

## **ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ ЛУЭ-75 НАЦИОНАЛЬНОЙ НАУЧНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИМ. А.И. АЛИХАНИЯ**

А.С. АКОПЯН<sup>1\*</sup>, Г.О. МАРУКЯН<sup>1</sup>, И.А. КЕРОПЯН<sup>1</sup>, Г.Р. ГУЛКАНЯН<sup>1</sup>,  
Л.А. ПОГОСЯН<sup>1</sup>, В.С. ПОГОСОВ<sup>1</sup>, Г.Т. ТОРОСЯН<sup>1,3</sup>, А.З. БАБАЯН<sup>1</sup>,  
Л.Р. ВАГРАДЯН<sup>1</sup>, А.Р. БАЛАБЕКЯН<sup>2</sup>, Г.О. ОГАНЕСЯН<sup>2</sup>,  
Р. ДАЛЛАКЯН<sup>1</sup>, К. КАТОВСКИ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

<sup>2</sup>Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup>Брненский технический университет, Брно, Чехия

\*e-mail: ashothako@yerphi.am

(Поступила в редакцию 18 марта 2022 г.)

Кратко описаны работы последних лет, выполненные на линейном ускорителе ЛУЭ-75 Национальной научной лаборатории им. А.И. Алиханяна (ННЛА) по ускорительной физике и проблемам ядерной физики низких энергий. Действующая установка позволяет варьировать ток и энергию пучка в широких пределах ( $10^{-18}$ – $10^{-5}$ ) А и (10–75) МэВ соответственно. Эксперименты проводились совместно с исследовательскими группами как из научных центров Армении, так и других стран. Намечены основные направления исследований с использованием релятивистских электронных пучков линейного ускорителя.

### **1. Введение**

Научный линейный ускоритель ЛУЭ-75 ННЛА [1,2], медицинский протонный циклотрон С18/18 с возможностью проведения физических экспериментов, а также линейный ускоритель AREAL Института синхротронных исследований КЕНДЛ [3], создают экспериментальную базу в Армении для применения ускорительной физики и техники в фундаментальных и прикладных научных и научно-методических исследованиях в ядерной физике низких энергий, радиобиологии, нанотехнологии, для получения новых радиотераностических изотопов и др.

Линейный ускоритель ЛУЭ-75 (линак) был спроектирован и служил в качестве инжектора Ереванского кольцевого ускорителя электронов АРУС, в свое время крупнейшего синхротрона в Советском Союзе с энергией до 6.1 ГэВ. В настоящее время линейный ускоритель успешно работает в автономном режиме. Это ускоритель на бегущей волне S-диапазона. Он содержит четыре ускоряющие секции. В первой секции электроны группируются в сгустки и одновременно ускоряются до энергии 3 МэВ. Остальные три секции идентичны.

Источником электронов служит термокатод, помещенный в электронную пушку с оптикой Пирса.

В связи с возросшим интересом к задачам низкоэнергетической ядерной физики и расширением спектра научных исследований, планируемых экспериментаторами, соответственно решались задачи и по расширению возможностей действующей ускорительной установки. Вкратце перечислим основные из них.

1. Установлен более мощный металлокерамический катод, в результате чего ток пучка увеличен вдвое.
2. Восстановлена и задействована 3-я ускорительная станция, благодаря чему энергия доведена до проектного значения 75 МэВ.
3. Спроектирован и построен в зале синхротрона тракт транспортировки электронного пучка (ТТП), включающий участок параллельного переноса пучка в зону, удаленную от действующего электрорадиооборудования линейного ускорителя, где при отключенном синхротроне практически отсутствуют помехи и наводки на измерительную аппаратуру (рис.1). Тем самым создаются благоприятные условия для прецизионных экспериментов. На начальном этапе магнитная оптика ТТП была рассчитана и сконструирована для энергии электронов порядка 20 МэВ. В дальнейшем на тракте параллельного переноса была проведена модернизация магнитной оптики, после чего стала возможна проводка пучка до 75 МэВ.
4. На базе линейного ускорителя разработана и применена методика получения управляемых первичных пучков с экстремально слабым потоком одиночно летящих электронов с интенсивностью несколько десятков электронов в секунду в диапазоне энергий до 75 МэВ; создан стенд для калибровки детекторов элементарных частиц.

Благодаря этим работам в настоящее время линейный ускорительный комплекс, включающий собственно ЛУЭ-75 и тракт транспортировки с параллельным переносом пучка, позволяет обеспечить экспериментаторов электронными

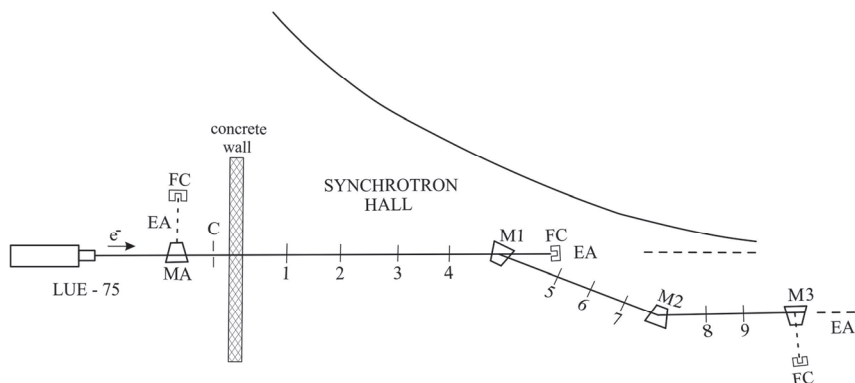


Рис.1. Схема тракта транспортировки пучка с параллельным переносом в синхротронном зале. МА – дипольный анализирующий магнит; FC – цилиндр Фарадея; С – коллиматор; M1 и M2 – поворотные магниты параллельного переноса; M3 – магнит beam dump, используемый для получения фотонных пучков; 1–9 – квадрупольные линзы; EA – экспериментальные зоны.

