

ИЗУЧЕНИЕ ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ФОТОННЫХ И ПРОТОННЫХ ПУЧКАХ В ННЛА

И. КЕРОБЯН, Г. МАРУКЯН*

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

*e-mail: maruk@mail.yerphi.am

(Поступила в редакцию 29 августа 2019 г.)

Несмотря на наличие большого числа экспериментальных данных относительно протон-ядерных и фото-ядерных реакций в области низких энергий, новые экспериментальные измерения по-прежнему необходимы для получения представления о некоторых еще нерешенных проблемах в области ядерной физики. В частности, большой интерес представляют вопросы нуклеосинтеза звезд, изучение резонансных состояний легких ядер, основные механизмы реакций (p, n) , (p, α) и (γ, p) , (γ, n) . С этой целью обсуждается возможность эксплуатации существующего линейного ускорителя электронов и циклотрона С18/18, который недавно запущен в ННЛА (Ереванский Физический Институт). Представлены также вопросы модернизации существующего электронного ускорителя и приобретения новой современной машины для изучения вышеупомянутых проблем ядерной физики.

1. Введение

Наши знания о структуре ядра в основном были получены при изучении энергии возбуждения и спиновых переменных ядер в процессах рассеяния различных типов частиц в ядерной материи. Исследования в экспериментах с неподвижной мишенью при релятивистских энергиях были проведены для выявления природы кварк-глюонной структуры адронов в ядерной среде. С другой стороны, исследования при низких энергиях с электронными, фотонными, протонными и нейтронными пучками позволяют исследовать структуру и динамику ядер. Научно-технический прогресс сегодня немыслим без развития ускорительной технологии. Действительно, значительные достижения науки были зафиксированы с помощью ускорителей заряженных частиц и, в частности, ускорителей электронов.

Основной экспериментальной базой Ереванского Физического Института (ЕрФИ) являются действующий линейный ускоритель электронов ЛУЭ-75, а также циклотрон С18/18, который недавно сдан в эксплуатацию. Коммерческий

циклотрон ИВА С18/18, предназначенный обеспечить пучки для общепринятого метода производства ^{18}F и других радиоизотопов для позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), оснащен специально разработанным внешним пучкопроводом длиной 2 м, заканчивающимся в отдельном специальном экспериментальном зале. Предлагается использовать внешний выведенный пучок для проведения исследований в области протон-индуцированных реакций, для получения вторичных нейтронных пучков, а также для разработки новых детекторов и т.д. Вместе с этим рассматривается вопрос о приобретении современного ускорителя электронов. В последние два-три десятилетия появился новый класс ускорителей электронов с рециркуляцией, электронные орбиты которых отличны от формы окружности. Первым ускорителем такого типа был родотрон, названный так из-за электронной орбиты в форме цветка розы. Родотроны удобны для промышленного применения, где требуется высокая мощность и/или высокая доза облучения. Кроме того, подходящая энергия и большой ток электронного пучка позволяют использовать их и в исследовательских целях.

Для промышленного применения представляют интерес также линейные ускорители электронов высокой мощности. Эти ускорители представляют собой импульсные линейные высокочастотные машины, предназначенные для широкого использования в различных технологических процессах. Они предназначены для длительной непрерывной и круглосуточной работы в стандартных промышленных условиях.

2. Линейный ускоритель ЛУЭ-75 и программа на электронных машинах

До 2005 года линейный ускоритель электронов ЛУЭ-75 служил инжектором для синхротрона АРУС, Ереван, Армения. После остановки синхротрона АРУС в 2008 году ЛУЭ-75 функционировал в отделе экспериментальной физики в ЕрФИ в качестве экспериментальной базы, используемой для решения актуальных вопросов ядерной физики низких энергий [1]. В последние годы для повышения надежности работы линейного ускорителя он был реконструирован и адаптирован к новым требованиям. Благодаря специальной установке параллельного вывода пучка и магнитной оптики, расположенных в синхротронном зале, стало возможно с помощью ускорителя электронов выполнять различные эксперименты по исследованию электро- и фото-ядерных явлений и электронного излучения в монокристаллах, по изучению возможности получения радиоизотопов $^{99\text{m}}\text{Tc}$ и ^{123}I для медицинских диагностических целей и т. д. Вид ускоряющих секций ЛУЭ-75 показан на Рис.1.

