

УДК 621.384

ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ЛУЭ-75 ЕРЕВАНСКОГО ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

А. СИРУНЯН¹, А. АКОПЯН^{1*}, Г. АЙВАЗЯН¹, А. БАБАЯН¹, Г. ВАРДАНЯН¹,
Г. ЗОГРАБЯН¹, К. ДАВТЯН¹, Г. ТОРОСЯН², А. ПАПЯН¹

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

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*e-mail: ashothako@gmail.com

(Поступила в редакцию 15 августа 2018 г.)

В связи с возросшим интересом к задачам низкоэнергетической ядерной физики стало актуальным расширение экспериментальной базы Ереванского физического института (ЕрФИ). На основе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 – инжектора синхротрона АРУС (Армянский Ускоритель) создан комплекс для проведения экспериментов по прикладным и фундаментальным работам с пучками, интенсивность и энергию которых можно варьировать в широких пределах 10^{-18} – 10^{-5} А и 10–50 МэВ, соответственно. Представлены отработанные в последние годы режимы получения на ЛУЭ-75 управляемых пучков электронов экстремально низкой интенсивности, используемых в работах по калибровке детекторов.

1. СТАТУС ЛУЭ-75

ЛУЭ-75 – это ускоритель на бегущей волне S-диапазона; содержит четыре ускоряющие секции, первая из которых выполняет также функцию волноводного группирователя, а остальные три, имеющие постоянную фазовую скорость, равную скорости света, идентичны. Первый клистронный пост работает по схеме самовозбуждения, предложенной сотрудниками ЕрФИ еще в 70-х годах [1], снабжая остальные клистроны входной мощностью (рис.1); имеется возможность работы и в режиме внешнего возбуждения мощных пролетных клистронов.

Линейный ускорительный комплекс включает линейный ускоритель ЛУЭ-75 и канал транспортировки пучка (рис.1). Ускоритель рассчитан на получение пучковых токов до 200 мА в импульсе (на энергиях 10–50 МэВ), что соответствует среднему значению 10 мкА при длительности импульса пучка до 1 мкс. В табл.1 приведены основные параметры ЛУЭ-75.

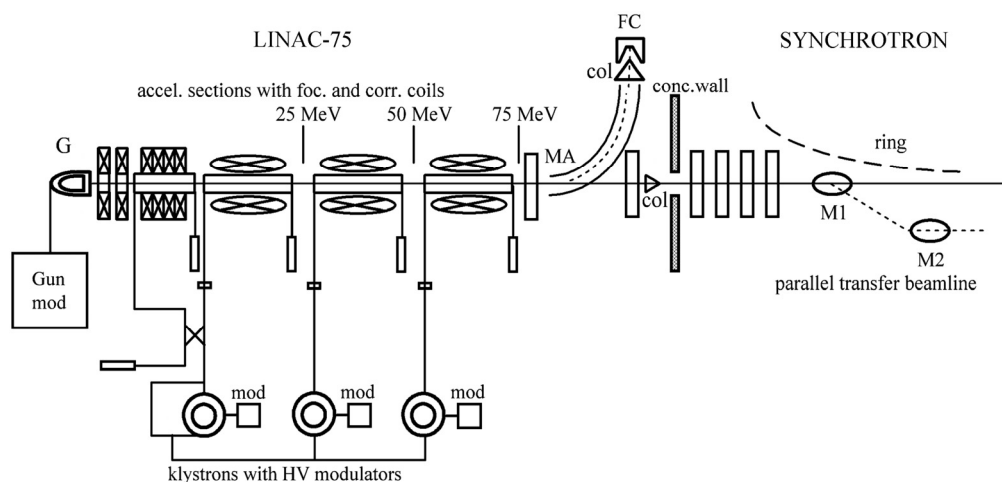


Рис.1. Упрощенная структурная схема линейного комплекса ЛУЭ-75: G – электронная пушка с термокатодом, МА – анализирующий магнит 90°, FC – цилиндр Фарадея, M1 и M2 – поворотные магниты параллельного переноса и col – коллиматор на выходе ЛУЭ-75.