пучками в диапазоне энергий (10–75) МэВ со средними токами от экстремально малых до 10 мкА, в зависимости от коллимации и выбранной энергии. На рисунке 2 показан характерный энергетический спектр пучка ускоренных электронов с полной шириной на полувысоте около 2%. Ускоритель работает с частотой повторения 50 Гц. Подробные параметры линейного комплекса ЛУЭ-75 приведены в [2].

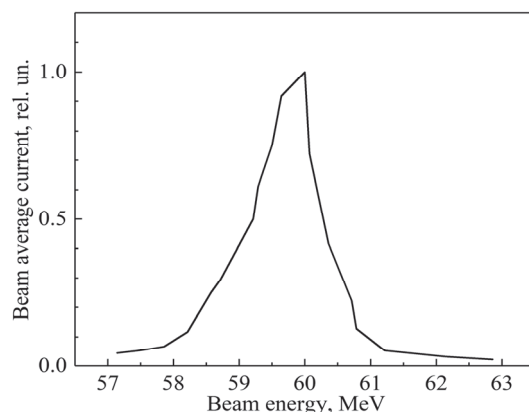


Рис.2. Типовой энергетический спектр линака ЛУЭ-75.

## 2. Создание пучков экстремально низкой интенсивности

На базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 ННЛА разработана и применена методика получения управляемых первичных электронных пучков с интенсивностью несколько десятков электронов в секунду в диапазоне энергий (15–75) МэВ и создан стенд для калибровки детекторов элементарных частиц.

На рис.3 показан профиль 40 МэВ-ного низкоинтенсивного пучка, измеренный без выходного коллиматора в конце тракта транспортировки с использованием пальчикового (finger counters) пластикового счетчика; перемещение счетчика поперек пучка осуществлялось дискретно с шагом 5 мм с помощью

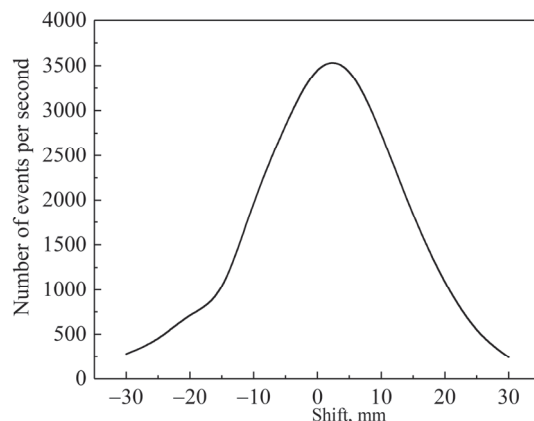


Рис.3. Горизонтальный профиль пучка экстремально низкой интенсивности со средней энергией 40 МэВ на выходе тракта в зоне тестирования кристаллов.

дистанционно управляемого компьютером сканера; максимум соответствует интенсивности 60–70  $e^-/с$ .

Совместно с коллегами из Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, РФ) разработана методика энергетического тестирования детекторов элементарных частиц пучками с экстремально низкой интенсивностью 10–20 электронов в секунду, в частности, для калибровки сцинтилляционных кристаллов для калориметров. Такая интенсивность выбиралась с учетом времени высвечивания кристаллов, что позволяло минимизировать наложение сигналов (pile up) и измерять отклик детектора на одиночные электроны; при этом число одноэлектронных событий составляло не менее 70% от общего числа частиц, падающих на поверхность кристалла (рис.4). Эта методика была использована при тестировании прототипа электромагнитного калориметра для планируемого в Фермилаб (FNAL, USA) эксперимента Mu2e [4,5].

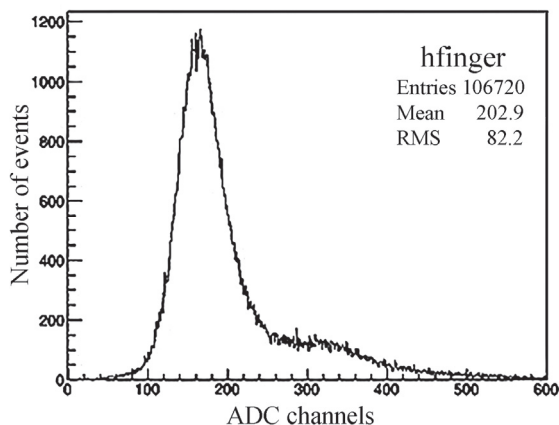


Рис.4. Гистограмма распределения числа событий по каналам АЦП при энергии электронов 30 МэВ; небольшой горб справа соответствует интенсивности двухчастичных событий.

Результаты тестирования кристаллов на линаке ЛУЭ-75 в диапазоне энергий (15–75) МэВ хорошо согласовались с данными тестирования в диапазоне (80–120) МэВ, полученными физиками ОИЯИ во Фраскати (BTF, Italy) [5,6].

Низкоинтенсивные пучки получают и в других научных центрах [7,8]. ЛУЭ-75 отличается указанным выше широким энергетическим диапазоном.

