

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Гигантские импульсы тепловых нейтронов в ловушках больших ускорителей. Возможности физических экспериментов

Ю.Я. Стависский

*Проводится краткий обзор развития в России интенсивных импульсных источников нейтронов для физических исследований (пульсирующие быстрые реакторы ИБР-1, ИБР-30, ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна); нейтронно-радиационный комплекс московской мезонной фабрики — "троицкая троица" (Институт ядерных исследований РАН, г. Троицк, Московская область). Рассматривается возможность генерации гигантских импульсов нейтронов в ловушках ускорителей на сверхвысокие энергии. В частности, возможность генерации интенсивных импульсных потоков тепловых нейтронов в модифицированных ловушках большого адронного коллайдера LHC, сооружаемого в ЦЕРНе. При однооборотном выводе 7 ТэВ-ных протонов, накопленных в основных кольцах LHC в тяжелые мишени с замедлителями из воды или гидрида циркония, введенные в начальную часть графитовых ловушек пучков LHC, каждые 10 часов возникают сравнительно короткие (от ~ 100 мкс) импульсы тепловых нейтронов с пиковой плотностью потока до ~ 10<sup>20</sup> нейтр. см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Дискутируется возможность использования таких импульсов в физических исследованиях.*

PACS numbers: 28.20.-v, 29.20.-c, 61.12.-q

### Содержание

1. Введение (1283).
2. Гигантские импульсы нейтронов в ловушках LHC (1287).
3. Возможное применение ловушки LHC в нейтронных исследованиях (1289).
  - 3.1. Эксперименты в "нейтронном газе". 3.2. Пучковые эксперименты. 3.3. Нейтринные исследования.
4. Заключение (1291).

Список литературы (1291).

### 1. Введение

В давние обнинские времена (пятидесятые годы прошлого века) И.И. Бондаренко обратил внимание своих коллег и друзей на возможности, открывающиеся для экспериментов по ядерной физике низких и средних энергий при использовании ускорителей протонов с сильной фокусировкой. В сентябре 1963 года во время посещения Института ядерной физики СО АН СССР (Новосибирск) я обратил внимание на быстроцикли-

ческий протонный синхротрон на 500 МэВ, разработанный А.А. Соколовым и др. под руководством Г.И. Будкера.

В конце 1950-х годов группа ФЭИ (ныне Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск) совместно с ЦНИИ-58 (бывшее КБ В.Г. Грабина, обеспечившее во время Великой Отечественной войны оснащение Советской армии артиллерией малого и среднего калибров — до ~ 100 мм), с участием ЦИАМ им. П.И. Баранова, ВНИИНМ им. А.А. Бочвара и других научно-исследовательских и проектно-конструкторских коллективов завершила разработку и изготовление оборудования первого пульсирующего реактора ИБР-1, теория которого была создана в ФЭИ, по поручению директора Института Д.И. Блохинцева, И.И. Бондаренко и мной в начале 1956 г. [1]. Существенный вклад в раздел теории, посвященный стохастическому разбросу амплитуд импульсов, внес позднее Ленард Пал (Венгрия).

Все началось осенью 1955 года на общем семинаре, проводимом в ФЭИ под руководством А.И. Лейпунского. В своем выступлении Дмитрий Иванович Блохинцев предложил создать интенсивный импульсный источник нейтронов для физических исследований в виде периодически-импульсного (пульсирующего) быстрого реактора, часть активной зоны которого предлагалось закрепить на периферии быстровращающегося диска. При прохождении подвижной части активной зоны через неподвижную должна была развиться надкритическая цепная реакция, возникнуть импульс мощности и, соответственно, нейтронов.

**Ю.Я. Стависский.** Лаборатория нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований  
141980 Дубна, Московская обл., Российская Федерация  
Тел. + 49 (0) 961 6-34-15-05. Факс + 49 (961) 6-28-56  
E-mail: stavss@freenet.de

Статья поступила 22 июня 2005 г., после доработки 21 июля 2006 г.

В те годы шли дискуссии о перспективах развития интенсивных источников нейтронов для физических исследований. Действительно, нейтроны — уникальный инструмент для изучения структуры ядра и механизма ядерных реакций и, в то же время, мощное средство исследования структуры и динамики конденсированных сред, существенно дополняющее рентгено-структурные и оптические методы. Обсуждался вопрос о перспективах стационарных источников на основе высокопоточных исследовательских реакторов и интенсивных импульсных источников нейтронов. Мы больше склонялись к импульсным, что можно было объяснить тем, что в ФЭИ уже с начала 1950-х годов развивались по инициативе А.И. Лейпунского работы по измерению нейтронных сечений и спектров для атомной энергетики и соответствующие исследования по нейтронной ядерной физике. Наиболее перспективная методика здесь — техника по времени пролета нейтронов с использованием импульсных источников нейтронов, тогда — на основе ускорителей протонов прямого действия (каскадных генераторов и ускорителей Ван-де-Граафа с импульсными ионными источниками) и пороговых  $p$ ,  $n$ -реакций на мишенях из трития и лития (работы группы В.Н. Кононова, см., например, [2]). Нельзя не отметить и несомненное влияние работ Лос-Аламосской группы Дивена, опубликованных в конце 1940-х — начале 1950-х годов [3].

В этих условиях предложение Д.И. Блохинцева оказалось очень своевременным. Значение деятельности Блохинцева по осуществлению импульсных (пульсирующих) реакторов трудно переоценить. Нет сомнений, что без его интересов и влияния подобные системы никогда не были бы созданы. Долгие годы мы считали, что и идея подобного реактора принадлежит Дмитрию Ивановичу. Однако 3–4 года тому назад в ОИЯИ (Дубна) появился, но вскоре непонятным образом бесследно исчез отчет конца 1940-х — начала 1950-х годов Давида Локхарда Джадда (David Lockhart Judd) из Лос-Аламосской лаборатории (корректную ссылку сделать затруднительно). В отчете рассматривалась аналогичная схема периодически-импульсного реактора с частью активной зоны, закрепленной на периферии вращающегося диска. Однако в теории были сделаны неадекватные допущения, что, видимо, и привело к тому, что работа не была опубликована, как не было и попыток осуществления установки, хотя главное, по моему мнению, не нашлось практических интересов к ее созданию и были опасения в ее безопасности. Только после нескольких лет успешной работы ИБР-1 в ОИЯИ (Дубна) были сделаны проектно-конструкторские проработки мощных пульсирующих реакторов для Еврата («Сора» средней мощностью  $\sim 1$  МВт с ртутным охлаждением) и Брукхейвенской лаборатории (США) средней мощностью 22 МВт с натриевым охлаждением. Но осуществлены они не были.

По инициативе Д.И. Блохинцева, которому в те годы было поручено создание уникального международного научного центра в Дубне — Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) [4], в чем он весьма преуспел, в составе Института была сформирована Лаборатория нейтронной физики (ЛНФ). В качестве основной установки ЛНФ предполагалось использовать пульсирующий реактор ИБР-1. Директором Лаборатории был назначен И.М. Франк. Научное руководство

созданием и пуском в эксплуатацию реактора ИБР-1 в ЛНФ ОИЯИ было поручено моей группе.

После проведения широкого круга экспериментальных исследований стендов и прототипов ИБРа, ибо аналогов подобного реактора тогда не было, как нет и до сих пор, 23 июня 1960 года ИБР-1 был успешнопущен и выведен на проектную среднюю мощность 1 кВт [5]. Хочу кратко остановиться на его дальнейшей судьбе. В ходе развития экспериментальной базы ОИЯИ, по инициативе фактического научного руководителя ЛНФ Федора Львовича Шапиро, были проведены работы по повышению мощности установки и, соответственно, повышению интенсивности нейтронных пучков при сохранении ее конструктивной схемы. Был лишь заменен 2-й, балансирующий вкладыш из природного урана в основном вращающемся диске на второй активный из сплава урана 235, заменены плутониевые стержни неподвижной активной зоны на более тонкие, что позволило при сохранении воздушного охлаждения повысить среднюю мощность более чем в 20 раз — получился ИБР-30, к сожалению, преждевременно выведенный из эксплуатации в наши тяжелые для российской науки времена...