ЛУЭ-75 служил, в основном, в качестве инжектора синхротрона. В последние годы из-за экономических трудностей работа последнего была приостановлена, и линейный ускоритель продолжает работать в автономном режиме, и на нем успешно проводятся физические эксперименты. Благодаря созданному

Табл.1. Основные параметры линейного ускорителя ЛУЭ-75

Число ускоряющих секций	4
Частота поля	2.7973 ГГц
Количество RF блоков	3 клистрона
Мощность RF	20 MW
Частота повторения	50 Гц
Энергия пучка В перспективе может быть увеличена до	10–50 МэВ 75 МэВ
Средняя интенсивность пучка без коллимации	10 мкА
Продолжительность банча	≤ 35 пс
$\Delta E/E$ (FWHM)	$\leq 2\%$ с коллимацией при средних токах пучка $I = 0.2\text{--}2$ мкА
Вакуум	10^{-6} Торр

отдельному каналу транспортировки пучка в синхротронном зале, вдали от помещения ЛУЭ-75 за его радиационно-защитной стеной, удалось добиться значительного уменьшения как радиационного фона, так и различных наводок и помех, что существенно при проведении прецизионных экспериментов с низкоинтенсивными пучками. Подробное описание и структура канала транспортировки приведены в работе [2].

На рис.2 приведен характерный энергетический спектр ускоренных электронов с полной шириной на полувысоте (FWHM) менее 2%. После предварительной коллимации пучок на выходе из ЛУЭ-75 был проведен через магнитно-оптическую систему тракта переноса в район мишени и после настройки элементов оптики на стеклянной пластинке оставил след размерами, не превышающими 4 мм.

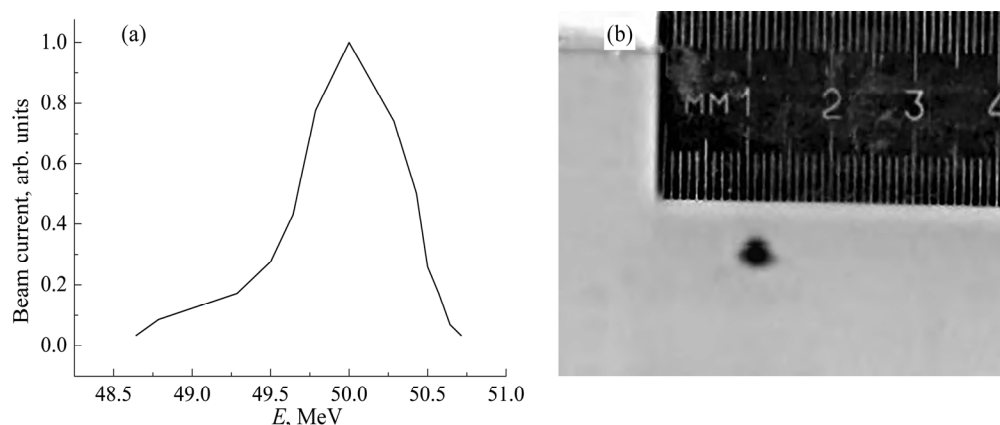


Рис.2. (а) Энергетический спектр пучка электронов и (в) отпечаток этого же пучка на стекле.

В связи с расширением работ с использованием пучка линейного ускорителя [3] были отработаны режимы ускорительного комплекса для различных энергий в диапазоне 15–50 МэВ с интенсивностью пучка от нескольких электронов в секунду (см. ниже) до 9.5–10 мкА (без коллимации) среднего тока с выводом пучка в обособленный отсек синхротронного зала, где созданы необходимые условия для размещения и работы экспериментальных установок и измерительной аппаратуры. Оборудована отдельная комната для удаленного от места эксперимента дистанционного компьютерного управления мишенью и мониторинга параметров пучка, в частности, визуального наблюдения за изображением пучка на люминофорных экранах в различных участках пучкопровода с помощью установленных видеокамер (на рис.3 показана одна из камер видеонаблюдения за изображением пучка непосредственно у мишени). Для обеспечения оперативной

