

P13-2010-124

Ц. Ц. Пантелеев, А. А. Богдзель, В. М. Милков,
В. Н. Швецов, С. А. Кутузов, С. Б. Борзаков, П. В. Седышев

НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР
НА БАЗЕ ПРОТОННОГО ТЕЛЕСКОПА
С ЭЛЕКТРОННОЙ КОЛЛИМАЦИЕЙ
ПРОТОНОВ ОТДАЧИ

Направлено в журнал «НМ»

Пантелеев Ц. Ц. и др.

P13-2010-124

Нейтронный спектрометр на базе протонного телескопа
с электронной коллимацией протонов отдачи

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований был создан нейтронный спектрометр на основе газовых пропорциональных счетчиков с регистрацией протонов отдачи. Принцип действия спектрометра основан на измерении кинетической энергии упруго рассеянных на малые углы протонов из реакции (n, p) в водородосодержащей среде. Спектрометр состоит из двух цилиндрических пропорциональных счетчиков, размещенных в общем газовом объеме с общей центрально расположенной анодной нитью. С использованием радиоизотопного источника нейтронов ^{252}Cf , а также моноэнергетических нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$, получаемых из тонкой литиевой мишени на пучке протонов электростатического ускорителя ЭГ-5, были проведены исследования характеристик нейтронного спектрометра. Эффективность регистрации нейтронов с кинетическими энергиями в интервале от 150 кэВ до 14 МэВ находится в диапазоне 10^{-4} – 10^{-6} . Энергетическое разрешение составляет около 1,5 %.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Panteleyev Ts. Ts. et al.

P13-2010-124

A Neutron Spectrometer on the Basis of a Proton Telescope
with Electronic Collimation of Recoil Protons

A gas recoil neutron spectrometer for measuring the energy distribution of fast neutron fluxes was constructed and its characteristics have been studied. It is based on measurement of the kinetic energy of protons elastically scattered at small angles from (n, p) reaction in the hydrogen gas media. The spectrometer is composed of two cylindrical proportional counters with common anode wire in the centre. The counting efficiency for neutrons with kinetic energies in the interval from 150 keV to 14 MeV is expected to be 10^{-4} – 10^{-6} . The estimated energy resolution is about 1.5%.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость измерения кинетической энергии быстрых нейтронов появилась одновременно с их открытием и продолжает оставаться актуальной до настоящего времени. Вся сложность данной проблемы состоит в отсутствии электрического заряда, что приводит к требованию трансформации энергии нейтрона в кинетическую энергию какой-либо заряженной частицы. Сам факт регистрации разделяется на две существенно различающиеся задачи:

— первая — для регистрации медленных тепловых нейтронов используются ядерные реакции, имеющие гигантские сечения взаимодействия по сравнению с типично ядерными взаимодействиями;

— вторая — она, как правило, связана с измерениями энергетических распределений быстрых нейтронов — используются результаты нейтрон-ядерных взаимодействий, для которых сечения взаимодействия не более десятка барн.

В области резонансных энергий (от 0 до ~ 100 кэВ) применяется метод времени пролета, требующий импульсного характера работы нейтронного источника. Другой метод — измерение энергии протонов отдачи в водородосодержащих сцинтилляционных материалах с последующей процедурой восстановления спектров. Частным случаем применения этой методики являются протонные телескопы, в которых измеряется энергия протонов отдачи в газовой среде. В качестве примеров можно указать ранние разработки спектрометров, приведенные в работах [1–3], и одну из последних работ в 2006 г. [4]. Этому способу спектрометрии быстрых нейтронов и посвящена данная работа.

1. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

В ЛНФ ОИЯИ был разработан и изготовлен нейтронный спектрометр на базе телескопа протонов отдачи, в котором был применен метод их электронной коллимации

На рис. 1 представлен общий вид прибора.

