

30 ЛЕТ НУКЛОТРОНУ

*А. И. Малахов**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Коротко представлена история создания и развития нуклотрона и основные физические результаты, полученные на его пучках за 30 лет работы.

The history of the construction and development of the Nuclotron and the main physical results obtained on its beams over 30 years of operation are briefly presented.

PACS: 29.20.–c; 29.20.D–; 25.75.Dw

ВВЕДЕНИЕ

В начале 1970-х гг. на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий (ЛВЭ) ОИЯИ были ускорены первые легкие ядра — дейтроны [1]. К этому времени директор ЛВЭ А. М. Балдин высказал ряд идей, связанных с изучением релятивистских ядерных взаимодействий, в частности предсказал существование ядерного кумулятивного эффекта [2]. Первые исследования релятивистских ядерных взаимодействий начались на синхрофазотроне под руководством В. С. Ставинского, и в 1971 г. был экспериментально открыт кумулятивный эффект [3]. С этого времени в ОИЯИ начало развиваться новое научное направление — релятивистская ядерная физика.

Эти исследования потребовали наличия более качественных пучков релятивистских ядер с более широким диапазоном ядер и более высокой энергией, чем на синхрофазотроне. Кроме того, синхрофазотрон к тому времени проработал достаточно большое время и его многие системы устарели.

В связи с этим А. М. Балдиным было сделано предложение о создании нового специализированного ускорителя релятивистских ядер — нуклотрона [4].

Нуклотрон было предложено создать на основе сверхпроводимости, в области которой в ЛВЭ были большие достижения.

1. СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ НУКЛОТРОНА

Большую помощь при создании нуклотрона оказала реализация проекта сверхпроводящего синхротрона СПИН, который послужил прототипом нуклотрона (рис. 1).

* E-mail: malakhov@jinr.ru



Рис. 1. Общий вид синхротрона СПИН (1986 г.)

В связи с реализацией этого проекта сотрудники ЛВЭ В. С. Алфеев, З. В. Борисовская, Б. К. Курятников, В. И. Лобанов, Л. Г. Макаров, Е. А. Матюшевский и И. А. Шелаев получили Государственную премию Российской Федерации в области науки и техники за разработку и создание экономичных сверхпроводящих магнитов для ускорителей высоких энергий [5].

В 1986 г. в ОИЯИ был утвержден проект «Реконструкция магнитной системы синхрофазотрона в сверхпроводящую — нуклотрон». С 1987 г. началась реализация этого проекта, которая успешно завершилась в 1992 г. созданием нуклотрона (рис. 2).

Руководство работами по созданию нуклотрона осуществлял главный инженер ЛВЭ Л. Г. Макаров (рис. 3). После ухода из жизни в 1992 г. Л. Г. Макарова эти работы продолжил А. Д. Коваленко.

Успешной реализации проекта способствовали героический труд сотрудников ЛВЭ, поддержка дирекции ЛВЭ во главе с директором лаборатории А. М. Балдиным и дирекции ОИЯИ во главе с директором В. Г. Кадышевским и вице-директором А. Н. Сисакьяном. Также важна была поддержка партийной организации ОИЯИ во главе с В. К. Лукьяновым и средствами массовой информации (газетой ОИЯИ «Дубна: наука, содружество, прогресс» — редактор Е. М. Молчанов, пресс-центром ОИЯИ — пресс-секретарь Б. М. Старченко и фотожурналист Ю. А. Туманов).

Первый сеанс охлаждения кольца нуклотрона до температуры 4,5 К состоялся в марте 1993 г. 26 марта была получена первая циркуляция пучка в кольце нуклотрона. В июле 1993 г. были проведены первые эксперименты на внутреннем пучке дейтронов с энергией 200 МэВ/нуклон. Эксперименты были подготовлены коллаборациями СФЕРА (рук. А. И. Малахов) и СЯО (рук. В. А. Никитин). С помощью