связи в условиях, когда многие помещения ускорительного комплекса находятся вне радиовидимости и мобильная связь недоступна, установлены роутеры для сети Wi-Fi, а также используются программы Skype, Zoiper-телефония, что экономит время и повышает оперативность и надежность работы. Подчеркнем, что конструкция комплекса позволяет выводить пучок для использования как до тракта параллельного переноса («прямой пучок»), когда необходима большая интенсивность, так и в конце тракта после транспортировки параллельным переносом в конечную зону измерений.

На рис.3 приведена блок-схема измерительной аппаратуры, применяемой на комплексе ЛУЭ-75. Координатный стол позволяет с высокой точностью сканировать детектор в поперечной плоскости посредством компьютера из комнаты экспериментаторов. Компьютерный контроль и управление ходом эксперимента осуществляется в указанных на рис.3 пультовых комнатах с помощью одной из программ удаленного доступа к компьютеру – VNC или TeamViewer.

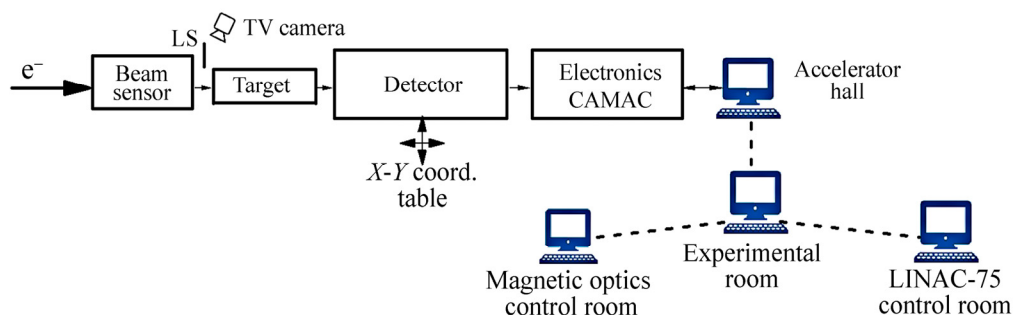


Рис.3. Типовая блок-схема измерительной аппаратуры, используемой на линейном ускорительном комплексе ЛУЭ-75; LS – дистанционно-передвигаемый люминофорный экран, используемый при настройке магнитной оптики.

В последние годы на ЛУЭ-75 были успешно проведены многочисленные работы, в частности, по исследованию возможностей получения радиоизотопов для медицинских целей посредством электронного ускорителя [4], изучению взаимодействия пучка электронов с монокристаллами [5], калибровке детекторов [6] и др. В настоящее время ведутся работы по повышению энергии электронного пучка до 75 МэВ. Для выполнения вышеуказанных исследований в кольцевом зале синхротрона был сооружен тракт транспортировки электронного пучка с энергиями 10–50 МэВ на базе существующего 75 МэВ лину-инжектора. Параллельный перенос пучка с инжекторного канала обеспечил независимое функционирование, необходимое для формирования требуемых параметров электронного пучка на мишени.

2. ТРАКТ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Тракт транспортировки пучка создан в кольцевом здании синхротрона, который отделен от здания ЛУЭ-75 бетонной стеной толщиной 1.3 м. На рис.4 представлена функциональная схема тракта транспортировки пучка. Трехмиллиметровый коллиматор (COLL1) установлен до радиационно-защитной стены с целью исключения проникновения фотонного фона в синхротронный зал.