Корпус (1) изготовлен из тонкостенной нержавеющей трубы с внутренним диаметром 96 мм и длиной 625 мм. По длине всей рабочей части детектора протянута анодная нить (W + Au) диаметром 50 мкм (2). В самом начале

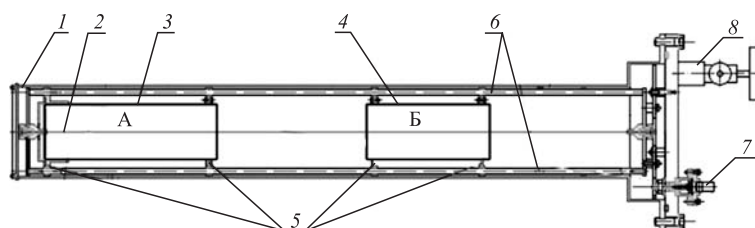


Рис. 1. Общий вид прибора

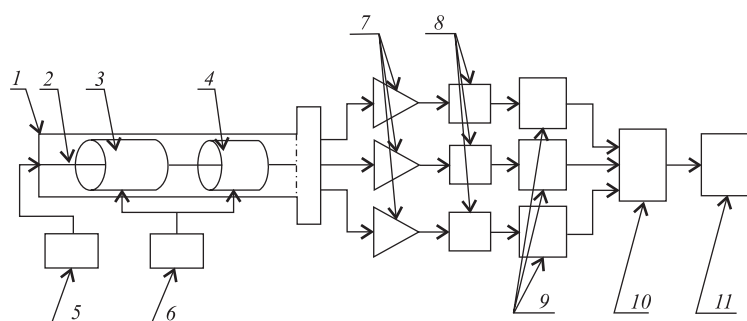


Рис. 2. Блок-схема спектрометра

рабочего объема расположен первый катод (катод А) (3) в виде трубки длиной 175 мм, на расстоянии 152,5 мм от его края смонтирован второй катод (катод Б) (4) длиной 125 мм. Оба электрода изготовлены из тонкостенной трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 54 мм, они поддерживаются и центрируются с помощью тефлоновых колец (5). Сами кольца расположены на шести стойках (6). Три сигнальных вывода (7) и вакуумный кран (8) расположены на заднем фланце.

На рис. 2 представлена блок-схема спектрометра.

Анодная нить (2) в корпусе (1) подключена к источнику положительного высокого напряжения (5), катод А (3) и катод Б (4) подключены к выравнивающему источнику напряжения (6). Сигналы с катодов и анода подаются на входы зарядочувствительных предусилителей (7). Выходы предусилителей подключены ко входам соответствующих спектрометрических усилителей (8), а их выходы подключены ко входам аналого-цифровых преобразователей (АЦП) (9), которые через контроллер КАМАК (10) по интерфейсу USB подключены к персональному компьютеру (ПК) (11).

АЦП, контроллер КАМАК и ПК образуют электронную систему, которая осуществляет функции дискриминации, совпадения сигналов анода и катодов и запись многомерной амплитудной информации.

Обработка полученной информации производится с помощью программы Lada 2010, которая была разработана в ЛНФ.

При обработке многомерных экспериментальных данных программой Lada 2010 получается энергетический спектр нейтронов в заданной области газовой мишени и заданном телесном угле рассеяния протонов отдачи в детекторе.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Телескоп построен на базе пропорционального счетчика с общей анодной нитью в герметичном корпусе, наполненном водородосодержащим газом.

Применение двух дополнительных электродов позволяет решить две функциональные задачи:

- создание области мишени в первой трубке (катод А);
- коллимация протонов отдачи в телесном угле, который определяется дальним торцом второй трубки (катод Б).

Оставшаяся область от торца второй трубки до конца корпуса детектора создает объем, в котором происходит остановка протонов отдачи. В объеме детектора выделяются три области с различными радиусами катодов (трубки А и Б и остальная часть счетчика), что влечет за собой различие в коэффициентах газового усиления. Выравнивание коэффициента газового усиления осуществляется с помощью подачи компенсационного потенциала на трубки.