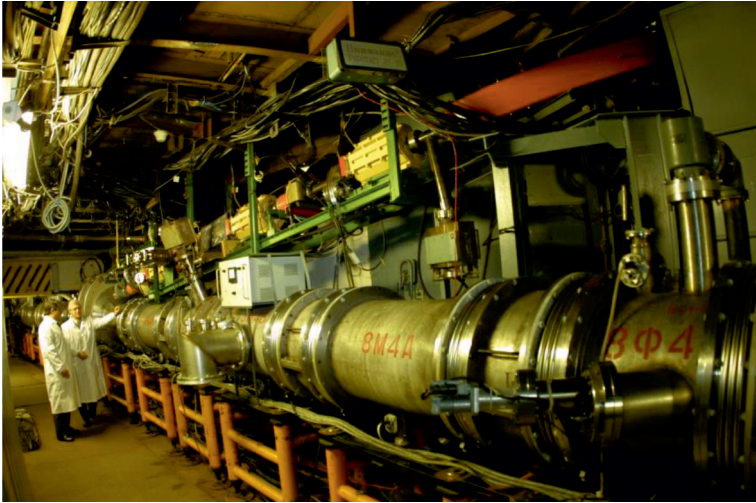


Рис. 2. Общий вид нуклотрона



Рис. 3. Л. Г. Макаров (слева). Открытие мемориальной доски в честь 90-летия Л. Г. Макарова (2013 г.). Слева направо: В. Д. Кекелидзе, А. И. Малахов, А. Д. Коваленко

методик $\Delta E - E$ были измерены спектры вторичных частиц. Результаты сеанса показали хорошие перспективы для проведения экспериментов на внутренней мишени [6].

В 1994 г. был проведен физический сеанс нуклотрона с пучком дейтронов с импульсами 3,8 и 6,2 ГэВ. На рис. 4 приведены спектры вторичных частиц, полученные в этом сеансе [7].

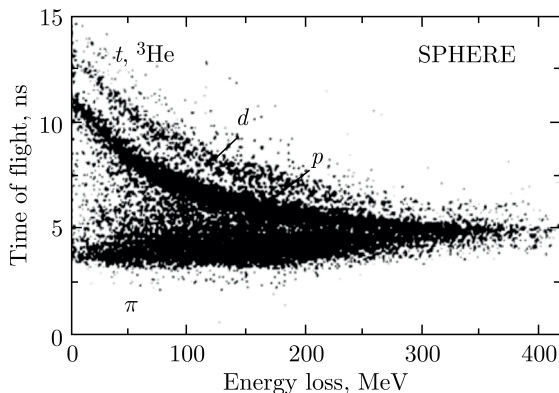


Рис. 4. Спектры вторичных частиц при взаимодействии внутреннего пучка дейтронов нуклотрона с импульсом 6,2 ГэВ/с с тонкой золотой мишенью

Для проведения регулярных физических исследований на внутренних пучках нуклотрона была создана специальная станция внутренних мишеней (рис. 5) [8]. Эта работа выполнялась под руководством Ю. С. Анисимова при активном участии коллег из Словакии и Чехии.

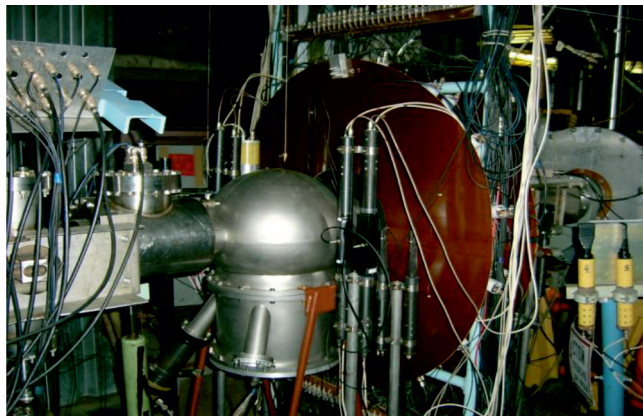


Рис. 5. Станция внутренних мишеней нуклотрона

Работа «Станция внутренних мишеней для экспериментов на нуклотроне» авторов Ю. С. Анисимова, А. С. Артемова, В. А. Краснова, А. И. Малахова, В. М. Слепнева, А. Ю. Старикова, Я. Климана, В. Матуоушека, М. Морхача, И. Турзо получила первую премию ОИЯИ за 2000 г.

Следующим этапом было создание системы медленного вывода пучка из нуклотрона, для того чтобы проводить физические эксперименты на внешних установках. Такая система была создана в 2002 г. под руководством А. Д. Коваленко и Е. А. Матюшевского, несмотря на финансовые трудности того периода [9]. Эта работа также была удостоена первой премии ОИЯИ за 2002 г. Лауреатами премии стали Б. В. Василишин, В. И. Волков, И. Б. Иссинский, В. Н. Карпинский, А. Д. Коваленко, В. А. Михайлов, В. А. Мончинский, С. А. Новиков, В. В. Селезнев, Г. Г. Ходжибабян. Создание системы вывода пучка из нуклотрона существенно расширило возможности проведения физических экспериментов.