В качестве следующего этапа развития экспериментальной базы ЛНФ Д.И. Блохинцев предложил создать пульсирующий реактор мегаваттной средней мощности, использовав в качестве его прототипа обнинский исследовательский быстрый реактор БР-5 мощностью 5 МВт с топливом из окиси плутония и натриевым охлаждением. Это предложение не было случайным. Дело в том, что создание реактора БР-5 в ФЭИ (Обнинск) было следствием исключительно удачного предложения ДИ (как мы называли между собой Д.И. Блохинцева) после выхода из строя реактора БР-2 с ртутным охлаждением из-за радиационно-стимулированной коррозии стальных оболочек плутониевых топливных элементов. Я думаю, инициатива Д.И. Блохинцева в создании БР-5 была выдающимся делом его жизни, что он сознавал. Отсюда и его предложение использовать БР-5 в качестве прототипа нового поколения пульсирующих реакторов, хотя были и другие, более дешевые варианты...

Физический "сухой" пуск БР-5 и пуск его с натрием был проведен в Обнинске моей группой летом 1958 г. (заметьте, на месте демонтированного весной 1956 г. реактора БР-2. Оборудование было разработано и изготовлено тем же ЦНИИ-58. Фантастические по нынешним временам сроки!). Роль главного инженера установки Д.С. Пинхасика в монтаже и вводе в эксплуатацию БР-5 трудно переоценить. "Города сдаают солдаты, генералы их берут" (А.Т. Твардовский). Исследовательский быстрый реактор БР-5 более десяти лет был лучшей установкой подобного типа в мировой практике. Его применение внесло существенный вклад в развитие атомной энергетики на основе быстрых реакторов в России.

Превращение стационарного прототипа в пульсирующий реактор ИБР-2 со средней мощностью  $\sim 2$  МВт было осуществлено практически уже без нашего участия — основной вклад в разработку физико-технических деталей конструкции установки (модулятор реактивности — подвижный отражатель, электромагнитные насосы для циркуляции натрия) был внесен Е.П. Шабалиным и главным инженером ЛНФ В.Н. Ананьевым.

Ныне ИБР-2 — основная экспериментальная база Лаборатории нейтронной физики.

Повышенное внимание к вышеупомянутому новосибирскому протонному синхротрону на 500 МэВ было связано с тем, что в процессе пуска и исследований ИБР-1 выяснилось, что по ряду причин, длительность импульсов нейтронов не  $\sim 13$  мкс, как мы оценивали в [1], а значительно больше, более 36 мкс. Для работ по нейтронной ядерной физике, для чего первоначально и предназначался ИБР-1, длительность первичного импульса нейтронов весьма критична, "качество установки", по формуле И.И. Бондаренко, пропорционально  $I/\Theta^2$ , где  $I$  — средняя интенсивность нейтронов,  $\Theta$  — длительность их импульсов. В дальнейшем, по инициативе Ф.Л. Шапиро, на ИБРах были широко развиты работы по физике конденсированных сред, для которых длительность импульса не столь критична, но в начале 1960-х годов нас, в основном, интересовали работы по нейтронной ядерной физике. Быстроциклический же протонный синхротрон обеспечивал при однооборотном выводе протонов на урановую мишень длительность импульсов  $\sim 10$  нс при частоте их повторения  $\sim 10$  Гц, что было весьма заманчивым для широкого круга нейтронно-ядерных исследований.

При поддержке Г.И. Будкера и А.И. Лейпунского были начаты работы по созданию в ФЭИ (Обнинск) импульсного источника нейтронов ИНИ-500 на основе протонного синхротрона. К сожалению, по финансовым и субъективным причинам дело закончилось лишь разработкой в 1964 г. подробного технико-экономического обоснования на уровне технического проекта и строительными изысканиями первого цикла. Впоследствии, по аналогичной схеме были созданы импульсные источники нейтронов на основе быстроциклических протонных синхротронов в Аргоннской лаборатории (США) — серия IPNS, в Лаборатории KEK (Япония) — KENS и в Резерфордовской лаборатории (Англия) — ISIS, однако начало было положено в России проектом ИНИ-500.

Итог многолетней дискуссии о перспективах стационарных и импульсных источников нейтронов был в конце концов подведен практикой. В настоящее время лучшим стационарным исследовательским реактором для физических исследований является высокопоточный реактор Института Лаузэ–Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция). Ключевой особенностью его является то, что каналы, формирующие выведенные за радиационную защиту нейтронные пучки, "смотрят" не на активную зону, а на "всплеск" плотности потока тепловых нейтронов в слабопоглощающем нейтроны отражателе ("касательные" каналы). Это в десятки раз снижает примесь быстрых нейтронов и  $\gamma$ -лучей в нейтронных пучках, существенно улучшая условия экспериментов. Реактор подобной схемы, но меньшей мощности начал работать в Мюнхенском техническом университете (Гархинг под Мюнхеном, Германия), более мощный, с проектной мощностью  $\sim 100$  МВт сооружается в Петербургском институте ядерной физики (Гатчина). Надо сказать, что с эффектом всплеска плотности потока тепловых нейтронов в протяженном слабопоглощающем отражателе активной зоны с жестким спектром нейтронов впервые столкнулись в начале 1950-х годов в России, в ФЭИ (Обнинск). Тогда у нас не было методов расчета, позволявших предсказать этот эффект и он трагически проявился при пуске стенда реактора энергетической

установки подводной лодки. "Неконтролируемый разгон" реактора с промежуточным спектром нейтронов и толстым графитовым отражателем из-за неожиданно высокого влияния на реактивность крайних топливных стержней привел к разрушению активной зоны и к гибели А.В. Малышева, загружавшего топливо... [5].

Наиболее эффективный импульсный источник нейтронов сегодня — установка ISIS Резерфордовской лаборатории (Англия) на основе быстроциклического (50 Гц) протонного синхротрона на 800 МэВ. Но это не надолго...

В настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные импульсные источники нейтронов на основе сильноточных ускорителей протонов и ионов  $H^-$  на ГэВ-ные энергии. В Ок-Риджской лаборатории (ORNL, США) сооружается интенсивный импульсный источник нейтронов SNS [6] на основе линейного ускорителя ионов  $H^-$  на энергию  $\sim 1$  ГэВ и накопителя-группирователя для сокращения длительности импульсов. Надо сказать, что эта установка создается в соответствии с патентом США [7], полученным в 1975 году нашей группой. К сожалению, не удалось обнаружить ни одной Ок-Риджской ссылки на этот патент и на соответствующие публикации 1970-х годов. В соответствии с патентом создавался и импульсный источник нейтронов в Институте ядерных исследований (ИЯИ) РАН в подмосковном Троицке на основе сильноточного ускорителя протонов и  $H^-$  "мезонной фабрики" с энергией до 0,6 ГэВ и накопителя-группирователя как составная часть "троицкой троицы", включавшей также сверхсветосильный спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце и радиационный комплекс на основе ловушки пучка протонов [8, 9] (рис. 1). К сожалению, создание нейтронно-радиационного комплекса ИЯИ РАН "застряло" на промежуточной стадии из-за непродуманной технической политики... Наиболее мощный импульсный источник нейтронов и, я думаю, наиболее перспективный с точки зрения эффективности его будущего использования создается как совокупность линейного ускорителя  $H^-$  на энергию  $\sim 1$  ГэВ (инжектор) и протонного синхротрона на энергию  $\sim 3$  ГэВ (кооперация Организации для исследований на ускорителях высоких энергий (KEK, Цукуба, Япония) и Института для исследований по атомной энергии (JAERI, Токай, Япония) [10].