В 2015–2018 гг. совместно с ОИЯИ (Дубна, Россия) линейный ускоритель был запущен по специально разработанному малоинтенсивному режиму



Рис.1. Ускоряющие секции линейного ускорителя ЛУЭ-75.

(10–20 $e^-/\text{сек}$, 10–50 МэВ) [2] для калибровки кристаллов CsI, предназначенных для эксперимента Mu2e (Muon-to-Electron Conversion Experiment, FNAL, США). Измерения проводились в области энергии 15–50 МэВ с шагом 5 МэВ с использованием матрицы (3×3) из 9 кристаллов CsI (Рис.2), завершая результаты, полученные Mu2e в коллаборации с группой BTF (Frascati, Италия) в области энергии 80–120 МэВ [3]. В этих калибровочных экспериментах максимальная энергия пучка не превышала 50 МэВ, так как были включены только две из трех ускоряющих секций ЛУЭ-75.

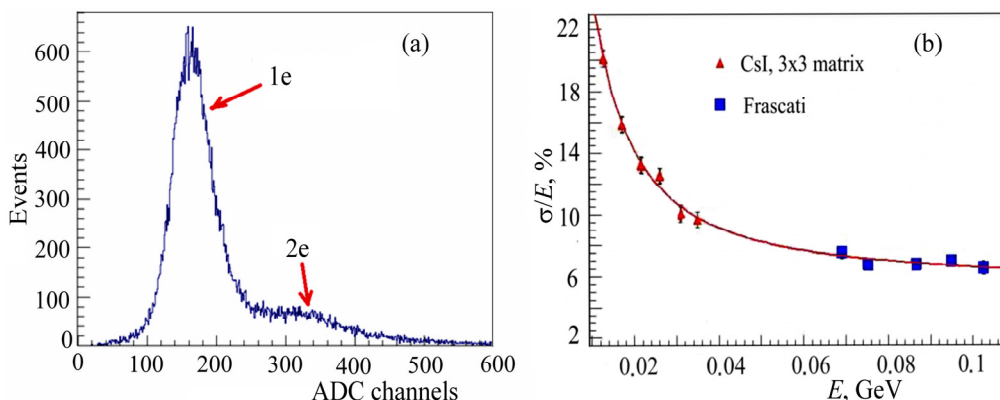


Рис.2. Гистограмма распределения числа событий в каналах ADC [2] (a); энергетическое разрешение (3×3) матрицы из 9 кристаллов CsI [3] (b).

Недавно в Отделении Экспериментальной Физики были выполнены следующие работы, связанные с комплексом, созданным на основе линейного ускорителя ЛУЭ-75:

- после модернизации, в частности, после запуска третьей ускоряющей секции ЛУЭ-75, был получен стабилизированный электронный пучок с энергией до 75 МэВ при среднем токе 0.5 мкА;
- пучок с энергией 75 МэВ был успешно сдвинут в конец магнитной оптики для параллельного переноса.

Наряду с этим велись работы по обеспечению теплового режима магнитов параллельного переноса. Для этого были подготовлены новые дополнительные катушки, установка которых обеспечивала безопасные и более продолжительные сеансы выведения пучка.

Электронные пучки с энергией 50–75 МэВ комплекса линейного ускорителя ЛУЭ-75 [4] позволят группе ОИЯИ проводить измерения для калибровки матрицы кристаллов CsI в энергетической области ниже 80 МэВ. Увеличение энергии установки линейного ускорителя ЛУЭ-75 до 75 МэВ создает условия для совместных исследований ОИЯИ (Дубна) – Национальной Научной Лаборатории им. А. Алиханяна (ННЛА) (ЕрФИ, Ереван) в диапазоне энергий 50–75 МэВ. Кроме того, это даст возможность проводить исследования фотоядерных процессов в высокопороговых реакциях, включенных в планы исследований Отделения Экспериментальной Физики Фонда ННЛА и Ереванского Государственного Университета. Наличие таких пучков предоставит большие возможности для изучения фундаментальных и прикладных проблем ядерной физики низких энергий.