К этому времени под руководством Е. Д. Донца были успешно выполнены работы по источнику тяжелых ионов КРИОН. Это позволило иметь на нуклотроне пучки тяжелых ионов вплоть до Хе. Работы группы Е. Д. Донца получили престижную международную премию «Brightness Award», присуждаемую раз в два года за важнейшие достижения в физике и технологии ионных источников.

В результате перечисленных выше работ на пучках нуклотрона начали работать около 15 физических установок (рис. 6).

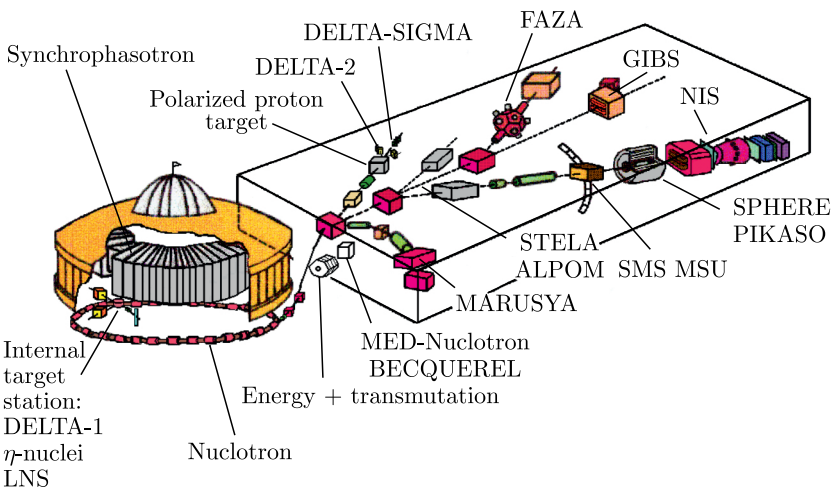


Рис. 6. Схема расположения физических установок на нуклотроне за период 1993–2010 гг.

Набор ускоряемых на нуклотроне ядер и интенсивности их выведенных пучков представлены в таблице (за период 1993–2010 гг.). В дальнейшем был построен бустер (2001–2002 гг.), и интенсивности тяжелых ядер резко возросли. Например, ядра Хе выводятся с интенсивностью $5 \cdot 10^7$ ионов за цикл.

Интенсивности выведенных пучков нуклотрона в 1993–2010 гг.

Уско- ряемые ядра	Интен- сив- ность	Уско- ряемые ядра	Интен- сив- ность	Уско- ряемые ядра	Интен- сив- ность
p	$2 \cdot 10^{10}$	${}^7\text{Li}$	$2 \cdot 10^9$	${}^{56}\text{Fe}$	10^6
d	$5 \cdot 10^{10}$	${}^{10}\text{B}$	$2 \cdot 10^{10}$	${}^{84}\text{Kr}$	10^3
\bar{d}	$3 \cdot 10^8$	${}^{12}\text{C}$	$6,5 \cdot 10^8$	${}^{124}\text{Xe}$	10^3
t	$4 \cdot 10^5$	${}^{24}\text{Mg}$	$1,2 \cdot 10^8$		
${}^4\text{He}$	$8 \cdot 10^8$	${}^{40}\text{Ar}$	10^8		

На рис. 7 приведена фотография события взаимодействия иона железа с кинетической энергией 1 ГэВ/нуклон в ядерной фотоэмульсии.

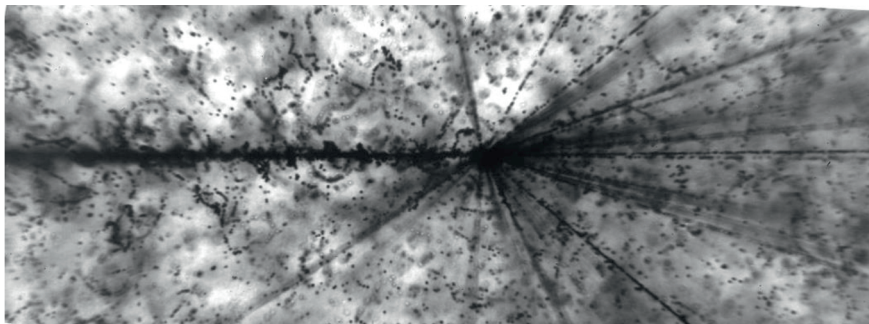


Рис. 7. Взаимодействие выведенного из нуклотрона пучка ядер ${}^{56}\text{Fe}$ с $E_{\text{кин}} = 1$ ГэВ/нуклон в ядерной эмульсии

До 2002 г. в ЛВЭ работало два ускорителя: синхрофазотрон и нуклотрон. После получения на нуклотроне поляризованных дейтронов работа синхрофазотрона была остановлена. На рис. 8 представлен график работы синхрофазотрона и нуклотрона по годам [10]. Длительность работы нуклотрона к 2006 г. превысила 2500 ч, и далее планировалось увеличить это время свыше 3500 ч. Однако эти планы были скорректированы в сторону сокращения в связи с началом работ по подготовке проекта коллайдерного комплекса NICA.