В настоящей работе рассматривается другой крайний случай применения протонных синхротронов для нейтронной физики — синхротронов на сверхвысокие энергии как основы сверхинтенсивных редкоимпульсных источников нейтронов (порядка одного импульса за 10 ч). Это направление также было впервые предложено в России в конце 1970-х годов [11]. В апреле 2006 г. в ОИЯИ (Дубна) было проведено Международное рабочее совещание, посвященное проблемам создания подобного источника и возможным его применением в различных областях физики. Представленные доклады частично опубликованы в сборнике трудов Совещания, выпущенном в ОИЯИ [12].

Создание ускорительно-накопительного комплекса "Большой адронный коллайдер" в ЦЕРНе (LHC CERN, рис. 2, [13]) открывает неожиданные возможности для физических исследований в сверхплотных импульсных потоках медленных нейтронов (тепловых, холодных и ультрахолодных). Здесь рассматриваются исследования с тепловыми нейтронами. Возможные эксперименты с

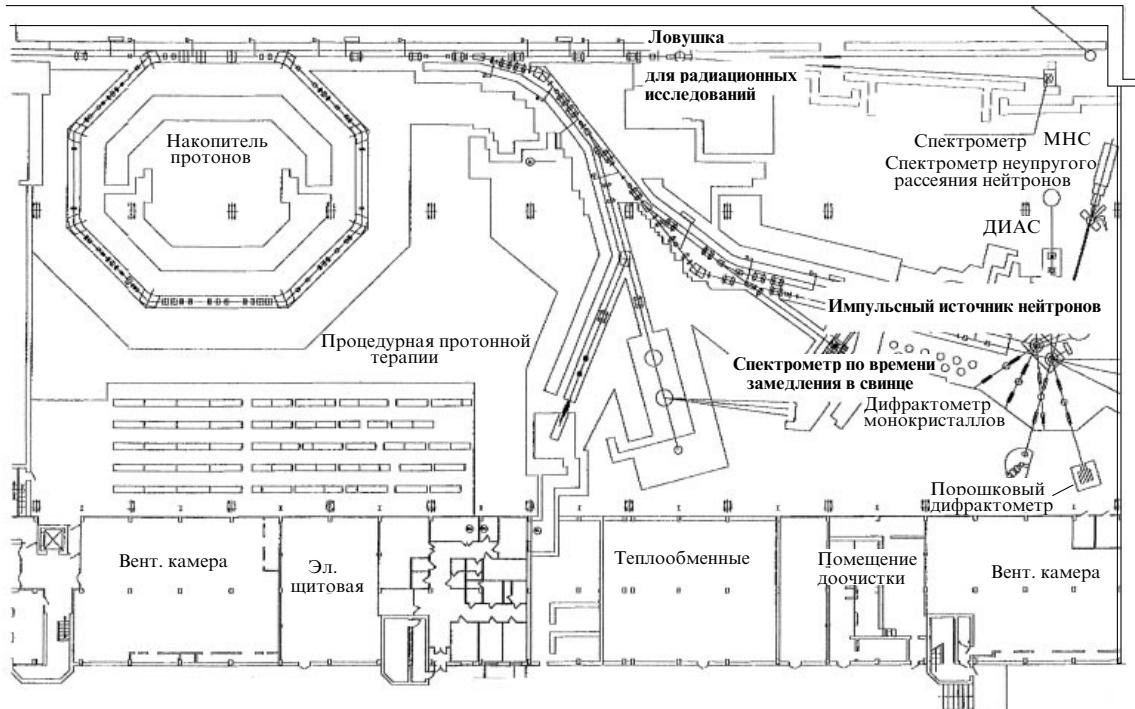
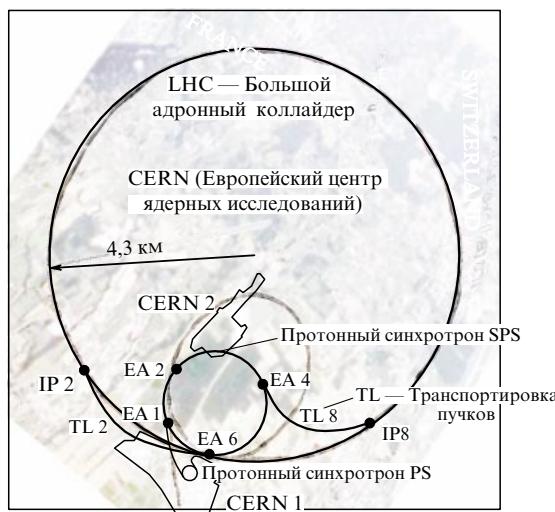


Рис. 1. Нейтронно-радиационный комплекс мезонной фабрики.



Полная энергия	$E = 7,0 \text{ ТэВ}$
Поле в диполях	$B = 8,4 \text{ Тл}$
Светимость	$L = 10^{35} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$
Энергия инжекции	$E_i = 450 \text{ ГэВ}$
Циркулирующий ток	$I_{\text{beam}} = 0,53 \text{ А}$
Число бандней	$k_b = 2835$
Число частиц в бандче	$N_b = 1,05 \times 10^{11}$
Накопленная энергия в пучке	334 МДж
Время жизни пучка	22 ч
Время жизни светимости	10 ч

Рис. 2. Схема Большого адронного коллайдера (LHC CERN).

холодными и ультрахолодными — в стадии обсуждений и оценок.

Одним из "чудес природы" оказалась сравнимость времен обращения протонов в больших кольцевых

ускорителях на ТэВ-ные энергии ( $\sim 70-80$  мкс) и времени жизни тепловых нейтронов в водородсодержащих замедлителях ограниченного объема (вода, гидрид циркония) —  $\sim 100$  мкс. Это и есть основа генерации сравнительно коротких импульсов тепловых нейтронов с гигантской пиковой плотностью потока, вплоть до  $\sim 10^{20}$  нейтр.  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [11].

В свое время Р.Р. Вильсон [14] предложил использовать ускорители протонов на высокие энергии (сотни ГэВ) для так называемого "электроядерного бридинга" (ЭЯБ — получение энергии и делящихся материалов с помощью ускоренных протонов или ядер). Это предложение оказалось ошибочным, так как наиболее эффективная область энергий протонов для рождения нейтронов в тяжелых мишениях за счет каскадно-испарительного процесса (spallation) лежит в окрестности 1,2 ГэВ [15]. С ростом энергии протонов  $E$  прямые их ионизационные потери в веществе падают (примерно, как  $1/E$ ) и все большая доля их энергии идет на возбуждение ядер, которое, в конечном счете, приводит к испарению нейтронов — к основному процессу для такого бридинга. Однако в области энергий 400–500 МэВ начинается интенсивное рождение  $\pi^0$ -мезонов, распад которых дает начало электронно-фотонным ливням. Они ведут к "вторичным" ионизационным потерям энергии протонов. Конкуренция первичных и вторичных ионизационных потерь приводит к появлению широкого максимума в *удельном* выходе нейтронов из протяженных тяжелых мишеней, облучаемых протонами (удельный выход — число испускаемых нейтронов на протон и единицу его энергии) [15, 16] (рис. 3).