В телескопе коллимация осуществляется путем совпадения импульсов от протонов отдачи в обеих трубках и в дальнейшем при программной сортировке экспериментальных данных в выбранных интервалах амплитудных распределений сигналов, снимаемых с катодов А и Б.

Изменением порога дискриминации импульсов в первой трубке можно выбрать толщину газового слоя, расположенного в начале трубки, в котором могут происходить акты рассеяния нейтронов на протонах, т. е. определять толщину и месторасположение газовой мишени, а также менять телесный угол, в пределах которого работает телескоп, тем самым оптимизировать как эффективность, так и энергетическое разрешение прибора.

Порог дискриминации импульсов во второй трубке устанавливается в районе максимума амплитуды, что соответствует факту полного прохождения протонов отдачи через трубку.

Так как потери энергии с высокой точностью пропорциональны длинам траекторий, устанавливая порог дискриминации, можно выбрать толщину газового слоя мишени.

Для вычисления пробегов протонов в детекторе использовалась программа SRIM [5].

Факт совпадения во времени отобранных импульсов с обеих трубок соответствует полному расположению треков в объеме телескопа.

Энергия протонов зависит от угла вылета протона относительно первоначального направления нейтрона следующим образом:

$$E_p = E_{n0} \cdot \cos^2 \theta_p. \quad (1)$$

Регистрируя протоны в малом телесном угле, можно получить хорошее энергетическое разрешение:

$$dE_p = E_{n0} \sin(2\theta_p) d\theta_p. \quad (2)$$

Интегрируя от 0 до $\theta_{p \max}$, получим

$$\Delta E_p = E_{n0}(1 - \cos \theta_{p \max}). \quad (3)$$

Следует заметить, что величина $\theta_{p \max}$ зависит от точки рождения трека.

Для энергетической калибровки в области до 1,0 МэВ, а также для измерения собственного разрешения детектора в состав газового наполнения введено небольшое количество ^3He .

Отличительными признаками заявленного спектрометра является то, что:

- в качестве протонной мишени используется слой газа в первой трубке, толщина и положение которого произвольно выбирается при обработке информации в электронной системе, что приводит к значительному снижению энергетического порога регистрируемых спектров и улучшению разрешения;
- вторая трубка служит в качестве коллиматора протонов отдачи (при условии совпадения сигналов с обеих трубок), а выбор минимального угла коллимации осуществляется после обработки информации в электронной схеме.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ МОНТЕ-КАРЛО

Для исследования характеристик протонного телескопа была выполнена симуляция с использованием метода Монте-Карло.

Быстрые нейтроны рассеиваются на водородосодержащей газовой мишени, и протоны отдачи попадают в цилиндрический счетчик с радиусом R_c и длиной L . Нейтроны, регистрируемые счетчиком, летят параллельно оси z . Допустим, протон отдачи появился в точке с координатой z_0 и на расстоянии r от оси цилиндра и движется в направлении, определяемом углом θ относительно оси цилиндра и углом φ , отсчитываемым от вертикального направления (рис. 3).

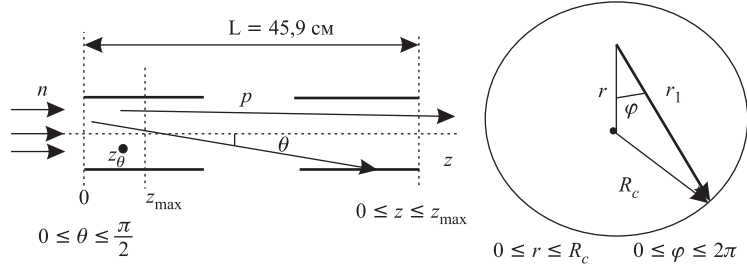


Рис. 3. Расчет спектра протонов отдачи в цилиндрическом счетчике

Тогда протон пересекает границу цилиндра на расстоянии

$$r_1 = -r \cos \varphi + \sqrt{r^2 \cos^2 \varphi + R_c^2 - r^2}. \quad (4)$$

Расстояние, которое проходит протон в цилиндре, равно

$$l_p = \frac{r_1}{\sin \theta}. \quad (5)$$

Если протон появился в точке с координатой z_0 , то он пересечет границу цилиндра в точке с координатой

$$z_1 = z_0 + l_p \cdot \cos \theta. \quad (6)$$

Координата z_1 не должна превышать максимальной длины счетчика.