После создания на нуклотроне станции внутренних мишеней и системы медленного вывода пучка началась активная фаза физических экс-

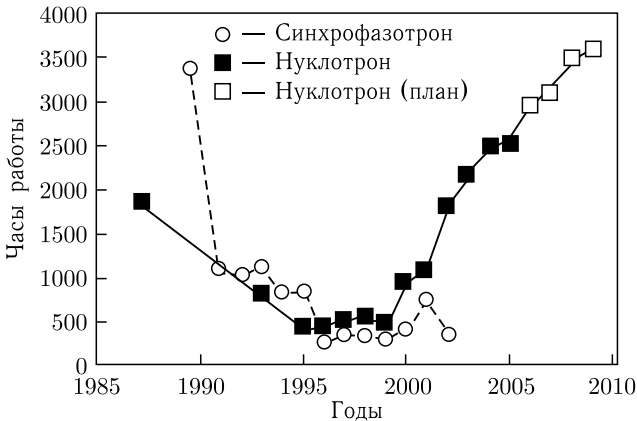


Рис. 8. Часы работы синхрофазотрона и нуклотрона по годам

периментов на нем. В круг пользователей нуклотрона входили десятки научных центров из России, из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ.

Было получено много отзывов и благодарностей за предоставленные пучки. Так, например, профессор П. Пикоззо из Италии в марте 2001 г. писал: «...работа была очень эффективной с замечательными результатами. Я хочу поблагодарить сотрудников ускорительного отделения за обеспечение нас очень хорошим пучком и за их сердечность». В январе 2002 г. профессор Р. Брандт (Германия) в своем письме отметил: «...все мы с Запада глубоко впечатлены отличной работой нуклотрона».

Работы по нуклотрону были высоко оценены руководством нашей страны. В 2010 г. группа сотрудников ОИЯИ совместно с сотрудниками ИТЭФ получила премию Правительства Российской Федерации за создание нового поколения ускорителей тяжелых ионов для релятивистской ядерной физики и инновационных ядерно-энергетических технологий. Лауреатами Государственной премии из ОИЯИ стали А. Д. Коваленко, А. Н. Сисакян, Г. В. Трубников, Г. Г. Ходжибагиян, Б. Ю. Шарков.

2. НАИБОЛЕЕ ЯРКИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НА НУКЛОТРОНЕ

Короткую информацию по большинству экспериментов в области релятивистской ядерной физики, выполненных ранее на нуклотроне, можно найти в [11]. Ниже описаны наиболее яркие результаты, полученные на нуклотроне.

Прежде всего это открытие в 2005 г. параметрического рентгеновского излучения, производимого релятивистскими ядрами углерода при прохождении кремниевого кристалла [12]. Лидерами этого эксперимента были А. Д. Коваленко и А. М. Таратин. Ранее такое излучение наблюда-

лось на протонах. Оказалось, что амплитуда сигнала сильно зависит от типа иона, что открывает возможности для создания нового типа детекторов частиц. На рис. 9 представлены спектры рентгеновского излучения в кристалле кремния от протонов и ядер углерода.