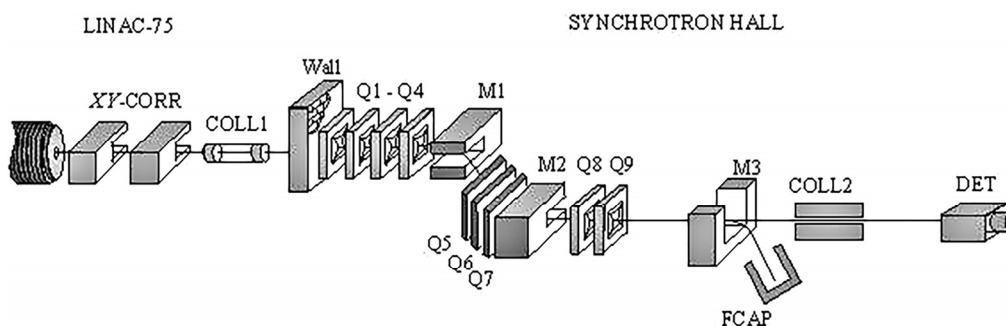


Рис.4. Функциональная схема Тракт транспортировки пучка.

Поворотными магнитами M1, M2, а также квадрупольными линзами Q5–Q7 обеспечивается параллельный перенос пучка, что также способствует уменьшению фона на мишени. Электронный пучок после взаимодействия с мишенью можно с помощью магнита M3 отклонить вниз на угол 55° , где расположен цилиндр Фарадея FCAP. Установка магнитных элементов тракта была выполнена на основе расчета оптики с помощью программы TRACE-3D [7]. Как показали расчеты, апертура пучка в процессе транспортировки меньше внутреннего диаметра вакуумной камеры, равного 48 мм. Наличием необходимого количества корректоров и магнитов была достигнута оптимальная юстировка пучка, обеспечивающая минимальные потери электронов на стенках вакуумной камеры.

3. ПОЛУЧЕНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ СТЕНДА КАЛИБРОВКИ ДЕТЕКТОРОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Пучки ультранизкой интенсивности необходимы для изучения отдельных событий, дифракционных задач, исследования излучения электронов в монокристаллах, изучения биологических эффектов ионизирующей радиации в малых дозах и др. Такие пучки также необходимы в качестве тестовых для исследования и калибровки детекторов, используемых для регистрации элементарных частиц. В 2014 г. на линейном ускорительном комплексе ЛУЭ-75 были начаты работы по получению электронных пучков экстремально низкой интенсивности

(10–20 $e^-/с$) в диапазоне энергий нескольких десятков МэВ в связи с исследованиями, проводимыми совместно с ОИЯИ (Дубна, РФ) по тестированию кристаллов для эксперимента Mu2e (FNAL, USA) [8]. Решения такой задачи могут оказаться различными в зависимости от типа ускорителя, его конструкции и возможностей. Существует два способа получения таких электронных пучков: конверторный метод и непосредственное получение пучка сверхнизкой интенсивности. Итальянский Beam Test Facility (BTF) во Фраскати предоставляет такие пучки электронов с энергией 80 МэВ и выше, полученные конверторным способом [9]. Получение электронных пучков экстремально низкой интенсивности в диапазоне энергий ниже 80 МэВ стало актуальным. Получение таких слабых интенсивностей усложняется, в основном, наличием темновых токов ускорителя, электромагнитных помех и радиоактивного фона. Работы начинались с измерений темновых токов с использованием электрометрической аппаратуры и магнитного анализатора с цилиндром Фарадея на выходе. Была проведена тщательная работа по выбору режимов ускорителя и всего тракта в целом для исключения появления темновых токов, а также отработана методика для получения 10–20 одноэлектронных событий в секунду. Проведенное исследование фоновых условий в зале вывода показало значительное ослабление радиационного фона, а также помех, создаваемых электро-радиотехническим оборудованием ЛУЭ, что важно при проведении прецизионных экспериментов.