Удельный выход нейтронов в этом максимуме для тяжелых протяженных мишеней (свинец, вольфрам) составляет  $\sim 24$  нейтр./протон ГэВ и к энергии  $\sim 7$  ТэВ спадает до  $\sim 2,5$  нейтр./протон ГэВ. Тем не менее большее число протонов, накапливаемое в кольцах уско-

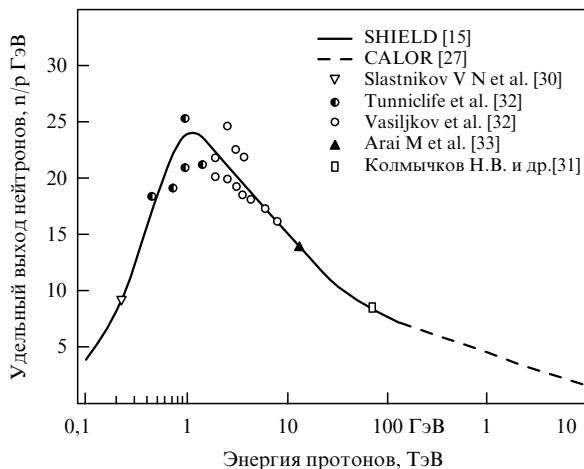


Рис. 3.

рительного комплекса (проектное значение для LHC (CERN)  $\sim 3 \times 10^{14}$  протонов), и высокая их энергия обеспечивают генерацию гигантских импульсов нейтронов при однооборотном выводе накопленных протонов в тяжелую мишень [11]. Полный выход для протяженной вольфрамовой мишени ожидается  $\sim 2 \times 10^4$  нейтр./протон. Основное ограничение — нагрев мишени за импульс.

## 2. Гигантские импульсы нейтронов в ловушках LHC

Ускорительно-накопительный комплекс Большого адронного коллайдера (LHC) — совокупность двух накопительных колец длиною  $\sim 27$  км каждое, в которых создаются встречные циркулирующие пучки протонов или других заряженных частиц (ядер) и системы ускорителей-инжекторов. Кольца имеют пересечения, обеспечивающие проведение экспериментов на встречных пучках протонов с энергией до 7 ТэВ. Начальный диаметр пучка протонов в точках пересечения — около 15 мкм. Со временем рассеяние протонов на протонах, накопление ошибок в поворотных магнитах и фокусирующих линзах приводит к "распуханию" пучка и потере светимости, которая обратно пропорциональна четвертой степени диаметра пучка... Время жизни светимости около 10 часов. Поэтому каждые 10 часов всю накопленную интенсивность протонов предполагается сбрасывать путем однооборотного вывода в ловушку и процесс ускорения и накопления начинать сызнова. Ловушка представляет собой графитовый цилиндр диаметром  $\sim 1$  м и длиной около 15 м, окруженный радиационной защитой (рис. 4). Если в начальной части графитовой ловушки (в 10–20 см от ее фронтальной поверхности) разместить тяжелую мишень толщиной в 2–3 длины ядерного пробега протонов (для вольфрама это около 60 см), большинство протонов испытает ядерные взаимодействия, которые завершаются испарением нейтронов возбужденными ядрами. Как уже отмечалось, имеет место и конкурирующий процесс — рождение  $\pi^0$ -мезонов генерирует электронно-фотонные ливни, взаимодействие которых с веществом рождает примерно на два порядка меньше нейтронов, чем взаимодействие адронов с ядрами. Именно передача энергии протонов ливням и снижает удельный выход нейтронов.

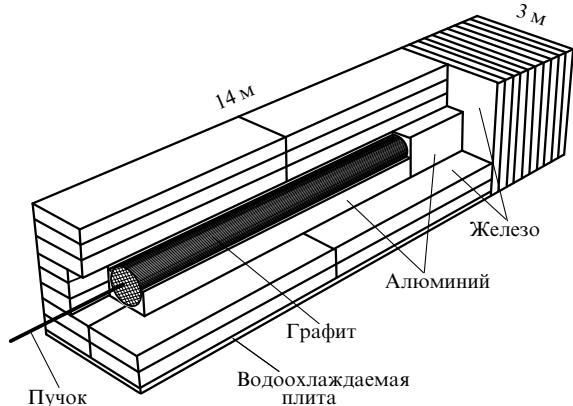


Рис. 4. Ловушка пучка.

Таким образом, тяжелая мишень в графитовой ловушке явится интенсивным импульсным источником нейтронов с каскадно-испарительным энергетическим спектром. Около 90 % нейтронов будут иметь среднюю энергию 2–3 МэВ и угловое распределение, близкое к изотропному. Остальные, каскадные, будут иметь угловое распределение сильно вытянутое вперед и энергии вплоть до первичной энергии протонов (7 ТэВ). Длительность импульса нейтронов составит примерно 70 мкс — время обращения протонов в кольце.

Такой источник нейтронов будет иметь значительные преимущества перед импульсными ядерными реакторами однократного действия с температурным самогашением, имеющими близкий интегральный выход нейтронов, но более длинный импульс, значительный выход запаздывающих нейтронов и существенные ограничения в постановке экспериментов, особенно в случае необходимости "влезать" внутрь активной зоны реактора. Рассматриваемый источник нейтронов позволит использовать практически всю интенсивность суперускорителя для нейтронных экспериментов, не мешая другим программам, т.е. существенно расширит экспериментальные возможности ускорительного комплекса. Легко видеть, что комплекс должен иметь две независимые ловушки, что расширит экспериментальные возможности еще, по крайней мере, вдвое.

Для определения выхода нейтронов при облучении тяжелых протяженных мишеней протонами сверхвысокой энергии нашей группой (ИЯИ РАН [15, 16]), и, независимо, группой В.Ф. Колесова (ВНИИЭФ, г. Саров [17]) был проведен цикл расчетов методом Монте-Карло.

В настоящее время используется ряд компьютерных программ для расчетов взаимодействия энергичных протонов с веществом.

Широко распространены: современная версия HETC (High Energy Transport Code, [18]); LAHET — Лос-Аламосской лаборатории; HERMES — исследовательского центра Юлих, Германия; NMTC — JAERI, Япония и др. Эти программы используют модель межъядерного каскада Бертини (H.W. Bertini, [19]), детально описывающую в эксклюзивном подходе все стадии ядерных реакций в протяженной мишени. Они применимы при энергиях протонов до 10–20 ГэВ.

Русским аналогом HETC является программа SHIELD. Современный вариант SHIELD [20–22] позво-

ляет моделировать рождение и перенос нуклонов, пионов, каонов, антинуклонов, мюонов и ядер с произвольными ( $A, Z$ ) в протяженных сложных мишенях при энергиях протонов до  $\sim 100$  ГэВ.

Следующий независимый адронный транспортный код — FLUKA (первая версия — 1974 год, [23]). Используется инклузивный подход в моделировании ядерных взаимодействий. В его современной версии [24, 25] при высоких энергиях применена двухпартонная модель (DPMJET, J. Ranft), а при энергиях в окрестности 1 ГэВ — оригинальная версия каскадно-испарительной модели. Программа позволяет моделировать адронные каскады в веществе при энергиях до 20 ТэВ.

Применяются также комбинации программ, позволяющие решать широкий круг задач. В частности, программа CALOR [26, 27], включающая НЕТС, MORSE, EGS4 и мультифрагментационную модель адрон-ядерных взаимодействий [28]. Эта программа также позволяет проводить расчеты до энергий протонов  $\sim 20$  ТэВ.

Широко используется также инклузивная программа переноса MARS [29], первая версия которой была развита Н.В. Моховым (1975, ИФВЭ, Протвино).

К настоящему времени проведено немало экспериментов по определению выхода нейтронов из протяженных тяжелых мишеней в диапазоне энергий протонов от 0,25 до 70 ГэВ. Обе эти крайние точки получены нашими экспериментальными группами (ИЯИ РАН), при 0,25 ГэВ [30] — на медицинском канале протонного синхротрона ИТЭФ и при 70 ГэВ [31] — на серпуховском ускорителе. Результаты ранних экспериментов в окрестности  $\sim 1$  ГэВ наиболее полно представлены в работе [32]. В последние годы были получены данные при энергии протонов 12 ГэВ [33].