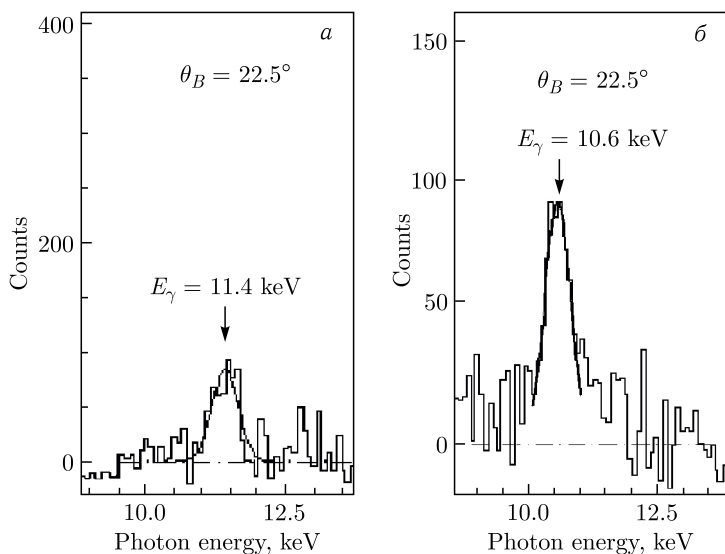


Рис. 9. Спектры параметрического рентгеновского излучения в кристалле кремния от протонов с энергией 5 ГэВ (а) и ядер углерода с энергией 2,2 ГэВ/нуклон (б)

Следующим важным экспериментом является открытие тензорной поляризации неполяризованных дейтронов при прохождении через вещество. Теоретически эффект был предсказан В. Г. Барышевским и обнаружен на нуклотроне группой под руководством Л. Г. Золина и А. Г. Литвиненко [13]. На рис. 10 представлена зависимость тензорной поляризации P_{zz} от толщины углеродной мишени. Видна заметная поляризация неполяризованного пучка дейтронов. Результаты этого эксперимента указывают на возможность получения поляризованного пучка дешевым способом без использования сложного оборудования.

Не менее интересны результаты эксперимента СКАН по поиску экзотических эта-мезонных ядер под руководством С. В. Афанасьева. На внутреннем дейтронном пучке нуклотрона на тонкой углеродной мишени получены указания на существование эта-мезонных ядер, т. е. ядер, у которых один нуклон замещен эта-мезоном [14]. На рис. 11 показана схема установки СКАН и приведен спектр эффективных масс протонов и пионов, указывающий на существование эта-мезонных ядер.

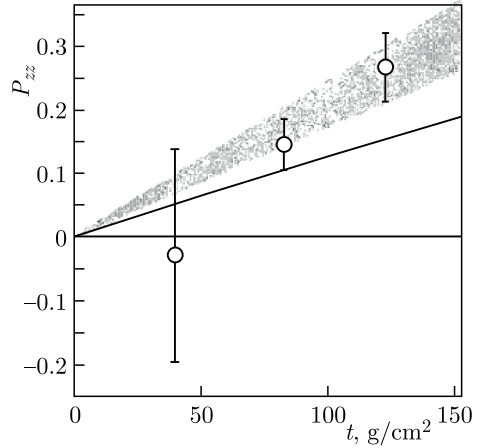


Рис. 10. Зависимость тензорной поляризации дейтронов с импульсом 5,5 ГэВ/с P_{zz} от толщины углеродной мишени

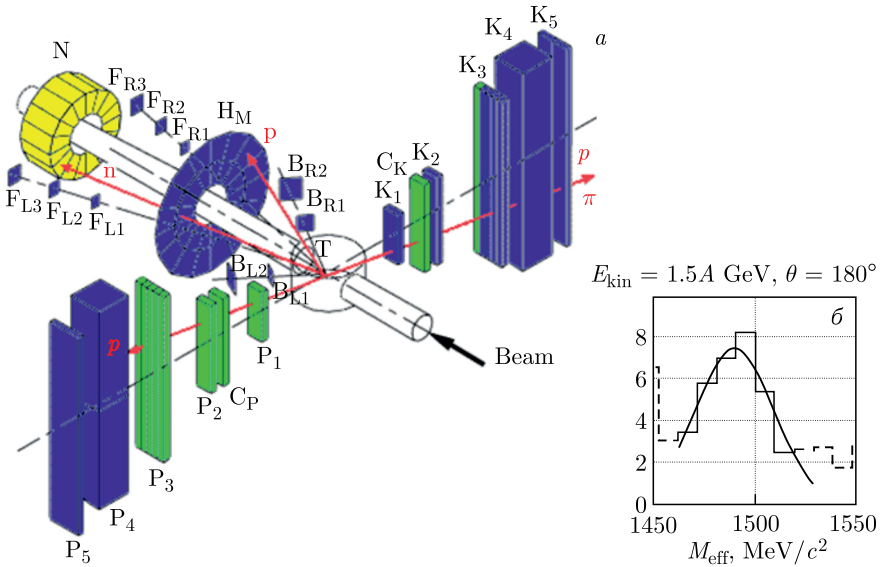


Рис. 11. Схема установки СКАН (а) и спектр эффективных масс протонов и пионов (б)

Следует отметить также наличие на нуклотроне уникальных пучков вторичных легких ядер, включая радиоактивные ядра, отсутствующие в природе. Работа по получению таких пучков была выполнена по инициативе П. И. Зарубина В. А. Мончинским и П. А. Рукояткиным. Эти пучки обеспечивают фундаментальные исследования структуры семейства легких ядер [15].