Продолжаются исследования функций возбуждения ядер тормозным излучением электронов от ЛУЭ-75 с использованием метода активации. Этот метод является традиционным для изучения ядерных реакций в ННЛА. Также рассматривается возможность производства изотопов на ЛУЭ-75, в частности, фоторождения терапевтического изотопа рения-186. Традиционно он производится на нейтронных пучках реакторов с использованием мишени из природного рения. Для этого нейтроны должны находиться в эпитепимально-тепмальной области энергии, где сечение захвата нейтронов достаточно велико. Исследуется альтернативный метод производства рения-186 в энергетической области гигантского резонанса с помощью тормозного пучка электронов ускорителя ЛУЭ-75. На Рис. 3 показаны сечение фоторождения рения-186 в основном состоянии, рассчитанное по ядерному коду TALYS 1.9 [5], и спектр тормозного излучения

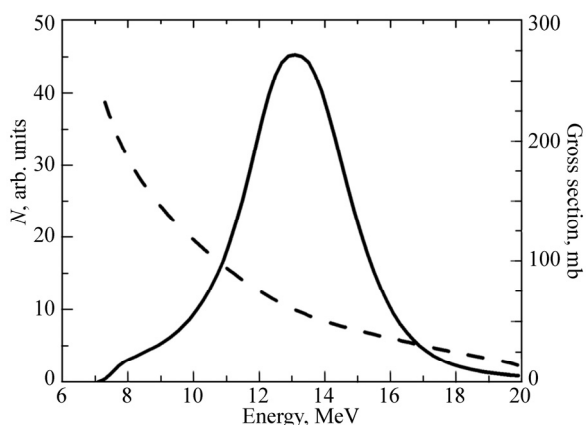


Рис.3. Поперечное сечение получения ^{186}Re , вычисленное кодом TALYS 1.9 [4] (сплошная кривая) и гамма-спектр, вычисленный кодом PENELOPE [5] (штриховая кривая).

электронов при энергии 40 МэВ, вычисленный кодом PENELOPE [6].

Отметим, что экспериментальные исследования γ -индуцированных реакций представляют интерес также для астрофизических явлений, где γ -индуцированные реакции являются доминирующими, и для изучения реакций радиационного захвата, где прямые исследования затруднены с технической точки зрения.

3. Программа изучения ядерных реакций при низких энергиях на циклотроне C18/18

Циклотрон Cyclone C18/18 Twins (дуплет) [7], обладающий всеми основными характеристиками семейства Cyclone C18, был спроектирован специально для размещения двух новых протонных ионных источников. Благодаря двойной системе ионных источников значительно увеличивается их время жизни, сокращается количество вмешательств по техническому обслуживанию и значительно снижается облучение персонала.

На циклотроне сконструирован специальный пучкопровод для выведенного пучка протонов, предназначенный для экспериментальных исследований в области ядерной физики низких энергий. На Рис.4 показан общий вид циклотрона с выведенным пучкопроводом.

В Таблице приведены технические характеристики циклотрона C18/18.

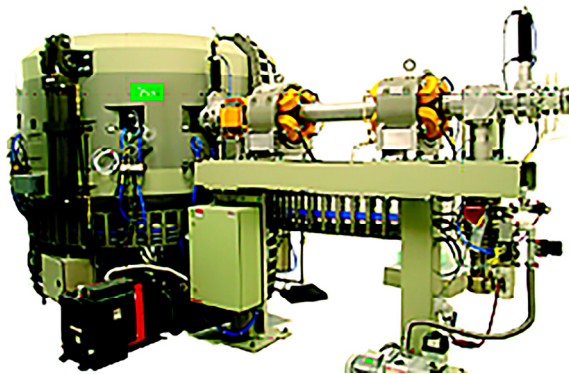


Рис.4. Общий вид циклотрона C18/18.

