТАХ МОДЕРНИЗАЦИИ ЕРЕВАНСКОГО СИНХРОТРОНА АРУС

А.С. АКОПЯН¹, Г.О. МАРУКЯН¹, Г.Г. ГУЛЬБЕКЯН²,
Г.Т. ТОРОСЯН^{1,2}, А.З. БАБАЯН¹, Л.Р. ВАГРАДЯН¹

¹Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

e-mail: ashothako@yerphi.am

(Поступила в редакцию 4 мая 2022 г.)

В работе представлено краткое описание проектов модернизации и модификации Ереванского электронного синхротрона АРУС Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна (Ереванский физический институт). Описанные работы, предложенные в разные годы, представляют интерес в связи с обсуждением вопроса создания новой ускорительной базы в Армении для решения актуальных прикладных и фундаментальных физических задач.

1. Введение

Ереванский быстроциклический электронно-кольцевой ускоритель (ЭКУ) – синхротрон АРУС (АРмянский УСкоритель) – Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна (ННЛА, Ереванский физический институт – ЕрФИ), рассчитанный на энергию 6.1 ГэВ, был построен в 60-ых годах по инициативе и под руководством выдающегося ученого Артема Исааковича Алиханяна и являлся самым большим электронным синхротроном Советского Союза и одним из крупнейших в мире (рис.1).

Цитируя М.В. Келдыша, «... очень значительным событием – и в нашей (советской – прим. авторов) науке и мировой – является пуск ряда крупнейших ускорителей, в частности, электронного в Ереване на 6 миллиардов электрон-вольт...» [1]. На нем была реализована масштабная исследовательская программа, научные результаты которой получили широкое признание. Хорошо известны в научной среде исследования ученых ННЛА (ЕрФИ) по фоторождению мезонов уникальным пучком поляризованных гамма-квантов, изучению адронных свойств фотонов в реакциях фоторождения π -мезонов в ядрах, исследованиям структуры нуклонных резонансов в многополярных экспериментах, структуры и свойств ядерного материала. Физики ЕрФИ получили уникальные данные о спиновых корреляциях в процессах фоторождения, используя созданные на синхротроне пучки фотонов, обладающих высокой степенью поляризации. На ереванском синхротроне АРУС физиками ОИЯИ совместно с коллегами из ЕрФИ были проведены измерения медленных протонов и дейtronов отдачи, получавшихся при упругом рассеянии электронов

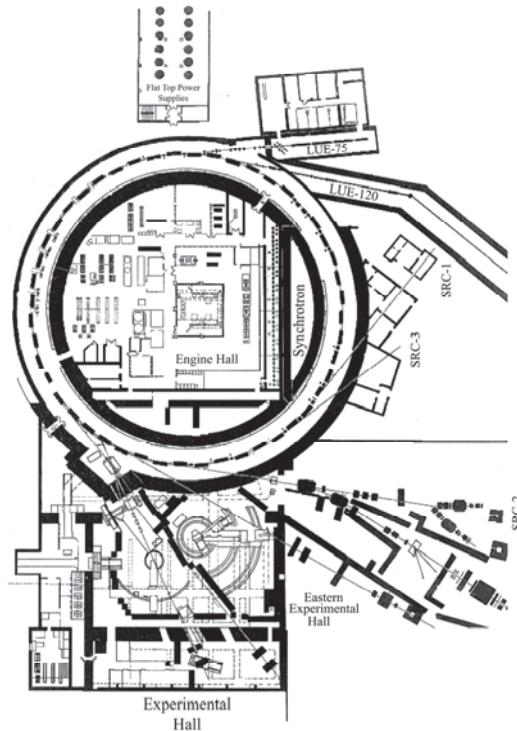


Рис.1. Схема Ереванского синхротрона АРУС.

на малые углы. Результатом этих опытов явился наиболее прямой метод определения электромагнитных радиусов протона и дейtronов, а также их формфакторы. Проводились исследования свойств рентгеновского переходного излучения, излучений узкоколимированных пучков релятивистских электронов, канализированных в кристаллах [2–4]. С использованием синхротронного излучения велись исследования в области кристаллофизики, радиационной биофизики, радиационного материаловедения. Эти и другие важные для науки работы публиковались в высокорейтинговых научных изданиях и имели приоритетное значение.