Весьма интересен результат по наблюдению эффекта роста выходов пионов с ростом массы мишени на внутреннем пучке протонов и дейтронов нуклотрона [16]. В области энергии пучковых частиц ~ 350 МэВ/нуклон наблюдается повышенный выход пионов на ядрах атомов меди (Cu) и серебра (Ag) (рис. 12). На более легких ядрах эффект отсутствует, что говорит о его ядерной природе. Эксперимент выполнен под руководством В. А. Краснова и А. Б. Курепина.

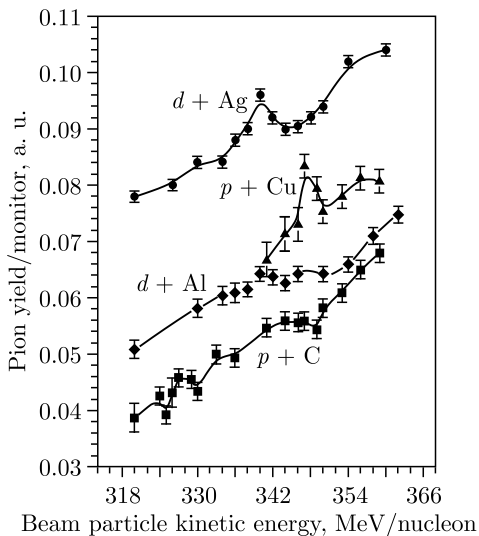


Рис. 12. Выход пионов для C-, Al-, Cu- и Ag-мишеней для протонного и дейтронного пучка с кинетической энергией около 350 МэВ/нуклон

Ценные результаты были получены на нуклотроне с поляризованными дейтронами с энергией до 2 ГэВ на установке LNS под руководством В. П. Ладыгина и Х. Сакаи (Япония) [17]. Эти результаты крайне необходимы для понимания трехнуклонных ядерных сил.

В 2005 г. была обнаружена неожиданная энергетическая зависимость отношений дифференциальных сечений нейтронов $R_{dp}(0^\circ) = \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(nd) \right] / \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(np) \right]$ на связанном и свободном протоне при нулевом угле вылета в области значений энергии от 0,55 до 2 ГэВ в зарядово-обменной реакции $np \rightarrow pn$ [18]. Предыдущие мировые данные проявляли резкий спад этого отношения с ростом энергии налетающего дейтрона. Эксперимент, выполненный на нуклотроне с высокой точностью, показал, что величина R_{dp} практически не меняется с увеличением энергии нейтронов вплоть до 2 ГэВ (рис. 13).

По поводу этого результата один из участников эксперимента Ф. Легар писал в местной газете «Дубна: наука, содружество, прогресс» [19]: «Да, физики ЛВЭ ОИЯИ закрыли одну дверцу в физике. Как это бывает, одновременно раскрыли другие двери, более надежные, и поставили

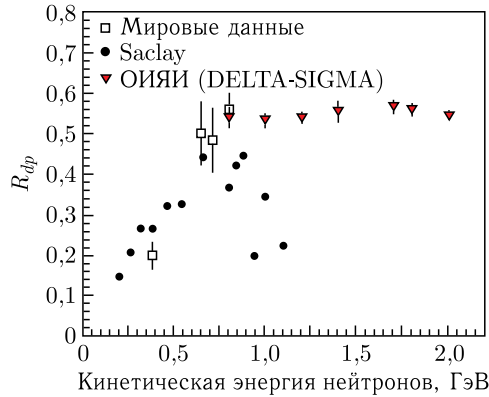


Рис. 13. Зависимость $R_{dp}(0^\circ) = \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(nd) \right] / \left[\frac{d\sigma}{d\Omega}(np) \right]$ от кинетической энергии нейтронов