Все эти результаты неплохо согласуются с нашими расчетами выхода нейтронов для энергий протонов в диапазоне 0,2–10 ТэВ. Это открывает возможность выбора наиболее эффективной энергии протонов для конкретных задач. Так, для электроядерного бридинга оптимальна энергия протонов  $\sim 1,2$  ГэВ. Однако с точки зрения работоспособности ускорителя более эффективной может оказаться компромиссная энергия  $\sim 10$  ГэВ — большее время жизни ионного источника при сравнительно малых токах и меньшие, в расчете на произведененный нейtron, радиационные повреждения первой стенки мишени [34].

Расчеты Дементьевых и др. [16] проводились для мишени из свинца природного изотопного состава в виде цилиндра диаметром 20 см и длиной 60 см. Тонкий пучок протонов падал в центр мишени, вдоль ее оси. В ТэВ-ной области использовались программы FLUKA и CALOR, в низкой — оригинальная программа LOENT с 26-групповой системой нейтронных данных И.И. Бондаренко и др. [35], электронно-фотонные ливни моделировались программой EGS4, связанной с SHIELD специальным интерфейсом. На рисунке 5 можно видеть выход нейтронов с энергиями ниже 10,5 МэВ в зависимости от энергии протонов в диапазоне 0,1–10 ТэВ. На рисунке 6 приведено распределение источников нейтронов по длине вольфрамовой мишени.

Наблюдается значительное расхождение результатов расчетов, проведенных по FLUKA и CALOR (фактор около 1,6 при 6 ТэВ). С нашими экспериментальными результатами при 70 ГэВ [31] лучше согла-

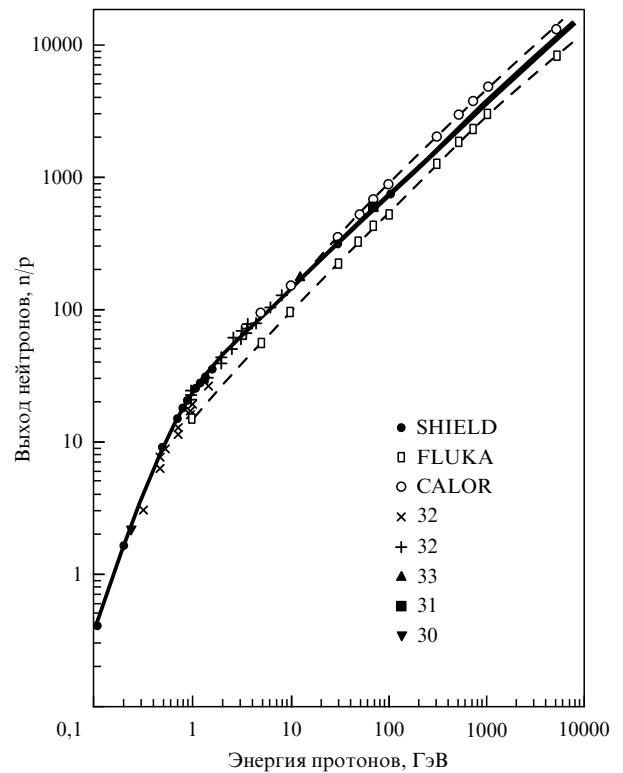


Рис. 5.

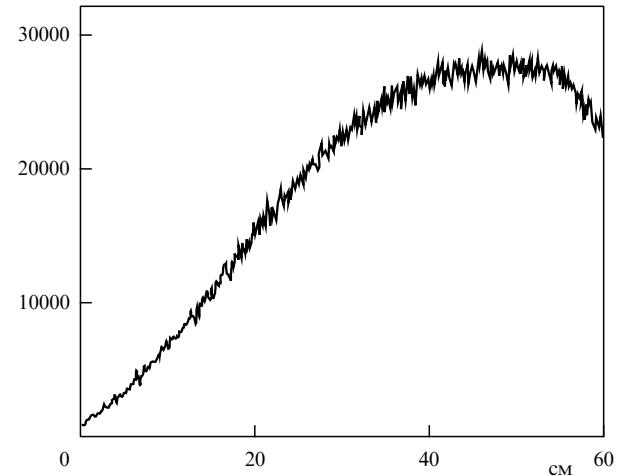
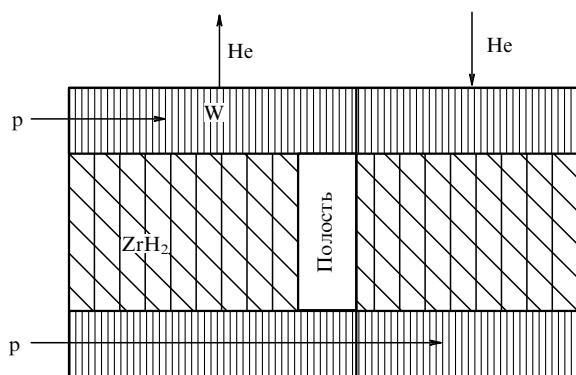
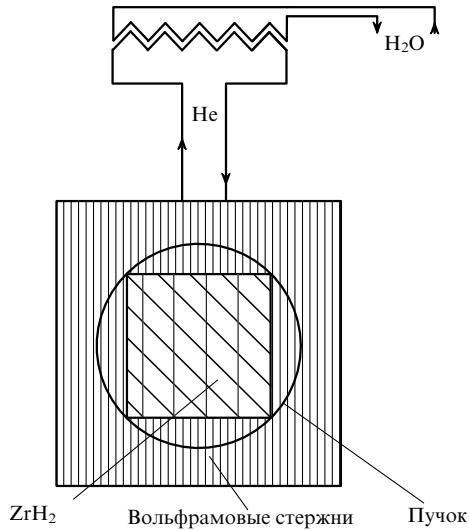


Рис. 6. Распределение источников нейтронов вдоль длины вольфрамовой мишени.

сие дают расчеты по программе CALOR, но энергия 70 ГэВ слишком далека от интересующей нас области. Поэтому очень интересно получить хотя бы одно значение для ТэВ-ных энергий. Это можно было бы сделать при энергии 0,9 ТэВ на тзватроне Национальной лаборатории США им. Э. Ферми (FNAL, США).

В соответствии с имеющейся информацией [13], циркулирующие пучки LHC сбрасываются горизонтально в септум-магниты, которые отклоняют их вертикально на ловушки, расположенные в отдаленной зоне ( $\sim 750$  м).

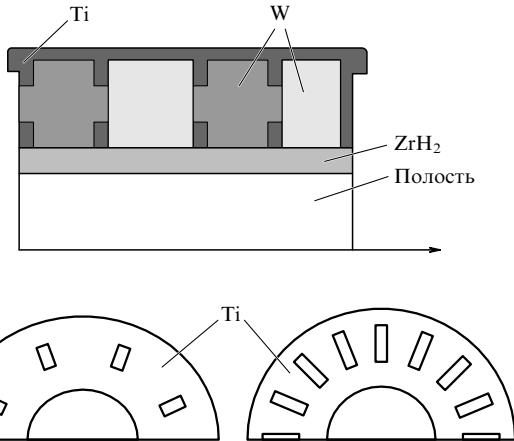
Согласно [13], для снижения тепловой нагрузки пучок "размазывается" по лицевой поверхности графита двумя



**Рис. 7.** Возможная схема "кольцевой" мишени из вольфрамовых стержней с внутренним замедлителем из гидрида циркония. Гелиевое охлаждение.

ортогональными магнитами, питаемыми синусоидальным напряжением (14 кГц, 15 кВ).