Программа моделирует треки протонов в зависимости от углов вылета θ и φ . Разыгрываются начало трека координаты z и расстояние r от оси симметрии счетчика. Далее разыгрываются углы θ и φ и рассчитывается длина трека до точки пересечения с трубкой. Значения углов и начальной координаты варьировались в следующих пределах:

$$0 \leq r \leq R_c, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq z \leq z_{\max}.$$

Для оценки телесного угла отбираются только те события, в которых протоны прошли полностью вторую трубку. Таким образом, отбираются события, соответствующие трекам протонов в малом телесном угле вдоль оси симметрии детектора, что позволяет определить энергию налетающего нейтрона с хорошим разрешением.

Расчеты проводились для моноэнергетических нейтронов с энергией 1 МэВ, длина трека — 70 см, максимальное расстояние от начала первой трубки до конца второй $L = 45,9$ см. Радиус трубки $R_c = 2,25$ см.

Были проделаны три варианта расчетов: 1) $0 < z < 2,5$; 2) $0 < z < 5,0$; 3) $0 < z < 7,5$ см.

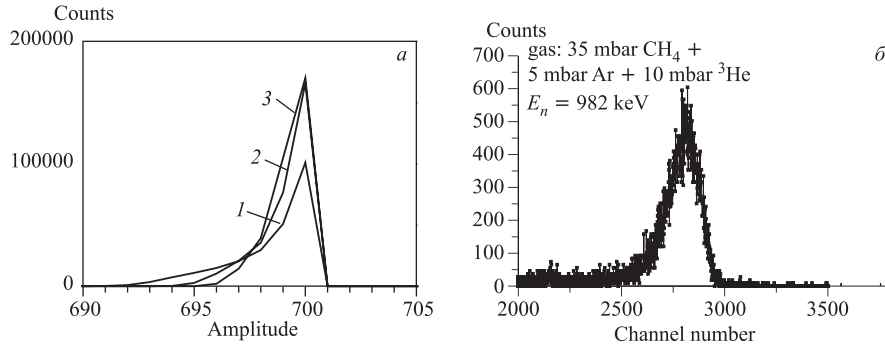


Рис. 4. Формы спектров протонов для различных областей рождения треков: *а*) расчетные — 1) $0 < z < 2,5$ см; 2) $0 < z < 5,0$ см; 3) $0 < z < 7,5$ см; *б*) экспериментальные — спектр моноэнергетических потоков нейтронов $E_n = 982$ кэВ получен на электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ

Каждый раз разыгрывалось по 10^7 событий. Результат — по мере увеличения области рождения протонов увеличивается ширина пиков (см. рис. 4, *а*). Для сравнения на рис. 4, *б* показана часть измеренного спектра. Условия измерения описаны ниже.

Оценка эффективности проводилась по формуле

$$\varepsilon = n_{\text{H}} \sigma_{\text{np}} \frac{\Delta\Omega}{2\pi}, \quad (7)$$

которая верна для малой концентрации газа и учитывает, что протоны летят вперед. n_{H} — число ядер водорода на 1 см^2 в детекторе, σ_{np} — сечение рассеяния.

Использовался газ CH_4 под давлением 35 мбар,

$$n_{\text{H}} = \frac{N_{\text{H}}}{S} = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}. \quad (8)$$

Используя результат моделирования $\Delta\Omega/2\pi \approx 0,02$, получим, что эффективность телескопа при давлении 35 мбар составляет величину $\varepsilon(1 \text{ МэВ}) \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$.

Величина эффективности телескопа линейно зависит от давления рабочего газа.