В настоящее время работа синхротрона в силу разных причин приостановлена. Продолжает работать только инжектор синхротрона – линейный ускоритель ЛУЭ-75, на котором проводятся исследования в области ядерной физики низких энергий [5–13].

Ускорительная техника является основным базисом экспериментальной ядерной физики для решения как фундаментальных, так и прикладных задач, включая ядерную медицину, радиобиологию, экологические проблемы, материаловедение и др.

В связи с возросшим интересом к задачам ядерной физики и расширением спектра научных исследований, планируемых экспериментаторами Армении, становится актуальным расширение экспериментальной базы НИЛА, в частности, создание новой или модернизации/модификации существующего ускорительного комплекса АРУС.

Целью данной статьи является краткое представление некоторых проектов и

предложений, сделанных в разные годы, по созданию в НИЛА (ЕрФИ) ускорительной техники, отвечающей потребностям современной науки. Но прежде, чем перейти к основной части настоящей статьи, заметим, что учеными НИЛА (ЕрФИ) разрабатывалось много значимых научных идей и предложений, в дальнейшем успешно использованных в других странах. К примеру, в 1971г. в работе Международной Школы по физике высоких энергий, ежегодно организуемой в Ереване А.И. Алиханяном, «... Артем Исаакович и Ю.Ф. Орлов представили проект электронно–позитронного ускорителя на встречных пучках с полной энергией 100 ГэВ. Этот проект содержал ряд новых идей, которые впоследствии были использованы при сооружении коллайдеров следующего поколения, он был очень близок к проекту будущего ускорителя LEP в ЦЕРН-е, который тогда еще даже не замышлялся. Проект был предан забвению, так как Артем Исаакович отказался вычеркнуть из авторского состава диссидентов Ю. Орлова. По словам Б.Л. Иоффе, если бы проект А. Алиханяна и Ю. Орлова был принят, то мировой центр по физике высоких энергий переместился бы в СССР» (цитата приведена из работы [14]).

2. О синхротроне АРУС

В период работы синхротрона проводилась перманентная модернизация узлов, была построена система «плоской вершины» магнитного поля, начато строительство нового сильноточного инжектора ЛУЭ-120, совершенствовалась система синхронизации, создавалась система автоматического контроля параметров с помощью ЭВМ [15]. Поэтому приведенные в таблице 1 параметры значительно отличаются от проектных и соответствуют состоянию на последний период работы вплоть до 2008 года.

Более подробно параметры представлены в работах [15,16].

3. Предложения и рекомендации по созданию новой экспериментальной базы на основе ускорителей тяжелых ионов

В 2009 году по инициативе Правительства РА была созвана, совместно с ОИЯИ, независимая Международная Комиссия Экспертов (МКЭ) для проведения независимой экспертизы с целью определения перспектив функционирования ЕрФИ с его ускорительной базой и возможных путей развития с учетом новых реалий, связанных с развалом СССР.

Комиссию возглавил выдающийся ученый, специалист в области экспериментальной ядерной физики, академик РАН Ю.Ц. Оганесян. В состав Комиссии вошли крупные специалисты-физики из разных стран – России, Германии, Франции, Великобритании, США, Швейцарии, представители крупных научных центров – ОИЯИ, ЦЕРН, ДЕЗИ и др.

Рекомендации Комиссии были сделаны с учетом актуальности направлений исследований, а также финансовых условий, связанных с новыми реалиями в