3.1. Изучение протон-индуцированных реакций

Исследования ядерной физики низких энергий связаны с пониманием структуры и стабильности ядер, а также реакций их образования в космосе. В последнее время было разработано много экспериментальных методов для получения и регистрации нейтронов и заряженных частиц в широкой области

Энергия	18 МэВ протон
Ток пучка протонов	Высокий ток (НС): 150 мкА Стандартный ток (ST): 100 мкА
Плоскость ускорения	Горизонтальная
Ускоренные ионы	H^-
Выведенные ионы	H^+
Вывод (порты для мишеней)	8 независимых
Система стриппера	8 каруселей по 2 на каждый (резервирование)
Режим двойного пучка	Стандартный

энергий, а также для измерения поперечных сечений различных реакций, вызванных частицами. Данные по сечениям протон-индуцированных ядерных реакций очень важны для производства медицинских радиоизотопов с использованием циклотронов. Оценка ядерных данных обычно проводится на основе экспериментальных измерений и теоретических модельных расчетов. Практически и экономически невозможно измерить необходимые сечения для всех изотопов периодической таблицы для широкого диапазона энергий. Модели ядерных реакций часто необходимы для получения оценок сечений реакций, вызванных частицами, особенно если экспериментальные данные отсутствуют или невозможно измерить сечения в силу технических трудностей. Следовательно, теоретические расчеты ядерной реакции с использованием различных моделей играют важную роль в оценке ядерных данных.

Кроме того, новые экспериментальные данные необходимы для разработки более точных ядерно-теоретических моделей расчета для объяснения механизмов ядерных реакций и свойств возбужденных состояний в различных энергетических диапазонах. В литературе существует значительное количество экспериментальных данных относительно протон-индуцированных реакций в области энергий от их порога до 18 МэВ. Однако изучение информации о функциях возбуждения и выходах реакций показало, что:

- опубликованные сечения имеют относительно большие ошибки, функции возбуждения не были измерены достаточно подробно (смотри, например, работу [8]);
- измеренные сечения, представленные различными группами, часто демонстрируют недопустимые отклонения как по значениям сечений, так и по их энергиям;
- экспериментально измеренные и/или теоретически рассчитанные интегральные выходы для толстых мишеней имеют существенные различия.

Более того, для некоторых элементов экспериментальные данные вовсе

отсутствуют, например, для Tl. Отсутствие экспериментальных данных в первую очередь затрудняет разработку теоретических моделей, а также делает невозможным оценку их предсказательной силы. Этот пробел в экспериментальных данных может быть, по крайней мере частично, заполнен с использованием пучка протонов, предоставленного циклотроном C18/18.

Помимо исследовательской программы, предлагается разработать производство изотопов для диагностики и терапии на выведенном пучке циклотрона C18/18. Наряду с пробным получением терапевтического изотопа рения-186 на тормозном пучке линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 планируется разработать технологию производства этого изотопа в форме без носителя NCA (No-Carrier-Added) на протонном пучке циклотрона C18/18 [9].

3.2. Изучение нейтрон-индуцированных ядерных реакций

Протонный пучок от циклотрона C18/18 может быть использован также в качестве источника нейтронов. Обычно быстрые нейтроны с энергией несколько десятков МэВ образуются в результате ядерных реакций ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$. Температура плавления бериллия (1287°C) значительно выше, чем температура плавления лития (180.54°C), что в значительной мере осложняет использование подходящей системы охлаждения. Поэтому в качестве источника нейтронов была выбрана мишень ${}^9\text{Be}$.