4. ИЗМЕРЕНИЯ

Для проверки работоспособности детектора были проведены следующие эксперименты: к начальному торцу первой трубки был прикреплен α -источник ^{241}Am , давление в объеме детектора составляло 1,2 атм, что исключало

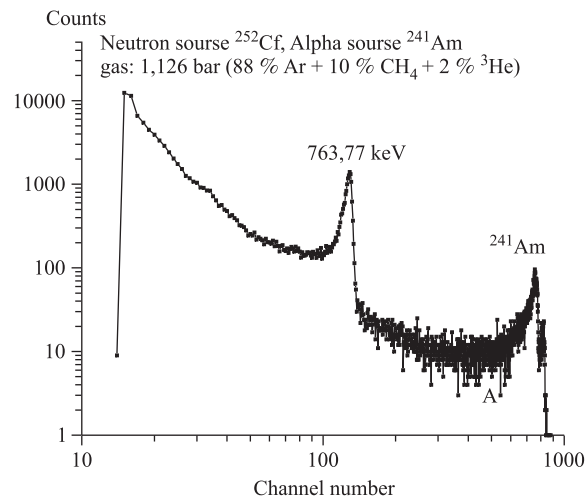


Рис. 5. Спектр с катода А

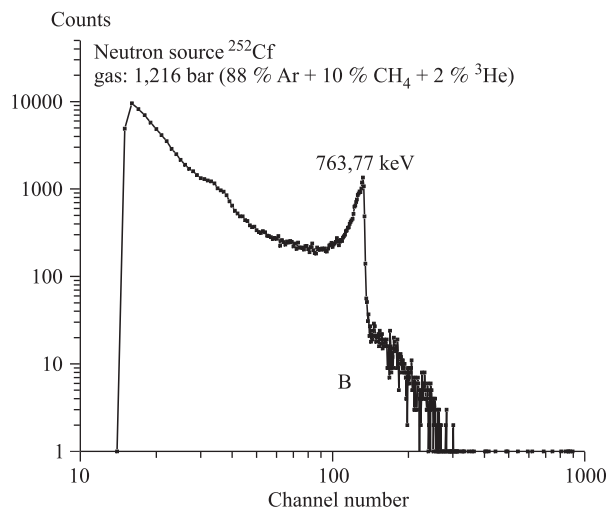


Рис. 6. Спектр с катода Б

возможность попадания α -частицы из объема первой трубки (катод А) в объем второй трубки (катод Б). Детектор облучался также тепловыми нейтронами после замедлителя от ^{252}Cf . На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений.

На рис. 7 представлены результаты измерения анодных спектров от реакции $^3\text{He} (n, p) \text{T} + 763,77 \text{ кэВ}$. Совмещение двух пиков, т. е. выравнивание

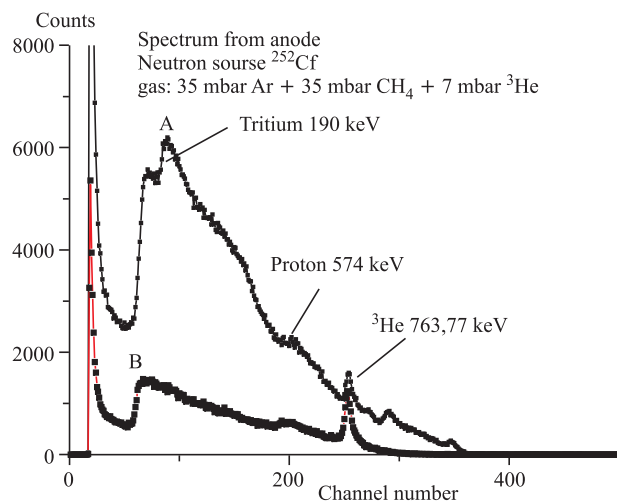


Рис. 7. Измерения спектров от реакции $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77$ кэВ. Спектр А без компенсационного потенциала. Спектр Б с помощью компенсационного потенциала на двух катодах