Табл.1. Параметры ускорителя АРУС

Параметры инжектора – ЛУЭ-75	
Оборотность инжекции	однооборотная
Энергия на выходе инжектора, МэВ	до 75
Макс.ток в импульсе, мА	170
Энергетический разброс на выходе инжектора, %	2
Частота следования сгустков, ГГц	2.7973
Длительность импульсов, мкс	0.5–1.0
Частота следования макроимпульсов, Гц	50
Параметры электронно-кольцевого ускорителя (ЭКУ-6)	
Максимальная энергия, ГэВ без «плоской вершины»	6.1
с «плоской вершиной» длительностью (2.0–4.5) мс	2–4.5
Длина равновесной орбиты, м	216
Тип и схема магнитной структуры синхротрона	знакопеременная, FOFDOD
Число периодов магнитной структуры	24
Число магнитных блоков	48
Число бетатронных колебаний на орбите: радиальных вертикальных	5.276 5.294
Число ускоряющих резонаторов	23
Частота ускоряющего напряжения, МГц	132.79 ± 0.53
Вакуум, Торр	10^{-6}
Число электронов в цикле ускорения	1×10^{11}
Частота повторений циклов, Гц	50
Циркулирующий ток, мА	22
Период обращения, мкс	0.7229
Время ускорения, мс	9.3
Длительность «плоской вершины», мс	1.0–4.5
Прирост энергии на оборот, кэВ на инжекции	220
максимальный	720
Число каналов медленного резонансного вывода первичных пучков	1
Число каналов медленного бим-бамп вывода с внутренних мишеней вторичных гамма-пучков	3
Число фотонов в пучках СИ в полосе $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-3}$ при энергии 4.5 ГэВ и токе 10 мА ускоренного пучка в телесном угле 1 мрад на длинах волн λ от 0.6 до 2.0 Å	4×10^{10} – 0.5×10^{10}

Республике. По итогам работы Комиссии были выработаны рекомендации, которые были представлены и, в целом, одобрены Правительством Армении.

После одобрения Правительством РА совместно с ОИЯИ и другими научными центрами была подготовлена программа для выработки конкретных концептуальных вариантов развития ускорительной базы ЕрФИ на основе

рекомендаций МКЭ.

В силу ряда причин данная программа, не была осуществлена. Однако, она представляется актуальной и сегодня.

Ниже приведены несколько примеров развития ускорительной базы ЕрФИ по применению пучков тяжелых ионов в прикладных и фундаментальных исследованиях, подготовленных для рассмотрения на начальной стадии поиска решения поставленной задачи, в соответствии с рекомендациями МКЭ.

1. Ионные источники тяжелых ионов типа ECR (электронно-циклотронный резонанс) на высоковольтной (до 300 кВ) платформе, 3–4 пользовательских канала. Направления исследований: имплантация и модификация материалов, изучение эффектов флюоресценции и др.
2. Циклотронный ускоритель тяжелых ионов с энергиями 0.1–2.0 МэВ/нуклон для ионов от Li до Xe. Направления исследований: имитация потока продуктов деления урана в ядерных реакторах и изучения свойств реакторных материалов под воздействием потоков продуктов деления урана; модификация материалов, создание новых; трековые мембранны.
3. Циклотронный ускоритель тяжелых ионов до энергий 2 ÷ 10 МэВ/нуклон. Ионы – от Li до U. Технологии: тестирование электронных компонентов космического назначения, ядерная физика. Такая установка может служить также в качестве инжектора синхротрона.
4. Тяжелоионный синхротрон на энергию 50–500 МэВ/нуклон в канале синхротрона ЕРФИ для получения ускоренных пучков ионов, начиная от протонов, включая ^4He и ^{12}C для терапии, а также широкий спектр ионов до U.

Применение:

- терапия онкологических образований;
- радиобиология и радиомедицина;
- тестирование электроники космического применения;
- ядерная физика.

Также обсуждался вопрос о возможности создания тяжелоионного синхротрона на энергию 1–2 ГэВ/нуклон непосредственно в кольце АРУС.

Реализация первых двух пунктов позволяет: вести работы по ионной имплантации в технологических процессах полупроводниковой электроники, модификации поверхностного слоя материалов деталей механизмов машин с целью улучшения их эксплуатационных свойств, повышению ресурса работы, надежности; создание новых материалов; для коммерческих целей производить трековые мембранны с диаметром пор от нескольких десятков нм до мкм, используемые в качестве микро- и нанофильтров для очистки от примесей, взвесей, содержащих бактерии и вирусы. Применение пучковых методов в нанотехнологических процессах отличается, помимо прочего, экологической чистотой, что актуально в условиях угрожающей загрязненности окружающей среды.

Второй пункт, позволяющий изучать влияние потоков продуктов деления урана на свойства реакторных материалов, особенно важен для Армении, на

территории которой расположена Мецаморская атомная электростанция.

Третий и четвертые пункты позволяют осуществлять обширную программу исследований, включая задачи, возникающие на стыке различных направлений: ядерной физики, радиоэлектроники, ядерной медицины, радиобиологии, экологии и др.

Предполагалась совместная разработка концептуального проекта ускорительного комплекса с возможным привлечением специалистов из других стран-участниц ОИЯИ [17].