Выходы нейтронов и сопровождающих их фотонов были исследованы с помощью кода GEANT4 [10]. На основании этих расчетов была разработана система BSA (Beam Shaping Assembly). Была выбрана конечная конфигурация BSA, состоящая из листа висмута Bi толщиной 5 см для увеличения выхода нейтронов за счет (n, 2n) реакций, в качестве замедлителей использовались железо Fe толщиной 50 см, алюминий Al толщиной 10 см и графит толщиной 5 см, а в качестве отражателя использовался свинец Pb (Рис.5). Эта система уменьшает энергию нейтронов от максимальной энергии 13 МэВ до 1 МэВ. При такой конфигурации BSA при токе протона 100 мкА нейтронный поток оценивается в 1.4×10^7 н/сек·см² [11].

Полученный поток нейтронов может быть использован для измерения сечений нейтрон-индуцированных реакций. Планируется проведение исследований тех реакций, для которых поперечное сечение измерено с относительно высокими ошибками или они отсутствуют в областях энергии, представляющих интерес. Для нейтрон-индуцированных реакций в качестве мишеней рассматриваются ${}^{\text{nat}}\text{Ca}$, ${}^{\text{nat}}\text{Zr}$, ${}^{75}\text{As}$ и ${}^{65}\text{Cu}$. Эти ядра представляют интерес не только с точки зрения фундаментальных исследований, но и для прикладных и биологических задач.

Возможность получения тепловых/эпитепальных нейтронных пучков

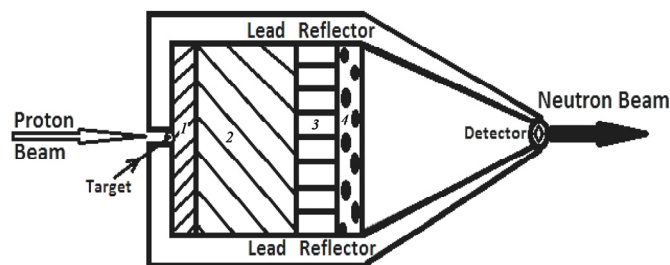


Рис.5. Конструкция BSA: мишень 2.5 мм Be, 5 см Bi (1), замедлитель 50 см Fe (2), 10 см Al (3) и 5 см графит (4), свинцовый отражатель и детектор.

для BNCT с использованием выведенного пучка протонов из циклотрона C18/18 изучается на основе моделирования GEANT4 [10]. Дизайн и оптимальные характеристики BSA для нейтронного потока от толстой мишени ^9Be были изучены с помощью кода GEANT4 [10]. Изучение показано, что в случае, когда BSA состоит из размножителя нейтронов Mo толщиной 20 см, 45 см Fe и 45 см парафиновой борной кислоты, энергетическое распределение нейтронов удовлетворяет вышеуказанным требованиям. В результате моделирования GEANT4 [10] зарегистрированный поток нейтронов составляет около 0.968×10^9 н/сек·см², а большая часть нейтронов находится в диапазоне низких энергий до 200 кэВ. Экспериментально эти результаты должны быть подтверждены в ННЛА на циклотроне C18/18. Протонный пучок циклотрона C18/18 с такой конструкцией BSA обеспечит процесс термализации нейтронов, что позволит использовать нейтронный пучок для BNCT.

4. Будущая модернизация существующих машин и новые ускорители

Производство изотопов с использованием гамма-нейтронных реакций, а также BNCT требует интенсивных пучков эпитепимальных нейтронов. Ускорители электронов можно рассматривать как основной источник нейтронов с определенными характеристиками, такими как высокая интенсивность, небольшие размеры пучка и низкая стоимость. Ускоритель родотрон, разработанный в последние годы в ИВА, Бельгия с энергией электронного пучка 10 МэВ и током 10 мА [12], можно рассматривать как один из таких ускорителей. Родотроны были изначально созданы и предназначены для использования в промышленности для стерилизации медицинского оборудования, облучения пищевых продуктов для пастеризации и многих других применений.