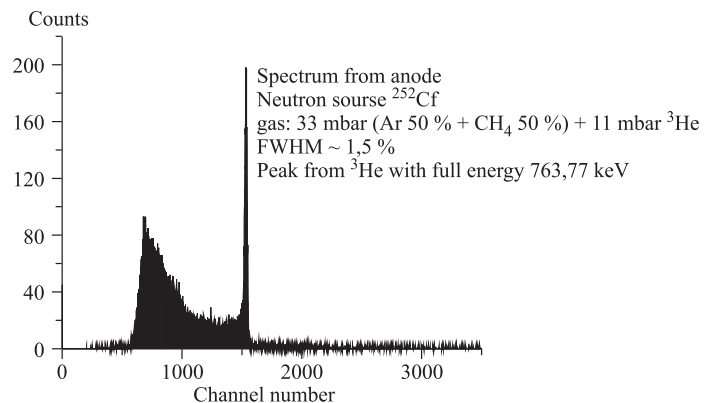


Рис. 8. Результаты измерения спектров от реакции $^3\text{He}(n,p)\text{T} + 763,77$ кэВ с помощью стандартного источника нейтронов ^{252}Cf и полиэтиленового блока-замедлителя

коэффициентов газового усиления во всем объеме детектора, достигается с помощью подачи положительного потенциала на катодные трубки U_{k0} , величина которого определяется путем подбора .

Добавление небольшого количества ^3He в газовую смесь позволяет экспериментально измерить два исключительно важных параметра протонного телескопа:

1. С помощью стандартного источника нейтронов ^{252}Cf и полиэтиленового блока-замедлителя было измерено собственное энергетическое разрешение детектора, которое составило $\sim 1,5\%$ (FWHM). Полученные результаты представлены на рис. 8.

2. Пик полного поглощения энергии протонов и тритонов в объеме детектора позволяет проводить энергетическую калибровку с высокой точностью вплоть до 1 МэВ энергии протонов отдачи. Возможно также использовать пики вылета протона (574 кэВ) и тритона (190 кэВ) для калибровки телескопа при низких энергиях нейтронного потока.

На электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ была проведена серия измерений моноэнергетических потоков нейтронов, которые были получены в результате реакции $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$. На рис. 4, б приведен спектр нейтронов с энергией 982 кэВ, полученный на электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ.

5. ВЫВОДЫ

Разработан и изготовлен нейтронный спектрометр на базе телескопа протонов отдачи, в котором был применен метод их электронной коллимации.

Для исследования характеристик протонного телескопа была выполнена симуляция с использованием метода Монте-Карло. Прделаны три варианта расчетов: 1) $0 < z < 2,5$; 2) $0 < z < 5,0$; 3) $0 < z < 7,5$ см (см. рис. 4, а).

Эффективность по расчетам составляет 10^{-6} (в зависимости от состава и давления газовой смеси в объеме телескопа).

Для проверки работоспособности детектора были сняты спектры с анода, катода А и катода Б (см. рис. 5–7).

Измерено собственное энергетическое разрешение детектора, которое составило $\sim 1,5\%$ (FWHM) (см. рис. 8).

Измерены энергии моноэнергетических нейтронов на электростатическом генераторе ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ, которые были получены в результате реакции $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$. Разрешение по быстрым нейтронам в интервале энергии 155 кэВ–1 МэВ составило $\sim 9\%$ (FWHM) (см. рис. 4, б).

В дальнейшем будут представлены подробные результаты измерений моноэнергетических нейтронов на ЭГ-5 и описание программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Asai K. et al. // Nuclear Science and Technology. 2006. V. 43, No. 4. P. 320–324.
2. Borst H. // Nucl. Instr. Meth. 1980. V. 169. P. 69–75.
3. Mizuno M. // Nucl. Instr. Meth. 1969. V. 75. P. 85–92.
4. Mizuho M., Yamanaka T. // Nucl. Instr. Meth. 1971. V. 91. P. 57–60.
5. <http://www.srim.org/#SRIM>

Получено 2 ноября 2010 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 27.12.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,81. Уч.-изд. л. 0,95. Тираж 310 экз. Заказ № 57208.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/