4. Проект накопительно-растяжительного кольца

Научные ускорители заряженных частиц требуют постоянной модернизации по мере поступления новой элементной базы, а зачастую и модификации, в зависимости от тех новых задач, которые ставит перед учёными ядерная физика и физика элементарных частиц. В 80–90-ых годах были разработаны актуальные для того времени проекты по модернизации ереванского синхротрона АРУС в мощный источник синхротронного излучения (СИ) – проект ЕРСИНЭ. Были проработаны инженерные вопросы технического проекта создания нового накопительно-растяжительного кольца (НРК) на энергию электронов до 14 ГэВ, бустером которого предполагалось использовать существующее синхротронное кольцо ЭКУ-6 со строявшимся в то время новым сильноточным инжектором на 120 МэВ (рис.2). На прямолинейных участках накопительного кольца устанавливались длинные вигглерные и ондуляторные устройства, с помощью которых создавались десятки синхротронных каналов с γ -пучками различных длин волн.

Целью проекта было систематическое исследование ядерных сил и структуры ядер: в ЕрФИ в конце 80-х, начале 90-ых была разработана обширная программа экспериментальных исследований в области энергий (1–14) ГэВ. Появлялась возможность изучения взаимодействий частиц на расстояниях, меньших нуклонных размеров, т.е. меньше 1 Ф. Был запланирован широкий спектр работ (при перечислении работ, приведенных ниже, был использован материал из [15,16]) по исследованию:

- процессов фото- и электророждения частиц и сравнение результатов с предсказаниями теоретических моделей;
- мультиполлярные исследования на нуклонах и малонуклонных системах в этих процессах;
- исследования по обнаружению экзотических состояний элементарных частиц;
- исследование резонансов на ядрах;
- исследование процессов фрагментации кварков в адроны;
- в указанном энергетическом диапазоне появлялась возможность исследования структуры электрослабого взаимодействия в поляризационных экспериментах по электророждению на ядрах.

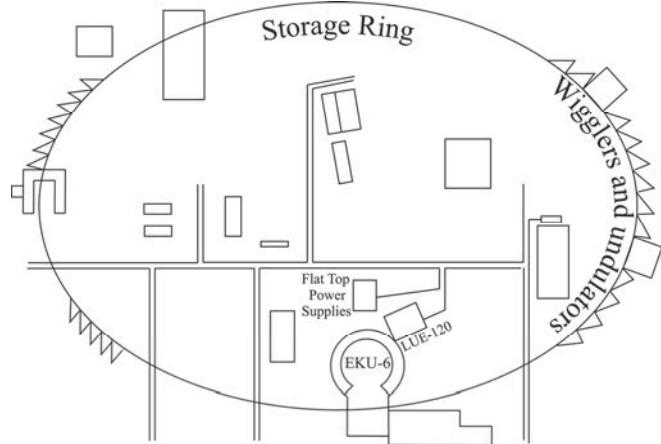


Рис.2. Упрощенный эскиз структуры НРК на энергию 6–14 ГэВ. Прямоугольниками обозначены здания, подсобные помещения и другие звенья инфраструктуры комплекса; прямые линии—дороги.

С целью реализации этих и других работ предусматривалось:

- создание новых комплексных физических установок – регистрирующих спектрометров, систем мониторирования частиц и др;
- модернизация и развитие Ереванского электронного синхротрона, превращение его в современный для того времени электронно-фотонный комплекс.

Новый электронно-фотонный комплекс планировалось создать поэтапно:

- первый этап предусматривал ввод в эксплуатацию 1-ой очереди системы формирования «плоской вершины» магнитного поля длительностью 5 мс с коэффициентом заполнения (duty factor) 20%. Инжектором синхротрона служил ЛУЭ-75. При энергиях электронов до 4.5 ГэВ продолжались работы по резонансной физике, прикладные исследования по радиационному материаловедению на пучках СИ и другие задачи ядерной физики;
- второй этап предусматривал: создание 2-ой очереди системы «плоской вершины» магнитного поля длительностью 20 мс с коэффициентом заполнения 50%, полную модернизацию ВЧ системы синхротрона – переход на более высокочастотные ускоряющие резонаторы с частотой 466 МГц; ввод в строй нового инжектора – сильноточного линейного ускорителя на 120 МэВ – ЛУЭ-120. Создавалась возможность работы на энергиях электронов до 6 ГэВ со средним током пучка, увеличенным на порядок – до 5 мкА. Намечалось создание системы меченых поляризованных фотонов, изучение физики мезонных резонансов и поиск экзотических адронов; прикладные исследования по радиационному материаловедению на пучках СИ при больших интенсивностях потоков электронов и гамма-квантов.
- третий этап предусматривал обширные работы по реконструкции существующего синхротрона. Создавалось большое кольцо на (6–14) ГэВ, по проекту энергия инжекции в это кольцо поднималось до 6 ГэВ, т.е. существующий синхротрон должен был служить бустером для большого