Такие низкоинтенсивные пучки могут быть также использованы для изучения отдельных событий, дифракционных задач, исследования излучения электронов в монокристаллах, изучения биологических эффектов ионизирующей радиации в малых дозах, в нанотехнологиях и др.

### 3. Работы по методам ускорения электронов

На ЛУЭ-75 научными группами ННЛА проводились экспериментальные работы по взаимодействию релятивистских модулированных электронных пучков с низкотемпературной плазмой [9]. Была создана установка, на которой

исследовалось когерентное взаимодействие релятивистского пучка с энергией несколько десятков МэВ с плазмой газового разряда. Проходя через плазму, созданную в кварцевой трубке, последовательность электронных сгустков возбуждала высокоградиентные кильватерные поля. Опыты проводились как с распадающейся плазмой, так и плазмой СВЧ-разряда. Мощная СВЧ-волна от системы высокочастотного питания линейного ускорителя подавалась в открытый резонатор, в котором находилась кварцевая камера с разреженным газом, т.е. плазма создавалась тем же микроволновым полем, что и для формирования и ускорения электронных сгустков в ускорительном тракте. Тем самым создавались условия когерентного взаимодействия релятивистского модулированного электронного пучка с плазмой. С помощью магнитного анализатора, построенного специально для этих опытов, наблюдался сдвиг интегрального энергетического спектра пучка, прошедшего через плазму, в сторону высоких энергий. Исследовались зависимости величины сдвига энергии и амплитуды пучкового тока на выходе от фазы СВЧ-волны, создающей разряд в трубке и от плотности плазмы. Плотность плазмы измерялась радиоинтерферометрическим способом. Было показано, что в сильных электрических полях, генерируемых при когерентном взаимодействии, ток пучка очень чувствителен к фазе СВЧ-поля.

Работа [10] посвящена развитию теории лазерного метода ускорения. Рассматривается взаимодействие электронов в вакууме с циркулярно-поляризованной электромагнитной волной в присутствии продольного магнитного поля. Показано, что при использовании сверхкоротких и сверхинтенсивных лазерных импульсов (1 пс,  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>, СО<sub>2</sub>-лазер) энергия электронов может достигать значения 2.1 ГэВ; согласно расчетам ускоренный пучок обладает малым энергетическим разбросом порядка  $\delta\epsilon/\epsilon \leq 10^{-2}$ .

В работе [11] теоретически обосновывается возможность прецизионного измерения абсолютной энергии электронного пучка путем измерения энергетических потерь лазерного луча из-за поглощения излучения электронами в однородном магнитном поле. Показано, что относительная точность рассматриваемого метода составляет до  $10^{-4}$ , причем параметры электронного пучка не будут заметно меняться в течение измерения энергии. Предлагаемый способ представляет собой практически невозмущающий контроль абсолютной энергии электронного пучка в широком диапазоне энергий от десятков МэВ до сотен ГэВ, а также возможность определения реального энергетического разброса электронного пучка. Автор подчеркивает, что промышленностью выпускаются быстродействующие детекторы с высокой спектральной чувствительностью, необходимые для измерения поглощения излучения.

#### **4. Исследование когерентного рентгеновского тормозного излучения канализованных электронов при наличии акустических полей в кристалле**

Исследовательской группой Института прикладных проблем физики (ИППФ) НАН РА проводились эксперименты на электронном пучке ЛУЭ-75 с энергией 20 МэВ, выведенном в экспериментальную зону тракта транспортировки с параллельным переносом (в отсеке синхротрона). Изучалось явление

когерентного тормозного рентгеновского излучения каналированных релятивистских электронов при наличии внешних акустических полей в монокристалле.

Одним из эффективных методов получения квазимонохроматического гамма-излучения является когерентное тормозное излучение. Акустические колебания, возбуждаемые в кристалле, могут служить дополнительным механизмом управления параметрами радиационных процессов в среде. Измерены энергетические распределения характеристических выходов излучения электронов, прошедших через исследуемые образцы пьезоэлектрического монокристалла кварца. Измерения энергетических распределений характерных выходов излучения электронов, прошедших исследуемые образцы пьезоэлектрического монокристалла кварца, показали, что при воздействии гиперзвуковых колебаний на пьезокристалл происходит увеличение интенсивности и сдвиг энергетических выходов. Исследовалась также зависимость сечения тормозного излучения от параметров акустической волны и от угла падения электронов относительно кристаллографических плоскостей монокристалла кварца [12,13].

Изучалась также возможность управления пространственно-временными параметрами характерного излучения каналированных электронов с помощью электромагнитных полей, теоретически обоснованная в ранних работах сотрудников ИППФ. Для этой цели проводились измерения при разных длинах волн и мощностях внешних возбуждающих полей СВЧ диапазона.

Отметим, что ранее впервые группой армянских исследователей на внутреннем пучке Ереванского синхротрона АРУС [14] было экспериментально зарегистрировано излучение каналированных электронов с энергией 4.7 ГэВ в монокристалле алмаза толщиной 100 мкм.

## 5. Эксперименты по ядерной физике низких энергий

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-75 является одной из экспериментальных баз ННЛА, на котором проводятся эксперименты как в области фундаментальной науки, так и прикладных исследований.

Учеными из Ереванского государственного университета (ЕГУ) и ННЛА были проведены совместные исследования фотоядерных реакций на тормозном излучении ЛУЭ-75.