Энергия и ток ускоренного пучка электронов в той или иной степени зависят от многих настраиваемых параметров ускорителя. Энергия пучка в основном зависит от уровня подаваемой на вход мощности ускоряющего поля. Имеется также существенная зависимость от величины импульсного тока пучка, выражаемая нагрузочной характеристикой. На рис.5 приведена расчётная зависимость энергии частиц на выходе основной ускоряющей секции ЛУЭ-75 от входной СВЧ-мощности и пучкового тока. Из нагрузочной характеристики следует, что если вводимая в секцию СВЧ-мощность соответствует некоторой максимальной выходной энергии E_{max} (при $I = 0$), то при предварительной настройке установки на малый ток и дальнейшем уменьшении интенсивности до экстремально низких значений изменение первоначальной энергии частиц будет незначительным. Так при настройке на средний ток в несколько десятков наноампер и дальнейшем уменьшении интенсивности изменение средней энергии электронов, как показывает расчет, не превышает 0.1 МэВ, что находится в допустимых пределах погрешности измерений.

Благодаря низкому уровню темновых токов, наличию тракта параллельного переноса пучка и правильному выбору режимов работы систем ускорителя, а также с учетом токовой нагрузки были созданы благоприятные условия получения электронных пучков экстремально низкой интенсивности. На выходе

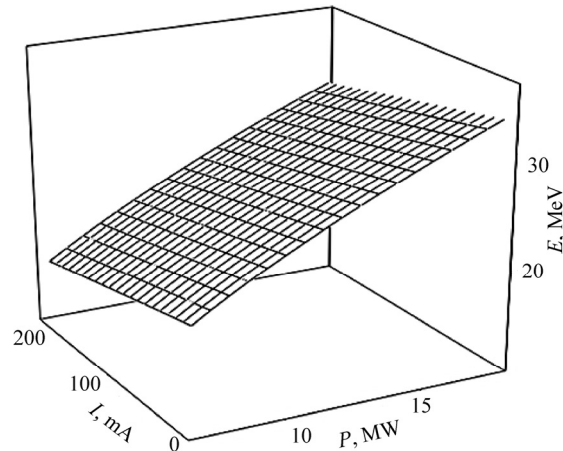


Рис.5. Расчётная зависимость энергии частиц на выходе основной ускоряющей секции ЛУЭ-75 от входной СВЧ-мощности и пучкового тока.

тракта формируется пучок с интенсивностью 2–3 нА и диаметром пучкового пятна 3–4 мм. Это то минимальное значение тока, при котором достигается визуальная регистрация профиля пучка. На выходе из магнита М1, а также на выходе тракта установлены цилиндры Фарадея, обеспечивающие оптимальную настройку магнитной оптики тракта. Вся информация о положении и параметрах пучка передавалась на пульт управления. При получении и регулировке пучка мы применяли комбинацию различных способов уменьшения интенсивности: понижение температуры термокатода – при этом пушка оставалась в режиме объёмного заряда, коллимацию электронного пучка, регулировку элементов, расположенных на неактивных участках ускорителя, где отсутствует ускоряющее поле.

В 2015 г. совместно с ОИЯИ были выполнены экспериментальные измерения на пучке линейного ускорителя ЛУЭ-75 ЕрФИ по тестированию матрицы из 9 кристаллов CsI [6]. Результаты измерений были доложены на совещании коллаборации Mu2e в Батавии (США). Была отработана методика с использованием пучка экстремально низкой интенсивности (10–20 е⁻/сек). При этом были достигнуты требуемые режимы малоинтенсивного пучка электронов в диапазоне энергий от 10 до 50 МэВ и успешно проведены три сеанса. Схема эксперимента представлена на рис.6. При прохождении электрона через входные детекторы (f1 и f2) на выходе схемы совпадения вырабатывается сигнал, необходимый для образования временных «ворот» (gate) АЦП, в течение которого происходит отбор электронов.