кольца, который мог служить также накопителем. Средний ток пучка повышался до 100 мкА, коэффициент заполнения – до 100%. Становилось возможным проводить обширные работы по ядерной физике, обнаружение кварковых эффектов, прикладные исследования по радиационному материаловедению с использованием СИ при высоких яркостях (10^{20} фотонов/с) пучков и большем количестве выводных каналов.

В дальнейшем предусматривалось создание электрон-позитронного коллайдера (рис.3) на энергию 30 ГэВ (в системе центра масс).

По этому проекту периметр коллайдера охватывал всю территорию ЕрФИ. Внутри этого периметра планировалось разместить инфраструктуру – коммуникационные линии связи, дороги, подземные и надземные сооружения для различных технических и контрольных служб комплекса.

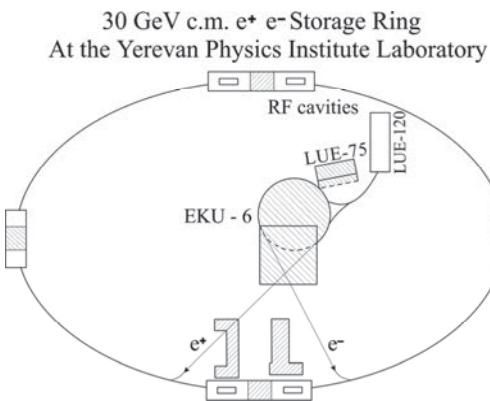


Рис.3. Упрощенный эскиз проекта коллайдера на 30 ГэВ.

5. О возможной реализации низкоэнергетического стретчерного режима синхротрона АРУС

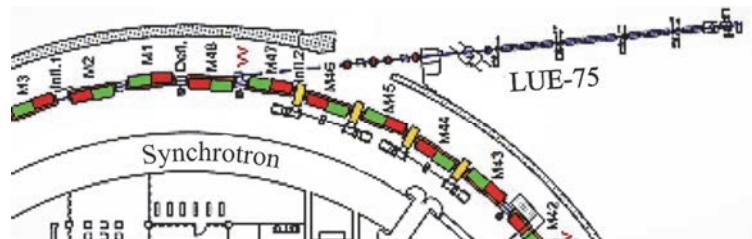
В работах [18–20] предлагается актуальная долгосрочная программа исследования кластерных структур нейтроннобогатых изотопов легких ядер (He, Li, Be) в основных и возбужденных состояниях в двух- и трехчастичных реакциях фоторасщепления в энергетическом диапазоне фотонов $E_\gamma = 30\text{--}75$ МэВ. Было предусмотрено выполнить моделирование и расчеты этих процессов. Группирование нуклонов в кластеры является одним из важных явлений в структуре атомных ядер, богатых нейтронами. Актуальны также исследования экзотических структур при чрезмерном избытке нейтронов, когда ядро приближается к состоянию самопроизвольного распада – при этом образуется явление нейтронного гало [21]. Эти исследования важны и для понимания процессов ядерного синтеза в космических объектах.

Для реализации этой программы следует создать экспериментальную аппаратуру для исследования кластерных структур. В первую очередь предлагается модернизировать Ереванский электронный синхротрон и

реализовать низкоэнергетический режим растяжителя (stretcher mode) с медленным выводом пучка в течение 3–5 мс, что позволит не только увеличить время взаимодействия с мишенью, но и даст возможность одновременного вывода на две внутренние мишени, что важно для сопоставления и выявления совпадающих событий. Кроме задач по исследованию кластерных структур атомных ядер, режим растяжителя может быть использован и для других задач, например, для эффективного изучения явлений когерентного тормозного излучения релятивистских электронов под воздействием акустических полей в монокристаллах.