Был осуществлен ряд экспериментов с целью изучения возможности получения изотопов для медицины с помощью фотонейтронных реакций.

Наиболее широко используемым изотопом в ядерной медицине в настоящее время является  $^{99m}\text{Tc}$  [15,16] с более чем 30 миллионами диагностических медицинских изображений ежегодно по всему миру [17,18]. Медицинские центры или коммерческие дистрибьюторы радиофармацевтических препаратов обычно покупают генераторы  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , из которых  $^{99m}\text{Tc}$  (и в качестве побочного продукта также  $^{99g}\text{Tc}$ ) можно периодически извлекать в ходе простого химического процесса по мере его накопления в результате распада исходного  $^{99}\text{Mo}$ .

Для производства очень важного для медицины изотопа был предложен способ получения технеция на пучке тормозного излучения линейного

ускорителя электронов ЛУЭ-75. Мишень из природного молибдена облучалась тормозным излучением фотонов от электронов с энергией 40 МэВ и током 10 мкА. Наиболее важным результатом является нормированная удельная активность  $A \approx 3000$  Бк/мг мкА·ч, которая позволяет производить  $^{99m}\text{Tc}$  с использованием пучков электронов высокой интенсивности посредством фотоядерных реакций [19].

При тех же параметрах пучка тормозного излучения изучалась возможность получения интересующего с медицинской точки зрения изотопа  $^{123}\text{I}$  [20]. Нормированная удельная активность составляет  $A \approx 143$  Бк/(мг·мкА·ч), что хорошо согласуется с результатами 110 Бк/(мг мкА ч) [21,22].

На ЛУЭ-75 проведены эксперименты по получению медицинских изотопов  $^{111}\text{In}$ ,  $^{117m}\text{Sn}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{177}\text{Lu}$  при граничной энергии тормозного излучения 40 МэВ. Результаты показывают, что выход и чистота радиоизотопов  $^{111}\text{In}$  и  $^{117m}\text{Sn}$  приемлемы для их получения в фотоядерной реакции. Использование мишеней  $\text{Te}$  и  $\text{HfO}_2$  природного изотопного состава привело к малым выходам  $^{124}\text{Sb}$  и  $^{177}\text{Lu}$ , а фотонаработка этих изотопов вряд ли целесообразна даже в случае обогащенных мишеней.

Изучено образование медицинского терагностического изотопа  $^{67}\text{Cu}$  в фотоядерных реакциях на цинковых мишенях природного изотопного состава тормозными фотонами с граничными энергиями 30 и 40 МэВ. Были измерены сечения на эквивалентную порцию продуктов активации  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Zn}$ ,  $^{63}\text{Zn}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  и  $^{69m}\text{Zn}$ . Удельная активность  $^{67}\text{Cu}$  составила 2.04 и 4.78 мкКи/(мкА·ч·г) в конце бомбардировки для максимальных энергий тормозного излучения 30 и 40 МэВ соответственно [23].

Осуществлено получение терагностического изотопа  $^{47}\text{Sc}$  в фотоядерных реакциях при конечной энергии тормозного излучения 30 и 40 МэВ с использованием титановых мишеней природного состава. Измеренные выходы  $^{47}\text{Sc}$  в конце бомбардировки составили  $(0.45 \pm 0.07)$  МБк/(мкА ч г) и  $(1.34 \pm 0.12)$  МБк/(мкА ч г) для 30 и 40 МэВ соответственно.

Наряду с экспериментами в области прикладной физики с помощью пучка тормозного излучения ЛУЭ-75 был проведен ряд экспериментов и в области фундаментальных исследований.

Измерение выходов продуктов реакций, протекающих на мишенях  $^{112,118,124}\text{Sn}$ ,  $^{\text{nat}}\text{Te}$  и  $^{\text{nat}}\text{Hf}$ , а также измерение и анализ изомерных соотношений продуктов реакций  $^{120}\text{Te}(\gamma, n)^{119m,g}\text{Te}$ ,  $^{122}\text{Te}(\gamma, n)^{121m,g}\text{Te}$ ,  $^{118}\text{Sn}(\gamma, p)^{117m,g}\text{In}$  и  $^{124}\text{Sn}(\gamma, n)^{123m,g}\text{Sn}$  были выполнены на ЛУЭ-75 при граничной энергии спектра тормозного излучения  $E_{\gamma}^{\text{max}} = 40$  МэВ [24].

На тормозном пучке ЛУЭ-75 выполнены измерения сечений реакций  $^{\text{nat}}\text{Re}(\gamma, xn)^{182m,182g,184m,184g,186g}\text{Re}$  и  $^{\text{nat}}\text{Nb}(\gamma, xn)^{90g,91m,92m}\text{Nb}$  активационным методом с последующим спектрометрическим анализом с использованием сверхчистого германиевого детектора (HPGe). при двух значениях энергий электронов 30 и 40 МэВ. В качестве конвертора для получения тормозного фотонного пучка был использован тантал толщиной 2 мм. За танталовым конвертором было установлено мишенное устройство, в котором последовательно были расположены пластины из натуральной меди ( $^{65}\text{Cu} - 30.83\%$ ,  $^{63}\text{Cu} - 69.17\%$ ) в качестве монитора фотонного пучка. Исследуемые мишени были изготовлены из

натурального ниобия ( $^{93}\text{Nb}$ —100 %) и натурального рения ( $^{185}\text{Re}$  – 37.4%,  $^{187}\text{Re}$  – 62.6%). Были проведены два сеанса облучения при энергиях 30 и 40 МэВ длительностями соответственно 2 часа и 1 час. В ходе облучения мишеней тормозными фотонами ток пучка был равен 1 мкА.