Осциллограммы в режиме работающего ускорителя представлены на

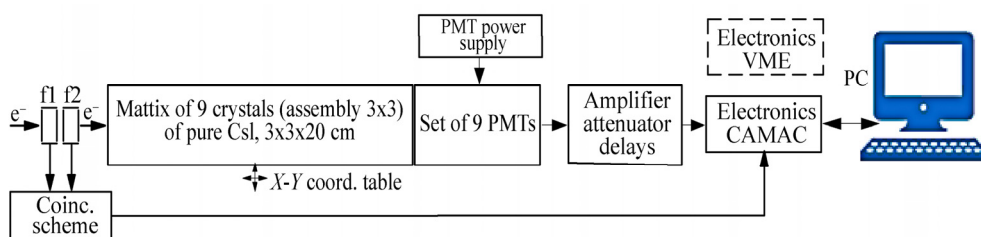


Рис.6. Схема эксперимента по калибровке кристаллов CsI для исследования прототипа электромагнитного калориметра на пучке линейного ускорителя ЛУЭ-75.

рис.7: верхняя – сигнал совпадения входных детекторов, нижняя – событие с несколькими электронами в импульсе пучка с длительностью 1 мкс.

На рис.8 представлена гистограмма распределения числа событий по каналам АЦП, где главный пик приходится на канал, соответствующий энергии частиц с одноэлектронными событиями, и небольшой горб справа показывает интенсивность двухчастичных событий.

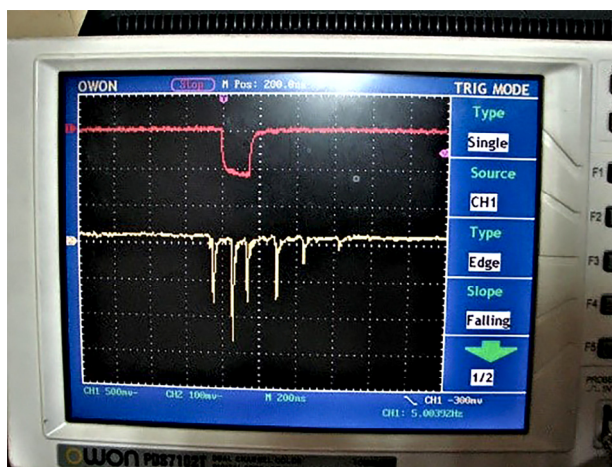


Рис.7. Осциллограммы событий работающего ЛУЭ-75.

Проведенные сеансы показали, что по отработанной методике линейный ускорительный комплекс позволяет получать число одноэлектронных событий свыше 70% от общего числа событий; при повышении энергии до 40 МэВ число одноэлектронных событий превышало 80%. В 2018 г. продолжались совместные с ОИЯИ работы, при этом аппаратура CAMAC была заменена модулями электроники VME (CAEN, Italy), обладающими большим быстродействием. Таким образом, тестовые сеансы на пучке электронов ЛУЭ-75 для исследования

матрицы из 9 кристаллов CsI (сборка 3×3), проведенные в 2015–2018 годах совместно с ОИЯИ показали, что линейный ускорительный комплекс ЕрФИ может служить источником электронных пучков для калибровки детекторов элементарных частиц.

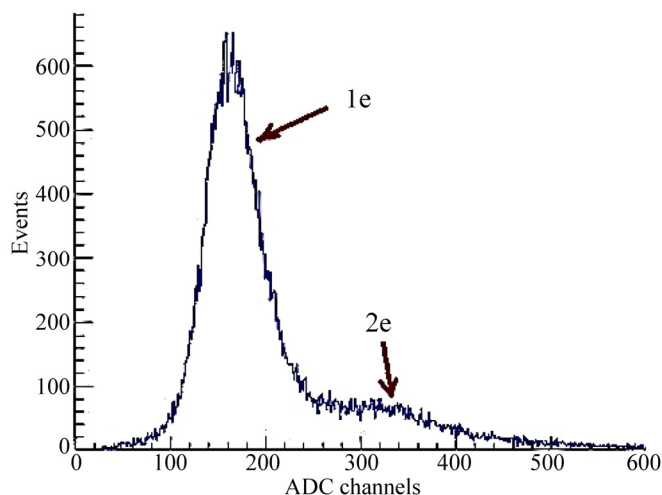


Рис.8. Гистограмма распределения числа событий по каналам АЦП при энергии электронов 35 МэВ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что на основе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-75 ЕрФИ создан комплекс для проведения экспериментов по прикладным и фундаментальным исследованиям в интервале энергий электронов 10–50 МэВ с интенсивностью в пределах 10^{-18} – 10^{-5} А (среднее значение тока). Представлена отработанная методика получения пучка электронов экстремально низкой интенсивности (10–20 $e^-/с$) с числом одноэлектронных событий свыше 70% от их общего числа, что используется при калибровке детекторов.