Кратко опишем проект работы синхротрона в низкоэнергетическом режиме растяжителя, позволяющем эффективнее использовать инжектируемый в кольцо 50–75 МэВ-ный пучок, т. к. в предлагаемом варианте увеличивается коэффициент заполнения периода импульса (duty factor) до 25%. Это важно для анализа на совпадение по меньшей мере двух частиц в процессах рассеяния электронов на нуклонных ядрах. Увеличение этого параметра позволяет исключить случайные совпадения, изучить процессы с малыми сечениями взаимодействия [18,20].

Предполагается импульсный релятивистский пучок электронов из инжектора – линейного ускорителя ЛУЭ-75 – ввести в кольцо синхротрона (рис. 4), и постоянным магнитным полем кольцевого электромагнита удерживать его в течение примерно 5 мс. За это время пучок совершил 7000 оборотов по кольцу в области равновесной орбиты и одновременно будет медленно выводиться на внутреннюю мишень отклоняющим магнитом beam-bump: путем программно-управляемого питания этого магнита пучок медленно смещается в радиальном направлении и наводится на мишень. Тем самым, время вывода, а значит, и время непрерывного взаимодействия с мишенью, получается много больше (в 7000 раз) времени одного оборота. Влиянием радиационных эффектов – синхротронного излучения – на процесс медленного вывода (на эффективность вывода, эммитанс пучка и др.) можно пренебречь из-за низкой энергии пучка. Формируется растянутый во времени до 5 мс пучок электронов с энергией до 75 МэВ и средним током 1 мкА. Наряду с электронными пучками конвертерным способом полученные γ -пучки длительностью порядка 5 мс могут быть использованы в экспериментах по фундаментальным и прикладным исследованиям.



Моделирование движения релятивистского пучка электронов в синхротроне АРУС в режиме низкоэнергетического растяжителя было выполнено по программе OptiM, с учетом краевых нелинейностей магнитной дорожки электромагнита синхротрона, фактически, с учетом динамической апертуры синхротронного кольца [19]. Расчет динамики пучка показал, что в вакуумной камере при давлении 10^{-6} Торр рассеяние электронного пучка на ядрах остаточного газа приводит к увеличению поперечного сечения пучка. Однако, получаемые размер и эмиттанс пучка после многооборотной (7000 оборотов за 5 мс) циркуляции допустимы при существующем акцептансе синхротрона, и рассеяние электронов не приводит к ограничению для режима работы синхротрона АРУС в качестве растяжителя пучка, инжектируемого с выхода ЛУЭ-75.

Режим растяжителя с энергией пучка 75 МэВ без ускорения в синхротроне малозатратен: не включается ВЧ питание резонаторов синхротрона, нет необходимости в охлаждении и термостатировании резонаторов, кольцевой электромагнит будет питаться маломощным стабилизированным по току источником постоянного тока. Расчетная потребляемая мощность синхротрона в стретчерном режиме с энергией 75 МэВ порядка 100 кВт.

Для реализации стретчерного режима с энергией 75 МэВ необходимо:

- модернизировать действующий инжектор ЛУЭ-75;
- восстановить гидроизоляцию зданий ускорительного комплекса АРУС;
- заменить физически и морально устаревшую неэффективную вакуумную систему синхротрона современной системой, позволяющей компьютерный мониторинг вакуумного тракта;
- обеспечить работу системы ввода – дефлектора и инфлектора – для энергии 75 МэВ;
- создать программно-управляемое питание отклоняющего магнита – выводного магнита beam-bump.

6. Заключение

Как было отмечено во введении, проектов и предложений по модернизации синхротрона АРУС было много, мы лишь привели некоторые из них. Из-за известных событий 90-ых и последующих лет, они не были осуществлены. К настоящему времени реализация некоторых проектов нецелесообразна из-за уже действующих в мире мощных гигантских ускорителей, или маловероятны ввиду финансовых трудностей. Судьба Ереванского синхротрона остается неопределенной по сей день. Поэтому проблема остается актуальной, и настоящая статья призвана способствовать обсуждению данного вопроса.