Экспериментальный поток гамма-квантов в процессе облучения определялся посредством монитора из меди и составлял  $6.5 \times 10^{15}$  фотонов/час и  $3.86 \times 10^{16}$  фотонов/час при энергиях электронов 30 МэВ и 40 МэВ, соответственно. На рис.5 представлен энергетический спектр тормозных фотонов, вычисленный программой GEANT4 [25] с учетом установленного коллиматора и танталового конвертора.

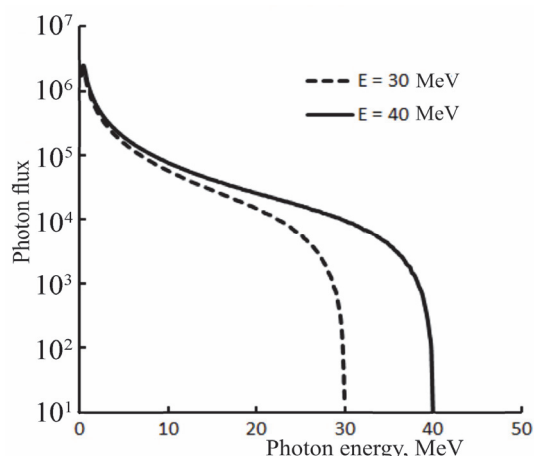


Рис.5. Энергетический спектр тормозных фотонов при энергиях электронов 30 МэВ и 40 МэВ, вычисленный посредством GEANT4.

Полученные средневзвешенные значения сечений реакций  $^{nat}\text{Nb}(\gamma, xn)^{90g, 91m, 92m}\text{Nb}$  при граничных энергиях тормозного излучения 30 МэВ и 40 МэВ были сопоставлены с опубликованными данными других авторов [26,27], а также с теоретическими расчетами по кодам TALYS 1.9 [28] и EMPIRE 3.2 [29].

Результаты измерений средневзвешенных значений сечений для реакций  $^{nat}\text{Re}(\gamma, xn)$  и  $^{nat}\text{Nb}(\gamma, xn)$  опубликованы в [30,31].

Научными группами ННЛА и ЕГУ исследовалось образование  $\alpha$ -частиц в фотоядерных реакциях на мишенях  $^{65}\text{Cu}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{92}\text{Mo}$  и  $^{207}\text{Pb}$  на пучке электронов с энергиями 21 и 40 МэВ. Измерены зависимости выходов исследуемых реакций от массового числа ядер и энергии фотонов. Полученные данные указывают на изменение механизма фотообразования  $\alpha$ -частиц с ростом энергии падающих фотонов и массы мишени.

Группами ННЛА и ЕГУ исследован процесс фотообразования ряда радиоизотопов из ядер меди при граничных энергиях тормозных фотонов  $E_{\gamma}^{\text{max}} = 21, 30$  и 40 МэВ. Измерены выходы  $^{61}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$  по отношению к выходу радиоизотопа  $^{61}\text{Cu}$ . Показано, что предсказания модели TALYS, а также заложенной в программный пакет GEANT4 модели находятся в противоречии (особенно в случае кода GEANT4) с измеренными относительными выходами. Наблюдена монотонно убывающая энергетическая зависимость отношения взвешенных по спектру тормозных фотонов сечений реакций  $^{65}\text{Cu}(\gamma, \alpha)^{61}\text{Co}$  и



$^{63}\text{Cu}(\gamma, 2n)^{61}\text{Cu}$ , подобная измеренной ранее энергетической зависимости отношения сечений электроядерных реакций  $^{65}\text{Cu}(e, e' + \alpha)^{61}\text{Co}$  и  $^{63}\text{Cu}(e, e' + 2n)^{61}\text{Cu}$ . Однако последнее отношение примерно в 2.5 раза выше по сравнению с данными по фотоядерным реакциям. Измерено также отношение выходов  $^{61}\text{Co}$  и  $^{64}\text{Cu}$ , при  $E_{\gamma}^{\max} = 21, 30$  и  $40$  МэВ; полученное при  $E_{\gamma}^{\max} = 21$  МэВ значение  $(2.6 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$  не противоречит общей тенденции зависимости этого отношения от атомного номера  $Z$ , измеренного ранее при  $E_{\gamma}^{\max} = 23$  МэВ для более тяжелых ядер в диапазоне от  $Z = 47$  до  $Z = 82$ . Результаты этих совместных с ЕГУ работ опубликованы в [32,33].

При граничных энергиях тормозных фотонов  $E_{\gamma}^{\max} = 30$  и  $40$  МэВ физиками ННЛА исследован процесс фотовывивания одного, двух, трех и четырех нейтронов из ядра  $^{209}\text{Bi}$  с образованием, соответственно, дочерних радиоизотопов  $^{208}\text{Bi}$ ,  $^{207}\text{Bi}$ ,  $^{206}\text{Bi}$  и  $^{205}\text{Bi}$ . Показано, что измеренные значения относительных выходов  $^{208}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$ ,  $^{206}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$  и  $^{205}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$  находятся в противоречии с предсказаниями модели TALYS, а также модели, заложенной в программный пакет GEANT4. Так, при  $E_{\gamma}^{\max} = 40$  МэВ предсказания GEANT4 для относительных выходов  $^{208}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$  и  $^{205}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$ , а также предсказание TALYS для  $^{205}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$  примерно в два раза меньше экспериментальных. При граничной энергии  $E_{\gamma}^{\max} = 30$  МэВ предсказания обеих моделей для  $^{205}\text{Bi}/^{207}\text{Bi}$  на два порядка меньше экспериментального значения [34].