Протонный пучок циклотрона C18/18 с энергией 18 МэВ и различными токами можно рассматривать как еще один источник вторичных нейтронов. На рис.6 представлено сравнение выходов нейтронов из родотрона TT200 для

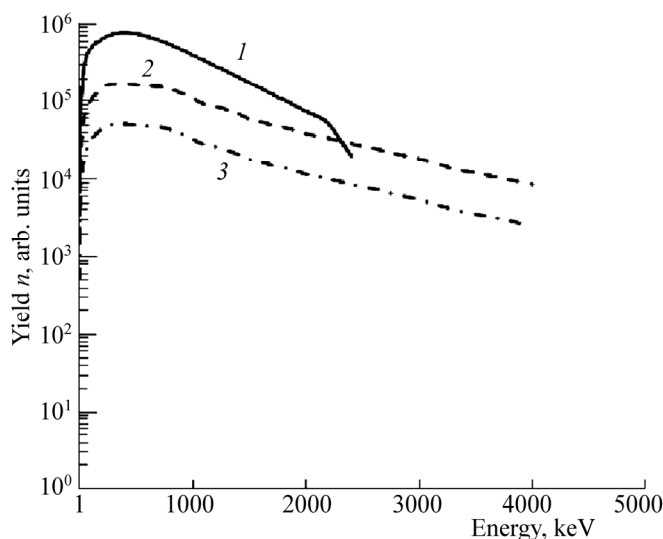


Рис.6. Сравнение нейтронных потоков, генерированных электронами на мишени Та от родотрона ТТ200 (1) и протонами от циклотрона С18 при токе 100 мкА (2) и 30 мкА (3).

номинального тока 10 мА и из циклотрона С18/18 для двух значений токов – рабочего тока 30 мкА и максимального тока 100 мкА. Расчеты проводились при использовании кода ядерных реакций TALYS 1.9 [5] в режиме «по умолчанию».

Из рис.6 следует, что для получения термальных нейтронов предпочтительнее использовать электронные пучки высокой интенсивности. В качестве альтернативы родотрону рассматривается линейный ускоритель электронов с энергией пучка 5–10 МэВ и мощностью пучка 50 кВт. Такие мощные линейные ускорители для промышленного применения (ILU) были разработаны различными компаниями и научными центрами, а также в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера, Новосибирск, Россия [13]. Ускорители ILU работают в различных технологических процессах при радиационной обработке полимерных трубок и пленок, полимерных трубок для горячего водоснабжения, проводов, кабелей, стерилизации одноразовых медицинских изделий и дезактивации лекарственного сырья.

5. Заключение

Обсуждены научные программы на линейном электронном ускорителе ЛУЭ-75 и циклотроне С18/18 в ННЛА, направленные на извлечение большого объема новых экспериментальных данных о взаимодействиях протонов и фотонов с ядрами. Эти данные полезны для лучшего понимания структуры ядра и процессов, происходящих в ядерной среде, а также для тестирования и

совершенствования различных теоретических моделей, описывающих ядерные реакции при низкой энергии. Наряду с этим рассмотрена возможность получения вторичных нейтронных пучков с использованием выведенных протонных пучков циклотрона С18/18, а также новых современных ускорителей электронов, которые планируется приобрести для проведения широкомасштабных экспериментальных и прикладных исследований. Дано сравнение нейтронных потоков, которые могут быть получены с помощью электронного и протонного пучков.