Легко видеть, что синхронизация обоих магнитов позволила бы получить кольцевой пучок внутри графита, "раздутый" за счет многократного рассеяния. Если ввести в этот пучок кольцевую вольфрамовую мишень с внутренним водородсодержащим замедлителем, можно получить кольцевой источник каскадно-испарительных нейтронов с импульсным потоком тепловых нейтронов в полости замедлителя плотностью  $\sim 2 \times 10^{19}$  нейтр.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  и длительностью  $\sim 100$  мкс. При использовании уплощенной мишени с боковым замедлителем — импульсы тепловых нейтронов плотностью  $\sim 3 \times 10^{19}$  нейтр.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$  и длительностью около 100 мкс для экспериментов вне мишени [37]. Этому соответствует максимальный подогрев вольфрама (с учетом неоднородности энерговыделения) примерно 1500 К за импульс при использовании  $\sim 30\%$  интенсивности протонного пучка. Как показал анализ, проведенный В.Л. Ломидзе [38], это является допустимым с точки зрения термомеханики мишени-ловушки. Возможная схема стержневого варианта вольфрамовой мишени с внутренним замедлителем из гидрида циркония приведена на рис. 7.



**Рис. 8.** Возможная схема мишени из монолитных вольфрамовых элементов с дистанционирующими вставками из титана.

В концепции В.Ф. Колесова (ВНИИЭФ) рассматривается мишень из монолитных вольфрамовых элементов, дистанционированных вставками из титана (рис. 8). Расчеты потоков и термомеханических напряжений проведены независимо от наших с использованием программ GEANT-3 (CERN) и С-95 (ВНИИЭФ). Такая мишень позволяет использовать всю интенсивность, сбрасываемую из кольца, при этом пиковая плотность потока тепловых нейтронов в полости замедлителя из гидрида циркония достигает  $\sim 6 \times 10^{19}$  нейтр.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , а на поверхности, светящей в нейтронный канал,  $\sim 10^{20}$ .

Как можно видеть из приведенных примеров, основные режимы и агрегаты, предусмотренные концептуальным проектом LHC, обеспечивают возможность генерации мощных импульсов тепловых нейтронов. Дополнительно должна быть создана мишень с системой замедлителей и экспериментальных каналов. Тем самым экспериментальные возможности комплекса LHC могли бы быть существенно расширены.

### 3. Возможное применение ловушки LHC в нейтронных исследованиях

Импульсный источник нейтронов на основе ловушек LHC открывает интересные возможности для исследований в области нейтронной ядерной физики, нейтронной физики конденсированных сред и нейтринной физики. Наряду с экспериментами в классической постановке было бы полезно использовать гигантские импульсы тепловых нейтронов для изучения процессов в сверхплотных лазерных световых полях, в сверхсильных импульсных магнитных полях и при других экстремальных состояниях вещества и энергии, доступных только в "редкоимпульсном" виде, а также для изучения редких процессов, например прямого рассеяния лазерного света на магнитном моменте свободного нейтрона или на его поляризации, экспериментальное изучение рассеяния света на связанных в кристалле нейтронах и предсказанного в [36] усиления этого эффекта вблизи фононных резонансов.

Имеет смысл рассмотреть две мишени, которые можно было бы "прицепить" к двум ловушкам — одну для генерации плотных импульсных потоков внутри замедлителя ("нейтронного газа") и вторую — для

генерации потоков тепловых нейтронов, светящих во внешний нейтронный канал. Как уже упоминалось, проведенные расчетные оценки показали [17], что полуширина импульса тепловых нейтронов в полости водородсодержащего замедлителя и на его поверхности "светящей" в нейтронный канал составит примерно 100 мкс при пиковой плотности потока тепловых нейтронов  $\sim 6 \times 10^{19}$  и  $10^{20}$  нейтр. см $^{-2}$  с $^{-1}$  соответственно (в последнем случае — при использовании бериллиевого отражателя).

К настоящему времени проведены достаточно подробные расчеты лишь одного эксперимента, имеющего фундаментальное значение, — прямого измерения длины рассеяния нейтрона на нейтроне в вакууме (в "нейтронном газе") [39]. В ловушке LHC открывается, по-видимому, единственная возможность проведения такого эксперимента с необходимой точностью. Другие упомянутые возможные направления исследований — скорее информация к размышлению...

### 3.1. Эксперименты в "нейтронном газе"

**3.1.1. Прямое измерение длины рассеяния нейтрона на нейтроне.** Здесь появляется (и, по-видимому, впервые) возможность прямого измерения сечения рассеяния нейтрона на нейтроне. В соответствии с гипотезой зарядовой независимости ядерных сил взаимодействие двух нуклонов в одном квантовом состоянии не должно зависеть от их заряда. В частности, при низких энергиях длина рассеяния  $n-p$  должна быть равна длине  $n-n$  (изоспин  $T = 1$ , спин  $S = 0$ ). В экспериментах по измерению длины  $n-p$ -рассеяния получена точность  $\sim 0,5\%$ .

Для  $n-p$ -рассеяния известно свыше 50 оценок, основанных на изучении влияния взаимодействия двух свободных нейтронов на энергетический спектр  $C$ -частиц в реакции  $A + B = C + 2n$ . Длины рассеяния по таким оценкам лежат в диапазоне  $-11,2 > a_{nn} > -25$  фм. Длина рассеяния из усреднения этих данных  $a_{nn} = -16,70 \pm 0,38$  фм [40] в сравнении с  $a_{np} = -23,56 \pm 0,56$  фм. Расхождение довольно велико, не говоря уж о том, что при проведении оценок существенную роль играют предположения о механизме реакции. Поэтому при всех успехах современных теорий элементарных взаимодействий значение прямого эксперимента по измерению длины  $n-p$ -рассеяния трудно переоценить...

Прямые эксперименты по измерению длины  $n-p$ -рассеяния предлагались неоднократно. В работе [41] предлагалось использование ядерного взрыва. И.И. Бондаренко и др. предполагали использовать импульсный реактор однократного действия в космическом пространстве [42]. Предлагалось использование мощного пульсирующего реактора ИБР-2 [43], импульсных реакторов однократного действия [8]. Однако детальный анализ показал непроходимость проблемы фонов от мгновенных и запаздывающих нейтронов, да и ожидаемые эффекты малы...

Расчеты С.А. Новоселова и др. с использованием расчетной программы В.Н. Мирошниченко (NeuMC) для мишени-ловушки LHC из вольфрама, снабженной внутренним гидрид-циркониевым замедлителем с полостью, показали [39], что ток нейтронов через детектор диаметром 2,2 см, обусловленный рассеянием нейтронов на нейтронах в вакуумной полости замедлителя составит  $\sim 10^5$  нейтронов за один гигантский импульс, а для

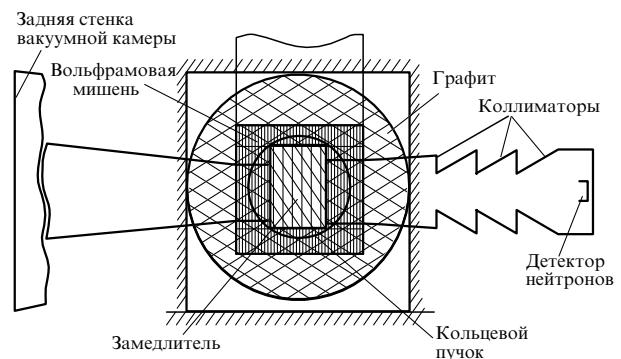


Рис. 9. Возможная схема эксперимента по измерению длины рассеяния в мишени-ловушке Большого адронного коллайдера (LHC).