Крупные ускорители создаются для конкретных физических программ или даже для конкретной задачи, решение которой вносит крупный вклад в науку или технологии. Для страны с малыми ресурсами, тем более в период финансовых затруднений, важна многофункциональность таких больших и дорогих физических установок.

Наиболее целесообразным представляются предложения и рекомендации авторитетной МКЭ, которые остаются актуальными и по сей день, а именно, создание новой физической установки на платформе Ереванского синхротрона АРУС для ускорения тяжелых ионов, которая будет применяться для исследований в области ядерной физики, а также методических и научно-технических задач ядерной медицины, включая получение радионуклидов для медицинской диагностики, радиобиологии, тестирования элементной базы космической радиоэлектроники. Такой ускоритель может быть успешно использован и для создания новых технологий, например в материаловедении, нанотехнологии. Предполагалось, что окончательный проект нового ускорителя при совместной разработке НИЛА–ОИЯИ должен отвечать современным требованиям и задачам в указанных областях с учетом новых достижений.

Целесообразность расположения нового ускорителя на месте синхротрона АРУС, согласно рекомендациям МКЭ, исходит из следующих соображений. Во-первых, место постройки синхротрона АРУС было выбрано с учетом того, что Армения является сейсмически активной зоной. В результате геолого-разведывательных работ была обнаружена естественная мощная базальтовая платформа, послужившая основанием ускорителя. Геодезические измерения, проведенные после мощного Спитакского землетрясения, обнаружили сдвиг магнитов лишь в десятые доли миллиметра, который был легко устранен механической регулировкой. Во-вторых, может быть использована существующая инфраструктура синхротрона; здания, постройки, имеющаяся система электро- водоснабжения, внутренние коммуникации и др. Конечно, после соответствующего ремонта, а где необходимо, и реконструкции, в соответствии с потребностями нового ускорителя. В-третьих, имеется возможность использования специалистов, имеющих опыт эксплуатации и обслуживания подобных физических установок. Хотя их число за последние годы резко уменьшилось и вопрос подготовки специалистов в области ускорительной физики и техники в настоящее время стоит остро, имеющиеся квалифицированные кадры могут оказаться полезными, по крайней мере, на первом этапе работ.

Из вышеизложенного представляется очевидной целесообразность активации начатых в недавнем прошлом работ по претворению рекомендаций Международной комиссии экспертов по расширению ускорительной базы НИЛА-ЕрФИ.