Авторы выражают благодарность сотрудникам группы ускорителя Отделения Экспериментальной Физики ННЛА (ЕрФИ), особенно их руководителю А. Акопяну, обеспечившим электронный пучок для экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **R.H. Avagyan, A.E. Avetisyan, I.A. Kerobyan, et al.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **47**, 510 (2012).
2. **A. Sirunyan, A. Hakobyan, G. Ayvazyan, A. Babayan, H. Vardanyan, G. Zohrabyan, K. Davtyan, H. Torosyan, A. Papyan.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53**, 271 (2018).
3. **A. Artikov et al.** Conference New Trends in High Energy Physics, Budva Montenegro, 24-30 September 2018; <https://indico.jinr.ru/event/410/contributions/3321/>.
4. **A.M. Sirunyan, A.S. Hakobyan, A.Z. Babayan, H.H. Marukyan, et al.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **54**, 225 (2019).
5. **A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely.** TALYS 1.9. A nuclear reaction program, 2017.
6. **F. Salvat.** PENELOPE2014, A Code System for Monte-Carlo Simulation of Electron and Photon Transport, Workshop Barcelona, Spain 29 June-3 July 2015; <http://www.oecd-neo.org/tools/abstract/detail/nea-1525/>.
7. **W. Schmor.** Proceedings of CYCLOTRONS 2010, Lanzhou, China. p. 419, 2010.
8. **E. Persico, M.L. Bonardi, F. Groppi, et al.** Cyclotrons and Their Applications 2007, Eighteenth International Conference, p. 248, 2007.
9. **R.H. Avagyan, R.V. Avetisyan, A.V. Gyurjinyan, V.S. Ivanyan, I.A. Kerobyan.** Armenian Journal of Physics, **11**, 101 (2018).
10. GEANT4: User's Guide for Application Developers, 9 December, 2016. <http://geant4.web.cern.ch/>
11. **R. Avagyan, R. Avetisyan, V. Ivanyan, I. Kerobyan,** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **402**, 247 (2017).
12. **Y. Jongen, M. Abs, F. Genin, A. Nguyen, J.M. Capdevila, D. Defrise,** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **79**, 865 (1993).
13. **V.L. Auslender,** Proceedings of LINAC2002, Gyeongju, Korea, 285 (2002).

ՑԱՄԲ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐԻ ՊՐՈՏՈՆ- ԵՎ ՖՈՏՈՆ-ՄԻՋՈՒԿԱՅԻՆ
ՓՈԽԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԱԱԳԼ-ՈՒՄ

Ի. ՔԵՐՈԲՅԱՆ, Հ. ՄԱՐՈՒԲՅԱՆ

Չնայած պրոտոն-միջուկային և ֆոտոն-միջուկային փոխազդեցությունների վերաբերյալ ցածր էներգիաների տիրույթում գոյություն ունեցող մեծ թվով փորձարարական տվյալների, հարկավոր են նոր փորձարարական չափումներ պատկերացումներ կազմելու միջուկային ֆիզիկայի մի շարք խնդիրների վերաբերյալ: Մասնավորապես, մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում աստղերի նուկլեոսինթեզը, թեթև միջուկների ռեզոնանսային վիճակների ուսումնասիրությունը, (p,n) , (p,α) և (γ,p) , (γ,n) ռեակցիաների հիմքում ընկած մեխանիզմների հարցերը: Այդ նպատակով քննարկվում է հնարավորությունը այս խնդիրների լուծման համար օգտագործել ԱԱԳԼ-ում (Երևանի Ֆիզիկայի Ինստիտուտ) գոյություն ունեցող էլեկտրոնների գծային արագացուցիչը և վերջերս թողարկված ցիկլոտրոն C18/18-ը: Քննարկվում են նաև գոյություն ունեցող էլեկտրոնային արագացուցչի արդիականացման հարցերը, ինչպես նաև նոր ժամանակակից մեքենայի ձեռք բերումը՝ վերը նշված միջուկային խնդիրների լուծման նպատակով:

A STUDY OF LOW-ENERGY PROTON- AND PHOTON-NUCLEAR
INTERACTIONS AT AANL

I. KERBYAN, H. MARUKYAN

In spite of a large amount of the existing experimental data in the region of low-energy proton- and photon-nuclear interactions, new experimental measurements are still needed to gain insight into a number of problems in the nuclear physics. Particularly, the stellar nucleosynthesis, the study of the resonance states of light nuclei, the underlying mechanisms of the (p,n) , (p,α) and (γ,p) , (γ,n) reactions are of great interest. For this purpose, the possibility of exploitation of existing electron linear accelerator and cyclotron C18/18, which was launch out recently at AANL (Yerevan Physics Institute), are discussed. The upgrade of existing electron machine and purchase of a new modern one for study of aforementioned nuclear physics problems are presented as well.