колесовской концепции мишени — даже  $\sim 1,6 \times 10^6$ . Это позволило бы получить высокую статистическую точность уже за один импульс. Еще 5–10 импульсов позволили бы внести необходимые поправки (рассеяние нейтронов на ядрах, выбиваемых из стенок вакуумной камеры, на остаточном газе, учесть распределение плотности потока нейтронов в полости, измерить спектр нейтронов с использованием техники по времени проleta и т.п.). Именно большие эффекты и относительно малые фоны вселяют надежды на достижение высокой точности эксперимента порядка 1 %. Возможная схема эксперимента (рис. 9) включает кольцевую вольфрамовую мишень с внутренним замедлителем из гидрида циркония. Вакуумная камера располагается в полости замедлителя, задняя стенка ее удалена от мишени на  $\sim 25$  м, а детектор удален на  $\sim 12$  м. Система снабжена коллиматорами и диафрагмами, так что детектор "не видит" замедлитель и стенки вакуумной камеры.

Предполагается использовать три железоводных коллиматора на расстоянии 2, 4 и 6 м от мишени со средней толщиной 100, 150 и 180 см соответственно, со слоями  $B_4C$  и кадмииевым покрытием.

После начала нейтронного импульса детектор предполагается запирать на  $\sim 3$  мс. В этом случае не будут регистрироваться нейтроны с энергией  $> 0,84$  эВ от замедлителя и нейтроны с энергией  $> 2,2$  эВ от задней стенки вакуумной камеры. При этом зарегистрируется около 70 % нейтронов, рассеянных в нейтронном газе. Фон тепловых нейтронов, рассеянных на гранях коллиматоров и от стенок вакуумной камеры, составит  $\sim 1$  % от эффекта, фон от рассеяния на остаточном газе при его давлении  $\sim 10^{-7}$  торр — около 6 %. Фон запаздывающих быстрых нейтронов пренебрежимо мал. Фон космических нейтронов значительно меньше процента.

**3.1.2. Мультинейтронные ядерные реакции.** Высокая импульсная плотность тепловых нейтронов и большие сечения радиационного их захвата, не редкие в тепловой области энергий, открывают пути исследований мультинейтронных реакций, когда ядро захватывает перед  $\beta$ -распадом, по крайней мере, два нейтрона. До сих пор такие реакции наблюдались только при ядерных взрывах и то в области надтепловых нейтронов или усредненных сечений. В частности, появляется возможность синтеза нейтронно-избыточных трансуранов при мультинейтронном захвате в тяжелых мишенях ( $Cm$ ,  $Cf$ ,  $Md$  и пр.).

В соответствии с ростом времени жизни с увеличением числа нейтронов в ядре перегруженные нейтронами изотопы могут быть сравнительно долгоживущими. Это откроет возможности детального изучения их свойств.

**3.1.3. Исследования взаимодействия нейтронов с радиоактивными ядрами.** Открывается возможность изучения взаимодействия нейтронов с радиоактивными ядрами, изомерами, в частности и с образующимися при захвате нейтронов во время импульса.

### 3.2. Пучковые эксперименты

Гигантские импульсы тепловых нейтронов на поверхности плоского водородсодержащего замедлителя, "смотрящего" в нейтронный канал, позволяют проводить исследования свойств конденсированных сред в экстремальных условиях, которые можно осуществить только в импульсном режиме — в сверхсильных магнитных полях, при сверхвысоких давлениях, при взаимодействии мощных лазерных потоков излучения с веществом и т.п.

В качестве примера можно сравнить светосилу экспериментов по нейтронным исследованиям магнитных свойств вещества на различных импульсных источниках нейтронов — мощном пульсирующем реакторе ЛНФ ОИЯИ ИБР-2 (частота импульсов  $5 \text{ с}^{-1}$ ), импульсном реакторе однократного действия БИГР (ВНИИЭФ, Саров, Россия), в ловушке LHC (CERN) [44]. При сравнении использована схема нейтронного спектрометра с импульсным магнитным полем SNIM-2 для пульсирующего реактора ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Высокая частота повторения импульсов нейтронов ( $5 \text{ имп. с}^{-1}$ ) исключает применимость импульсных магнитных полей высокой напряженности (только до  $\sim 250 \text{ кЭ}$ ) в случае магнитов производства NHMFL — National High Magnetic Field Laboratory (Tallahassee, USA). В случае редкоимпульсных источников (БИГР, ловушка LHC) возможно применение импульсных магнитов с пиковым полем до  $600 - 1000 \text{ кЭ}$ , в последнем случае — с разрушением магнита (см. таблицу).

Таблица.

	SNIM-2 (ИБР-2)	БИГР	LHC
Пиковая плотность потока, нейтр. $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$7 \times 10^{15}$	$2,5 \times 10^{17}$	$10^{20}$
Длительность импульса, мкс	300	2000	100
Частота повторения	$5 \text{ имп. с}^{-1}$	$\text{сут}^{-1}$	$1/10 \text{ ч}$
$P1\Delta\lambda_m$ (3 Å), нейтр. $\text{см}^{-2}$ за импульс	$1,25 \times 10^3$	$4,5 \times 10^4$	$1,5 \times 10^6$

Здесь  $P1\Delta\lambda_m$  — число нейтронов, рассеянных за импульс магнитного поля, если отражательную способность кристалла-образца принять за единицу.

### 3.3. Нейтринные исследования

**3.3.1. Исследования в потоках нейтрино из мишени.** Представляет интерес сопоставление ядерных реакций в потоках реакторных антинейтрино, источником которых являются, по сути, нейтронно-избыточные осколки деления с ядерными реакциями в потоках нейтрино от

распада нейтронно-дефицитных продуктов каскадно-испарительного процесса в тяжелых мишенях-ловушках (проблема майорановских сил).

**3.3.2. Исследования в потоках жестких нейтрино.** Представляет интерес использование гигантских импульсов тепловых нейтронов для генерации потоков жестких нейтрино с использованием, например, литиевого конвертора (см., например, [45]).

## 4. Заключение

Создание в начальной части графитовой ловушки LHC тяжелой мишени с водородсодержащим замедлителем открывает новые возможности для нейтронных исследований в области физики частиц, ядерной физики и физики конденсированных сред, с использование полной интенсивности комплекса и без какой-либо конкуренции с другими программами, рассматриваемыми для LHC.

Не могу не напомнить еще раз (см. первые строчки введения), что еще в конце 1950-х годов Игорь Ильич Бондаренко (ФЭИ, Обнинск) обратил наше внимание на экспериментальные возможности для ядерной физики низких и средних энергий, открывающиеся при создании ускорителей высоких энергий с сильной фокусировкой. По существу, это и инициировало предложение, представленное в настоящей статье.

Автор рад выразить глубокую признательность А.В. и Д.В. Дементьевым, М.В. Казарновскому, А.С. Ильинову, В.Г. Мирошниченко, В.В. Нитцу, С.А. Новоселову, А.Д. Рогову, Н.М. Соболевскому за участие в работе, А.А. Васильеву, В.Ф. Колесову, М.А. Маркову и А.Н. Скринскому за плодотворные дискуссии и поддержку, Р.Р. Вильсону за "первый толчок" в обсуждаемом направлении.