в своей области науки новые вопросы. Я уверен, что эти вопросы будут не менее важны, чем предыдущие, которые решались в течение половины века».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в тяжелое экономическое время в Дубне был создан современный специализированный ускоритель релятивистских ядер на энергию до 6 ГэВ/нуклон — нуклотрон. Это был первый в Европе ускоритель на основе сверхпроводимости для исследования релятивистских ядер. Создание такого ускорителя позволило продолжить физические исследования с релятивистскими ядрами, начатые на синхрофазотроне, как в фундаментальной науке, так и в области прикладных исследований. Был получен ряд важных физических результатов, необходимых для понимания строения материи, для применения ядерных пучков в медицине, в энергетике, радиобиологии и исследовании радиационной стойкости элементов электроники. С вводом в эксплуатацию бустера нуклотрона в 2021 г. существенно выросли интенсивности ускоряемых ядер. На выведенном пучке начала работать новая современная универсальная установка $BM@N$ (Baryonic Matter at Nuclotron). Программа по физике тяжелых ионов на $BM@N$ включает в себя изучение уравнения состояния ядерной материи и динамики ядерных столкновений, свойств адронов в плотной среде, рождения каскадных гиперонов вблизи порога и рождения гиперядер [20, 21].

Опыт создания нуклотрона и его эксплуатации позволил подготовить проект коллайдерного центра NICA, который реализуется в настоящее время. Нуклотрон является «сердцем» коллайдера NICA. Ядерные пучки, ускоренные на нуклотроне, будут вводиться во встречные кольца коллайдера и сталкиваться в двух точках, где расположатся установки MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector) [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балдин А. М., Безногих Ю. Д., Зиновьев Л. П., Иссинский И. Б., Казанский Г. С., Михайлов А. И., Мороз В. И., Павлов Н. И., Пучков Г. П. Ускорение и вывод дейтронов из синхрофазотрона ОИЯИ. Препринт ОИЯИ Р9-5442. Дубна, 1970.
2. Балдин А. М. // Краткие сообщ. по физике ФИАН. М., 1971. С. 35.
3. Балдин А. М. и др. // ЯФ. 1973. Т. 18, вып. 1. С. 79.
4. Балдин А. М., Василишин В. В., Дьячков Е. М., Зельдович А. Г., Зиновьев Л. П., Иссинский И. Б., Кириллов А. Д., Кулакова Е. М., Макаров Л. Г., Семенюшкин И. Н., Смирнов А. А., Степанюк В. Л., Михайлов В. А. и др. Нуклотрон — ускорительный комплекс релятивистских ядер в ЛВЭ ОИЯИ // Тр. четвертого Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1974. Т. II. С. 4–8.
5. Шафранова М. Г. Объединенный институт ядерных исследований: Информац.-биограф. справ. М.: Физматлит, 2002.
6. Baldin A. M., Afanasiev S. V., Anisimov Yu. S. et al. The First Experiments on Nuclear Reaction Studies at Nuclotron // JINR Rapid Commun. 1993. No. 4[61]. P. 13–17.
7. Baldin A. M., Abraamyan Kh. U., Afanasiev S. V. et al. An Experimental Run on the New Superconducting Accelerator Nuclotron at 3.8 and 6.2 GeV/c Deuteron Momentum // JINR Rapid Commun. 1994. No. 2[66]. P. 26–32.
8. Malakhov A. I., Afanasiev S. V., Anisimov Yu. S., Artimov A. S., Bazilev S. N., Khrenov A. N., Kliman J., Krasnov V. A., Matousek V., Morhac M., Starikov A. Yu., Shabunov A. V., Slepnev V. M., Turzo I. Potentialities of the Internal Target Station at the Nuclotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 440, Iss. 2. P. 320–329.
9. Agapov N. N., Andreev V. A., Baldin A. M., Blinov N. A., Brovko O. I., Buldakovsky V. N., Butenko A. V., Golubitsky O. M., Govorov A. I., Ivanov E. V., Issinsky I. B., Kalenov S. V., Kaplin V. I., Khodgibagiyani H. G., Kirichenko A. E., Kochurov A. G., Kovalenko A. D., Kozlov O. S., Kulikov I. I., Leonov L. A., Malakhov A. I., Matyshevsky E. A., Meshkov I. N., Mikhailov V. A., Monchinsky V. A., Nikitaev P. I., Novikov S. A., Romanov S. V., Rukoyatkin P. A., Sayfulin S. Z., Smirnov A. A., Sveshnikov B. N., Seleznev V. V., Vasilishin B. V., Voevodin M. A., Volkov V. I., Vol'nov A. V. Slow Beam Extraction from the Nuclotron // Proc. of the 2001 Part. Accel. Conf., Chicago, Illinois, USA, June 18–22, 2001. P. 1646–1548.
10. Malakhov A. I. Some Results of 2004 and Research Programme of the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies for 2005–2007. Report to the 97th Session of the JINR Sci. Council, Jan. 20–21, 2005.
11. Малахов А. И. Релятивистская ядерная физика. Дубна, 2021.
12. Adishev Yu. N., Afanasiev S. V., Boiko V. V., Efimov A. N., Efremov Yu. V., Gogolev A. S., Kovalenko A. D., Pivovarov Yu. L., Potylitsyn A. P., Romanov S. V., Saifulin Sh. Z., Silaev E. A., Taratin A. M., Timoshenkov S. P., Uglov S. R., Volkov V. I., Voevodin M. A., Zabaev V. N. First Observation of Parametric X-Rays Produced by Moderate Relativistic Protons and Carbon Nuclei in Si Crystals // Nucl. Instr. Meth. B. 2006. V. 252. P. 111–117.