При граничных энергиях тормозных фотонов  $E_{\gamma}^{\max} = 40$  и  $70$  МэВ методом наведенной активности исследован инклюзивный процесс  $^{16}\text{O}(\gamma, X)^7\text{Be}$  фотообразования изотопа  $^7\text{Be}$  из ядер кислорода. Этот процесс в околороговой области энергий  $E_{\gamma} < 40$  МэВ впервые наблюден в данной работе благодаря низкофоновым условиям в подземной лаборатории ННЛА, где проводились спектроскопические измерения. Измерены усредненное по спектру тормозных фотонов сечение и сечение на один эквивалентный фотон. Проведено сравнение измеренных сечений с имеющимися экспериментальными данными и с предсказаниями моделей TALYS1.9, GEANT4 и FLUKA. Показано, что предсказания TALYS и GEANT4 сильно занижены (особенно при  $E_{\gamma}^{\max} = 40$  МэВ) по сравнению с нашими данными, что связано с сильной недооценкой в модельных расчетах роли двух основных околороговых каналов реакций: канала  $^{16}\text{O}(\gamma, ^9\text{Be})^7\text{Be}$ , протекающего через механизм двухчастичного фотоделения, и канала расщепления  $^{16}\text{O}(\gamma, n + \alpha + \alpha)^7\text{Be}$ . Предсказания же FLUKA качественно сопоставимы с экспериментальными данными при  $E_{\gamma} < 40$  МэВ и  $E_{\gamma} = (50-60)$  МэВ, однако сильно превышают их в области энергий  $E_{\gamma} = (40-50)$  МэВ, причем это превышение практически полностью обусловлено завышенным вкладом сечения реакции расщепления  $^{16}\text{O}(\gamma, n + \alpha + \alpha)^7\text{Be}$  [35].

Группой ученых из Технологического института Брно (Чехия) был выполнен эксперимент по изучению процессов образования нейтронов в фотоядерных реакциях, вызванных тормозными фотонами с максимальной энергией  $70$  МэВ. Экспериментальная установка состояла из расположенных последовательно: вольфрамового конвертора для образования тормозных фотонов первичным электронным пучком с энергией  $70$  МэВ; цилиндрического алюминиевого поглотителя для остановки электронов; алюминиевой фольги для мониторинга интенсивности пучка тормозных фотонов; фотонейтронного

конвертора, представляющего собой цилиндрическую мишень для образования фотонейтронов; и, наконец, двенадцати разных активационных мишеней, предназначенных для измерения потока фотонейтронов методом наведенной активности. В качестве фотонейтронного конвертора в трех разных облучениях установки использовались мишени LiCl, BeO и D<sub>2</sub>O, обладающие низкой пороговой энергией для ( $\gamma, n$ ) реакции и высоким выходом фотонейтронов. При этом обеспечивались фиксированная энергия (с точностью до 1–2%) и практически постоянная интенсивность пучка электронов  $5.61 \times 10^{12}$  е<sup>-</sup>/с (с точностью до нескольких процентов).

Активированные нейтронами мишени впоследствии подвергались гамма-спекроскопическому анализу при помощи полупроводникового германиевого (HPGe) детектора и для каждой из двенадцати мишеней определялись выходы радионуклидов, образованных в нейтрон-ядерных взаимодействиях. Было проведено сравнение измеренных выходов с результатами теоретических расчетов с использованием компьютерного кода MCNP6.2, показавшее согласие экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями.

## 6. Планируемые и возможные работы на ЛУЭ-75

Планируемые:

- Модернизация линейного ускорителя ЛУЭ-75.
- Совершенствование действующего стенда калибровки высокочувствительных детекторов элементарных частиц внедрением кремниевых фотоумножителей и современной аппаратуры VME. Обеспечить возможность работ по тестированию кристаллических детекторов тестовыми пучками экстремально низкой интенсивности для калориметров строящихся в мире коллайдеров.
- Исследование in-situ явлений, вызванных облучением электронами, в высокотемпературных сверхпроводниках, полупроводниках и лазерных кристаллах.
- Для охвата широкого диапазона энергий фотонов тормозного излучения планируется продолжить изучение  $^{nat}\text{Nb}(\gamma, xn)^{90g, 91m, 92m}\text{Nb}$  при энергиях электронов 20 МэВ и 70 МэВ. Измерения в широком диапазоне энергий позволят оценить предсказательную силу теоретических моделей.
- В последнее десятилетие реакция  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$  интенсивно изучается с астрофизической точки зрения. Планируется проведение эксперимента по измерению средневзвешенного значения сечения образования  $^{180}\text{Ta}$  при энергиях электронов 20 МэВ и 70 МэВ. Предполагалось, что сечение  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180m}\text{Ta}$  может объяснить солнечное содержание  $^{180m}\text{Ta}$ .
- Измерение фотовыходов ряда малоизученных многонуклонных реакций расщепления ( $\gamma, xn$ ) и ( $\gamma, \alpha + xn$ ) на ядрах тяжелее железа, а также реакций деления на тяжелых ядрах, таких как висмут и золото, с целью пополнения базы данных фотоядерных реакций и проверки существующих теоретических моделей низкоэнергетических фотоядерных взаимодействий, которые широко используются во многих областях, таких как ядерная астрофизика, производство медицинских радиоизотопов, фотогенерация нейтронных

потоков, радиационная защита, ядерная трансмутация и т.д.