Несмотря на приостановку работы синхротрона, Армения продолжает оставаться региональным центром по применению ускорительной физики и техники в научных исследованиях. На электронном ускорителе ЛУЭ-75 НИЛА (ЕрФИ), протонном медицинском циклотроне С-18/18 с возможностью проведения физических опытов, а также линейном ускорителе AREAL Института синхротронных исследований CANDLE проводятся научно-исследовательские работы учеными из научных центров Армении и других стран.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.R. Tumanyn, H.A. Martirosyan**, Yerevan electron accelerator "ARUS", Yerevan, 1970.
2. **A.I. Alikhanian, K.A. Ispirian, A.G. Oganessian, A.G. Tamanian**. Nucl. Instrum. Meth., **89**, 147 (1970). [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(70\)90817-7](https://doi.org/10.1016/0029-554X(70)90817-7)
3. **A.I. Alikhanian, K.M. Avakian, G.M. Garibian, M.P. Lorikian, K.K. Shikhlarov**. Phys. Rev. Lett., **25**, 635 (1970).
4. **A.O. Aganyants, Yu.A. Vartanov, G.A. Vartapetian, M.A. Kumakhov, Kh. Trikalinos, V.Ya. Yaralov**. Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz., **29**, 554 (1979).
5. **A.S. Hakobyan**. J. Contemp. Phys., **56**, 169 (2021).
6. **A.S. Hakobyan, H.H. Marukyan, H.H. Hakobyan, A.Z. Babayan, L.R. Vahradyan, V. Baranov, Yu.I. Davydov, A. Krasnoperov, A. Simonenko, V. Tereshchenko, H.T. Torosyan, H.G. Zohrabyan, G.M. Ayvazyan, H.S. Vardanyan A.K. Papyan**. J. Contemp. Phys., **57**, 12 (2022).
7. **A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan, A. Papyan**. J. Contemp. Phys., **53**, 271 (2018).
8. **G.H. Hovhannisyan, et al.**, Applied Radiation and Isotopes, **182**, 110138 (2022).
9. **G.H. Hovhannisyan, et al.**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, **B498**, 48 (2021).
10. **A. Avetisyan, et al.**, Nuclear Medicine and Biology, **47**, 44 (2017).
11. **R.V. Avetisyan, et al.**, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, **B507**, 7 (2021).
12. **A.Y. Aleksanyan, S.M. Amirkhanyan, H.R. Gulkanyan, T.V. Kotanjyan, V.S. Pogosov, L.A. Poghosyan**. J. Contemp. Phys., **57**, 112 (2022).
13. **A.Y. Aleksanyan, S.M. Amirkhanyan, A. Balabekyan, N.A. Demekhina, H.R. Gulkanyan, T.V. Kotanjyan, V. Mangasaryan, V.S. Pogosov, L.A. Poghosyan, S. Faltajanyan**. J. Contemp. Phys., **55**, 275 (2020).
14. **H.M. Asatryan, T.G. Hambardzumyan**. J. Contemp. Phys., **44**, 209 (2009).
15. **A.Ts. Amatuni, et al.**, Preprint YeRPHI 1322(17)-91.
16. **A.Ts. Amatuni, A.S. Alexanyan, R.O. Avakyan, et al.**, EPAC1988 - CERN, 305.
17. http://crd.yerphi.am/files/SAB_meeting_docs_end.pdf
18. **Al. Sirunyan**. Project submitted for the base funding of Artem Alikhanyan National Laboratory. <http://epd.yerphi.am/A.Sirunyan.pdf>.
19. **A.Z. Babayan, V.Ts. Nikogosyan, S.P. Taroyan**, J. Contemp. Phys., **49**, 95 (2014).
20. **A. Sirunyan**. On the creation in YerPhi of an experimental base for research in low-energy nuclear physics based on LUE-75 and EKU. <http://book.lib-i.ru/25fizika/393013-1-oszdanii-erfi-eksperimentalnoy-bazi-dlya-issledovaniy-yadernoy-fizike-nizkih-energiy-osnove-lue-75-eku.php>.
21. Nuclear clusters: from light exotic to superheavy nuclei.
<http://jinrmag.jinr.ru/win/2002/43/kl43.htm>

ԵՐԵՎԱՆԻ ԱՐՈՒՍ ՍԻՆՔՏՐՈՆԻ ԱՐԴԻԱԿԱՆԱՑՄԱՆ
ՈՐՈՇ ՆԱԽԱԳԾԵՐԻ ՄԱՍԻՆ

Ա.Ա. ՀԱԿՈԲՅԱՆ, Հ.Հ. ՄԱՐՈՒԿՅԱՆ, Գ.Գ. ԳՈՒԼԲԵԿՅԱՆ,
Հ.Տ. ԹՈՐՈՍՅԱՆ, Ա.Զ. ԲԱԲԱՅԱՆ, Լ.Ռ. ՎԱՀՐԱԴՅԱՆ

Ներկայացված է Ա. Ալիխանյանի անվան Ազգային գիտական լաբորատորիայի (Երևանի ֆիզիկայի ինստիտուտ) ԱՐՈՒՍ էլեկտրոնային սինքրոտրոնի արդիականացման և մոդիֆիկացիայի նախագծերի համառոտ նկարագրությունը: Տարբեր տարիներին մշակված և առաջարկված աշխատանքները հետաքրքրություն են ներկայացնում Հայաստանում նոր արագացուցչային բազայի ստեղծման հարցի քննարկման կապակցությամբ՝ ակտուալ կիրառական և ֆիզիկայի հիմնարար խնդիրների ուսումնասիրման համար:

ON SOME PROJECTS OF MODERNIZATION OF THE
YEREVAN SYNCHROTRON ARUS

A.S. HAKOBYAN, H.H. MARUKYAN, G.G. GULBEKYAN,
H.T. TOROSYAN, A.Z. BABAYAN, L.R. VAHRADYAN

The paper presents a brief description of the projects for the modernization and modification of the Yerevan Electron Synchrotron ARUS of the A. Alikhanyan National Science Laboratory (Yerevan Physics Institute). The described works, proposed in different years, are of interest in connection with the discussion of the issue of creating a new accelerator base in Armenia for solving actual applied and fundamental physical problems.