13. *Azhgirei L.S., Vasiliev T.A., Gurchin Yu. V., Zhmyrov V.N., Zolin L.S., Isupov A. Yu., Kurilkin A.K., Kurilkin P.K., Ladygin V.P., Litvoenko A.G., Peresedov V.F., Piyadin S.M., Reznikov S.G., Rovba A.A., Rukoyatkin P.A., Tarasov A.V., Khrenov A.N., Yanek M.* Measurement of Tensor Polarization of a Deuteron Beam Passing through Matter // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2010. V.7. P.27–32.
14. *Afanasiev S.V., Artiomov A.S., Bekmirzaev R.N., Dryablov D.K., Igamkulov Z.A., Ivanov V.I., Isupov A. Yu., Jomurodov D.M., Malakhov A.I., Lebedev A.I., L'vov A.I., Pavlyuchenko L.N., Plekhanov E.B., Polyansky V.V., Sidorin S.S., Sokol G.A., Sultanov M.U.* Search for η -Mesic Nuclei in the Reaction $d+C$ at JINR // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2011. V.8, No.10. P.1073–1077.
15. *Zarubin P.I.* Clusters in Nuclei // *Lecture Notes Phys.* 2013. V.875, No.3. P.51–93.
16. *Livanov A.N., Anisimov Yu.S., Gmuca S., Gurchin Yu. V., Janek M., Kiselev A.S., Kizka V.A., Krasnov V.A., Kuznetsov S.N., Ladygin V.P., Malakhov A.I., Kliman J., Matousek V., Morkhach M., Plekhanov E.B., Turzo I., Kurepin A.B., Vasiliev T.A.* Search for Resonant Structure in the Pion Production Reaction on the Nuclotron Internal Beam // *Intern. J. Mod. Phys. A.* 2007. V.22. P.604–607.
17. *Ladygin V.P., Averyanov A.V., Chernykh E.V., Enache D., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Janek M., Karachuk J.-T., Khrenov A.N., Krivenkov D.O., Kurilkin P.K., Ladygina N.B., Livanov A.N., Mezhsenska O., Piyadin S.M., Reznikov S.G., Skhomenko Ya. T., Terekhin A.A., Tishevsky A.V., Uesaka T.* Energy Dependence of the Vector A_y and Tensor A_{yy} and A_{xx} Analyzing Powers in Deuteron-Proton Elastic Scattering at Large Scattering Angles // *Europhys. J. Web Conf.* 2019. V.204. P.01019.
18. *Sharov V.I., Morozov A.A., Shindin R.A., Antonenko V.G. et al.* Measurements of the Ratio R_{dp} of the Quasi-Elastic $nd \rightarrow p(nn)$ to the Elastic $np \rightarrow pn$ Charge-Exchange Process Yields at Zero Proton Emission Angle over the 0.55–2.0-GeV Neutron Beam Energy Region // *Eur. Phys. J. A.* 2009. V.39. P.267–280.
19. *Легар Ф.* Конец привлекательной сказки и неожиданные результаты на нуклотроне // *Дубна: наука, содружество, прогресс.* 2005. №47(3785). С.3.
20. *Kapishin M. for the BM@N Collab.* Studies of Baryonic Matter at the BM@N Experiment (JINR) // *Nucl. Phys. A.* 2019. V.982. P.967–970.
21. *The BM@N Collab.* Production of π^+ and K^+ Mesons in Argon-Nucleus Interactions at 3.2A GeV // *JHEP.* 2023. V.07. P.174.
22. *Trubnikov G., Butenko A., Golovatyuk V., Guskov A., Kapishin M., Keke lidze V., Lednicky R., Meshkov I., Sorin A.* NICA Heavy-Ion Collider at JINR (Dubna). Status of Accelerator Complex and First Physics at NICA // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2023. V.2586. P.012013.