- Изучение фотоэмиссии легчайших радионуклидов (типа  $^7\text{Be}$ ) из легких ядер, в том числе углерода, азота, кислорода, фтора, натрия, магния и алюминия в малоизученной припороговой области энергий тормозных фотонов.
- Поиск тетранейтрона  $^4_0\text{n}$ , вылетающего в реакции  $^{209}\text{Bi}(\gamma, 4\text{n})^{205}\text{Bi}$ .
- Поиск указаний на испускание мультинейтронных связанных состояний  $^x_0\text{n}$  ( $x \geq 4$ ) при фотоделении (электроделении) ядра тория  $(\gamma/e) + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^x_0\text{n} + \text{X}_f$ , где  $\text{X}_f$  обозначает незарегистрированные фрагменты деления тория.
- Измерение фотовыходов ряда малоизученных реакций, представляющих интерес для охраны окружающей среды, таких как:  $^{116}\text{Cd}(\gamma, \text{n})^{115}\text{Cd}$ ,  $^{75}\text{As}(\gamma, \text{n})^{74}\text{As}$ ,  $^{121}\text{Sb}(\gamma, \text{n})^{120}\text{Sb}$ ,  $^{123}\text{Sb}(\gamma, \text{n})^{122}\text{Sb}$ ,  $^{198}\text{Hg}(\gamma, \text{n})^{197\text{m}}\text{Hg}$ . Фотоактивационный анализ ряда сплавов (латунь, бронза, амальгама) и минералов (арсенопирит  $\text{FeAsS}$ , антимонит  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ ) с целью диагностики примеси тяжелых металлов и других токсичных элементов в различных пробах. Задачи эти важны для экологического мониторинга окружающей среды.

Возможные:

- Изучение влияния различных видов излучений, включая электромагнитное от источников СВЧ диапазона ускорителя, на микроорганизмы – на популяции бактерий, вирусов. Задача может представлять интерес для борьбы с вирусными заболеваниями.
- Возможность работы синхротрона АРУС в режиме растяжителя (stretcher mode) с энергией пучка 50–75 МэВ без ускорения в синхротроне, т. е. создание циркулирующих низкоэнергетических электронных пучков с медленным выводом в течение 3–5 мс. Стретчерный режим позволит осуществить актуальную программу исследования кластерных структур нейтроннобогатых изотопов легких ядер (He, Li, Be, C) в основном и возбужденном состояниях в двух- и трехчастичных реакциях фоторасщепления при энергиях фотонов  $E_\gamma = 30\text{--}75$  МэВ [36]. Задача эта представляет интерес для теоретической ядерной физики, ядерной астрофизики, а также для изучения излучения релятивистских электронов в монокристаллах.