Авторы выражают благодарность Г. Арутюнову, С. Авакяну, А. Маркарян и В. Мартirosяну за помощь при получении пучков электронов на ускорительном комплексе ЛУЭ-75.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Г. Оксюзян, Э.М. Лазнев, В.Л. Серов, В.И. Белоглазов, И.А. Гришаев, Т.Ф. Никитина, Л.Н. Сдобнова. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика высоких энергий и атомного ядра, **4**(6), 67 (1973). (ХФТИ АН УССР).
2. Р.О. Авакян, А.Э. Аветисян, А.З. Бабаян, К.А. Испирян, В.Ц. Никогосян,

- С.П. Тароян.** Изв. НАН Армении, Физика, **45**, 69 (2010).
3. **А.М. Сирунян.** Развитие экспериментальных методов и исследования по ядерной физике на инжекторе ЕрФИ и элементарных частиц в международных центрах (CERN-LHC, DESY-H1, JINR), <http://www.ru.convdocs.org/docs/index-235948.html>
 4. **Р.О. Авакян, А.Е. Аветисян, И.А. Керопян, С.П. Тароян, А.С. Данагулян, Р.М. Мирзоян, К.С. Бунятов, Р.Ц. Саркисян, С.А. Галумян, В.С. Еганов, А.А. Оганесян, Г.С. Вартанян, В.Б. Гавалян, В.Ц. Никогосян, В.С. Айрапетян, А.З. Бабаян, А.А. Матосян, С.В. Жамкочян.** Изв. НАН Армении, Физика, **47**, 9 (2012).
 5. **А.Р. Мкртчян, А.Г. Мкртчян, Л.Ш. Григорян, А.А. Саарян, А.А. Асланян, Э.М. Арутюнян, С.П. Тароян, В.Ц. Никогосян, В.Р. Кочарян, Г.А. Айвазян, В.В. Налбандян, Т.Г. Довлатян, А.Е. Мовсисян, Э.А. Мкртчян, О.Р. Мурадян, С.А. Миракян.** Изв. НАН Армении, Физика, **48**, 236 (2013).
 6. **Ю.И. Давыдов.** Требования к пучку для тестирования детекторов (для кристаллов CsI в частности), опыт работы в Ереване, <https://indico.jinr.ru/conferenceDisplay.py?confId=363>
 7. **K.R. Grandall, D.R. Rusthoi.** TRACE3D Documentation, LA-UR-97-886, 1997.
 8. **Mu2e** – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Mu2e
 9. **О. Atanova, M. Cordelli, G. Corradi, F. Colao, Yu.I. Davydov, et. al.,** J. Instrumentation, **12**, 05007 (2017).

LUE-75 LINEAR ACCELERATOR FACILITY AT YEREVAN PHYSICS INSTITUTE

A. SIRUNYAN, A. HAKOBYAN, G. AYVAZYAN, A. BABAYAN, H. VARDANYAN,
G. ZOHRABYAN, K. DAVTYAN, H. TOROSYAN, A. PAPYAN

The growing interest in the low-energy nuclear physics made it relevant to enhance the potential of the experimental facilities of Yerevan Physics Institute. A complex unit based on the linear electron accelerator LUE-75 (ARUS synchrotron injector) has been created for applied and fundamental experiments with electron beams, the intensity and energy of which can vary in a wide range of 10^{-18} – 10^{-5} A and 10–50 MeV, accordingly. Developed in recent years regimes were applied for obtaining at LUE-75 controllable electron beams of extremely low intensity used for calibration of detectors.