## 7. Заключение

Линейный ускоритель электронов ЛУЭ-75 является важной научно-экспериментальной базой ННЛА. Он также может быть использован в образовательных целях. В настоящее время ускоритель находится в рабочем состоянии и обеспечивает ток и энергию электронного пучка в широком диапазоне,  $(10^{-18}\text{--}10^{-5})$  А и  $(10\text{--}75)$  МэВ соответственно. Хотя эксперименты, проведенные в последние годы на ЛУЭ-75, показали его надежную работу, планируется модернизация ускорителя с внедрением современной техники. Результаты, полученные в ходе научных экспериментов, показывают перспективность выбранных направлений экспериментальных исследований по изучению ядерных реакций в области низких энергий и необходимость дальнейших исследований в этой области.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **J. Clendenin, L. Rinolfi, K. Takata, D.J. Warner.** Compendium of Scientific Linacs. 18-th Int. Linac Conf. Geneva, Switzerland, August 26–30, 1996, CERN/PS 96-32 (DI), November, 1996, p.108.
2. **A.S. Hakobyan.** J. Contemp. Phys., **56**, 169 (2021).
3. **M.I. Ivanyan, V.A. Danielyan, B.A. Grigoryan, A.H. Grigoryan, A.V. Tsakanian, V.M. Tsakanov, A.S. Vardanyan, S.V. Zakaryan.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, **829**, 187 (2016).
4. **L. Bartoszek et al.** arXiv:1501.05241, 2015.
5. **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/attachments/2563/3334/Davydov\\_NTIHEP2018.pdf](https://indico.jinr.ru/event/410/contributions/3321/attachments/2563/3334/Davydov_NTIHEP2018.pdf).
6. **Yu.I. Davydov.** The Beam Requirements to Test Detectors (in particular, for CsI Crystals), The Experience in Yerevan, <https://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=363>.
7. **R. Taniguchi, T. Kojima, S. Okuda.** Radiation Physics and Chemistry, **76**, 1779 (2007).
8. **L.D. Yu, J.H. Yue, Y.L. Li, Y.F. Sui.** Low intensity electron beam controlling and monitoring. Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, 292 (2017).
9. **G.G. Oksuzyan, M.I. Ivanyan, A.S. Vardanyan.** Plasma Physics Reports, **27**(6), 507 (2001).
10. **R. Melikian.** Laser and Particle Beams, **32**(2), 205 (2014).
11. **R.A. Melikian.** J. Contemp. Phys., **47**, 206 (2012).
12. **A.R. Mkrtchyan, A.H. Mkrtchyan, L.S. Grigoryan, et al.** J. Contemp. Phys., **48**, 154 (2013).
13. **A.R. Mkrtchyan, E.A. Mkrtchyan.** J. Contemp. Phys., **48**, 158 (2013).
14. **A.O. Aganyants, Yu.A. Vartanov, G.A. Vartapetian, M.A. Kumakhov, Kh. Trikalinos, V.Ya. Yaralov.** Pisma Zh.Eksp.Teor.Fiz., **29** 554 (1979).
15. **S.J. Adelstein, F.J. Manning.** Isotopes for Medicine and the Life Sciences. USA, Washington: National Academy Press, 1995.
16. **H.N. Wagner, Z. Szabo, J.W. Buchanan.** Principles of Nuclear Medicine. 2<sup>nd</sup> ed, USA, Philadelphia: W. B. Saunders, 1995.
17. International Atomic Energy Agency (IAEA). Production and supply of Molybdenum-99, IAEAGC(54)/INF/3 Suppl. <https://projectx-docdb.fnal.gov:440/cgi-bin/RetrieveFile?>
18. Nuclear Technology Review. Annex: production & supply of 99Mo, 2010, no. August; 2010. p. 36.
19. **R. Avagyan et al.** Nuclear Medicine and Biology, **41**, 705 (2014).
20. **A. Avetisyan et al.** Nuclear Medicine and Biology, **47**, 44 (2017).
21. **I. Zvara.** Communication of the JINR, Russia: Dubna, 18–82-20, 1982.
22. **B. Nordell, U. Wagenbach, E.L. Sattler.** Int. J. Appl. Radiat. Isot., **33**, 183 (1982).
23. **G.H. Hovhannisyan, T.M. Bakhshian, R.K. Dallakyan.** NIM B, **498**, 48 (2021).
24. **G.H. Hovhannisyan, T.M. Bakhshian, A.R. Balabekyan, I.A. Kerobyan.** Applied Radiation and Isotopes, **182**, 110138 (2022).
25. GEANT4. A Simulation Toolkit, March 5th, 2019; <https://geant4.web.cern.ch/>.
26. **H. Naik, G.N. Kim, R. Schwengner, K. Kim, M. Zaman, M. Tatari, M. Sahid, S.C. Yang, R. John, R. Massarczyk, A. Junghans, S.G. Shin, Y. Key, A.Wagner, M.W. Lee, A. Goswami, and M.-H. Cho.** Nucl. Phys A, **916**, 168 (2013).
27. **A.K.Md.L. Rahman, K. Kato, H. Arima, N. Shigyo, K. Ishibashi, S. Hori,**

- K. Nakajima.** J. Nucl. Sci. Technol., **47**, 618 (2010).
28. **A. Koning, S. Hilaire, S. Goriely.** TALYS 1.9 nuclear reaction program, 2017.
  29. **M. Herman, R. Capote, M. Sin, A. Trkov, et al.** EMPIRE-3.2 Rivoli modular system for nuclear reaction calculations and nuclear data evaluation, 2013.
  30. **A.E. Avetisyan et al.** Physics of Atomic Nuclei, **84**, 245 (2021).
  31. **R.V. Avetisyan et al.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B, **507**, 7 (2021).
  32. **A.R. Balabekyan, N.A. Demekhina, E. Melyan, S. Faltajanyan, A. Aleksanyan, S. Amirkhanyan, H. Gulkanyan, T. Kotanjyan, A.S. Hakobyan,** J. Contemp. Phys., **55**, 1 (2020).
  33. **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).
  34. **A.S. Hakobyan, A.Y. Aleksanyan, S.M. Amirkhanyan, H.R. Gulkanyan, T.V. Kotanjyan, V.S. Pogosov, L.A. Poghosyan,** J. Contemp. Phys., **55**, 111 (2020).
  35. **M.A. Aginian, S.G. Arutunian, G.S. Harutyunyan, E.E. Gukasyan, E.G. Lazareva, A.V. Margaryan, L.A. Poghosyan, M. Chung, D. Kwak, R. Reetz,** J. Contemp. Phys., **57**, 20 (2022).
  36. **A.M. Sirunyan.** <http://book.lib-i.ru/25fizika/393013-1-o-sozdanii-erfi-eksperimentalnoy-bazi-dlyaissledovaniy-yadernoy-fizike-nizkih-energiy-osnove-lue-75-eku.php>.

#### INVESTIGATIONS AT THE LUE-75 LINEAR ACCELERATOR FACILITY OF A. I. ALIKHANYAN NATIONAL SCIENCE LABORATORY

A.S. HAKOBYAN, H.H. MARUKYAN, I.A. KEROBYAN, H.R. GULKANYAN,  
L.A. POGHOSYAN, V.S. POGOSOV, H.T. TOROSYAN, A.Z. BABAYAN,  
L.R. VAHRADYAN, A.R. BALABEKYAN, G.H. HOVHANNISYAN,  
R.K. DALLAKYAN, K. KATOVSKY

The results of recent years work, performed at the scientific electron linear accelerator LUE-75 of the A.I. Alikhanyan National Science Laboratory (AANL) on accelerator physics and low-energy nuclear physics, are briefly described. The operating installation allows varying the beam current and energy over a wide range ( $10^{-18}$ – $10^{-5}$ ) A and (10–75) MeV, respectively. The experiments were carried out jointly with research groups both from scientific centers in Armenia and other countries. The main directions of research with the use of electron beams of LUE-75 are outlined.