## Список литературы

- Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я. "Импульсный режим работы быстрого реактора" *Атомная энергия* 7 417 (1959)
- Конюхов В.Н., Полетаев Е.Д., Прокопец Ю.С., Метлев А.А., Стависский Ю.Я. "Абсолютные измерения отношений сечений радиационного захвата и деления для  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в диапазоне энергий нейтронов 10 кэВ–1 МэВ" *Атомная энергия* 32 (1) 85 (1972)
- Diven B C, Terrell J, Hemmendinger A *Phys. Rev.* **109** 144 (1958)
- Кадышевский В.Г. УФН **166** 921 (1996)
- Стависский Ю.Я. *Мы из Обнинска: записки нейтронщика* (М.: Энергоатомиздат, 2002)
- Appleton R B "A progress report on the spallation neutron source", in *Proc. of the 14th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XIV<sup>1</sup>, June 14–18, 1999, Utica, Ill., USA* (Argonne National Laboratory Report ANL-98/33, Eds J.M. Carpenter, C.A. Tobin) p. 32
- Vasiliev A.A., Mescherov R.A., Murin B.P., Stavisskii I.Y. "Pulsed neutron source", US Patent 3,860,828, Jan. 14, 1975. Failed Aug. 30, 1972, Priority date 10 May 1972, USSR
- Стависский Ю.Я. "Импульсные источники нейтронов на основе протонных пучков мезонной фабрики", Препринт № 389 (Обнинск: ФЭИ, 1973)

<sup>1</sup> ICANS — International Collaboration on Advanced Neutron Sources. Рабочие совещания ICANS, проводимые каждые 2–3 года уже более 30 лет — одни из наиболее представительных конференций по существующим и перспективным источникам нейтронов и физическим исследованиям на них.

9. Grachev V I, Sidorkin S F, Stavissky Y Y et al., in *Proc. of the 15th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV, 6–9 November 2000, Tsukuba, Japan* (KEK Proc., 2000-22, Eds J Suzuki, S Itoh) (Tokai-mura: Japan Atomic Energy Res. Inst., 2001) p. 71
10. Oyama Y, Ikeda S, in *Proc. of the 15th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV, 6–9 November 2000, Tsukuba, Japan* (KEK Proc., 2000-22, Eds J Suzuki, S Itoh) (Tokai-mura: Japan Atomic Energy Res. Inst., 2001) Rep. 1.1, p. 19
11. Стависский Ю Я "Гигантские импульсы тепловых нейтронов в мишенях ускорителей на сверхвысокие энергии", Препринт Р-0215 (М.: ИЯИ, 1981)
12. Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей, Дубна, 27–29 апреля 2005 г. Труды международного рабочего совещания (Дубна: ОИЯИ, 2005)
13. Pettersson T, Lefevre P (Eds) "The Large Hadron Collider. Conceptual Design", CERN/AC/95-05 (LHC). October 20, 1995 (Geneva: CERN, 1995)
14. Wilson R R, Preprint FN-298 (Batavia, Ill.: Fermi National Accelerator Laboratory, 1976)
15. Dementyev A V, Sobolevsky N M, Stavissky Yu Ya "Neutron yield from extended lead target under incident protons 0.1 to 100 GeV" *Nucl. Instrum. Meth. A* **374** 70 (1996)
16. Dementyevs A V & D V, Sobolevsky N V, Stavissky Y Y "Specific neutron yield from the extended lead target under incident protons 0.1 GeV – 10 TeV", in *Proc. of the 15th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV, 6–9 November 2000, Tsukuba, Japan* (KEK Proc., 2000-22, Eds J Suzuki, S Itoh) (Tokai-mura: Japan Atomic Energy Res. Inst., 2001) Rep. 23.20
17. Колесов В Ф, Ильяев Р И и др. "Расчетные характеристики источника нейтронов на базе коллайдера ЦЕРН", в сб. *Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей, Дубна, 27–29 апреля 2005 г. Труды международного рабочего совещания* (Дубна: ОИЯИ, 2005) с. 48
18. Armstrong T V, Chandler K P *Nucl. Sci. Eng.* **49** 110 (1972)
19. Bertini H W *Phys. Rev.* **188** 1711 (1969)
20. Соболевский Н М "Программы для моделирования нуклон-мезонных каскадов методом Монте-Карло", Препринт В1-5-5458 (Дубна: ОИЯИ, 1970)
21. Dementyev A V, Sobolevsky N M *Radiat. Meas.* **30** 553 (1999)
22. Dementyev A V, Sobolevsky N M, Preprint 874/94 (Moscow: INR, 1994)
23. Ranft J, Routti J T *Comput. Phys. Commun.* **7** 327 (1974)
24. Fassò A, Ferrari A, Ranft J, Sala P R, in *Proc. of the 3rd Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE 3)*, KEK, Tsukuba, Japan, 7–9 May 1997 (KEK Proc., 97-5, Ed. H Hirayama) (Tsukuba: KEK, 1997) p. 32
25. Ferrari A et al. *Nucl. Instrum. Meth. B* **71** 412 (1992)
26. Gabriel T A, in *Proc. of the 4th Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE 4)*, Knoxville, USA, September 14–16, 1998 (Ed. T A Gabriel)
27. Gabriel T A et al., Preprint TM-1160 (Oak-Ridge: ORNL, 1989)
28. Ranft J, Ritter S Z *Phys. C* **27** 569 (1985)
29. Mochov N V et al., in *Proc. of the 4th Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE 4)*, Knoxville, USA, September 14–16, 1998 (Ed. T A Gabriel)
30. Slastnikov V N et al. *Z. Phys. A* **311** 363 (1983)
31. Акопян А Г, Колмыков Н В, Кузин А В *Атомная энергия* **75** 219 (1993)
32. Barashenkov V S *Nucl. Part. Phys.* **9** 781 (1978)
33. Arai M et al. *Neutron Res.* **8** 71 (1999)
34. Stavissky Y Y, Senichev Y V *Proc. of ICANS-XII, Oxford, UK, Oct. 1993*; Report 94-025 (Abingdon: RAL, 1993)
35. Абагян Л П и др. *Групповые константы для расчета ядерных реакторов* (М.: Атомиздат, 1964)
36. Агранович В М, Лалов И Л "Рассеяния лазерных фотонов на нейтронах в кристалле" *ЖЭТФ* **69** 647 (1975)
37. Рогов А Д "Потоки тепловых нейтронов в замедлителях ловушки LHC", в сб. *Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей, Дубна, 27–29 апреля 2005 г. Труды международного рабочего совещания* (Дубна: ОИЯИ, 2005) с. 71
38. Ломидзе В Л "Термомеханика мишени и ловушки LHC" *Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей, Дубна, 27–29 апреля 2005 г. Труды международного рабочего совещания* (Дубна: ОИЯИ, 2005)
39. Dementyev A V, Dementyev D V, Kazarnovsky M V, Miroshnichenko M G, Novoselov S A, Stavissky Y Y "On the possibility of the direct investigation of the neutron–neutron scattering at LHC beam-stop", in *Proc. of the 15th Meeting of the Intern. Collab. on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV, 6–9 November 2000, Tsukuba, Japan* (KEK Proc., 2000-22, Eds J Suzuki, S Itoh) (Tokai-mura: Japan Atomic Energy Res. Inst., 2001) Rep. 21.4; *1997 Gatlinburg Conf.*
40. Gurach H, Ruhn B *Ann. Phys. (Leipzig)* **39** 195 (1982)
41. Moravcsik M J *Phys. Rev.* **136** B624 (1964)
42. Бондаренко И И, Ковалев В П и др. *ЯФ* **2** 839 (1965)
43. Ананьев В Д и др., Препринт 13-4392 (Дубна: ОИЯИ, 1969)
44. Nietz V "Prospects for the use of the pulsed fields in neutron research of condensed matter" *J. Magn. Magn. Mater.* **260** 84 (2003)
45. Лютоостанский Ю С, Ляшук В И "Использование нейтронных потоков высокой плотности для генерации жестких нейтрино", в сб. *Исследования в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей, Дубна, 27–29 апреля 2005 г. Труды международного рабочего совещания* (Дубна: ОИЯИ, 2005)

### Giant pulses of thermal neutrons in large accelerators' beam dumps. Possibilities for experiments

**Yu.Ya. Stavissky**

Joint Institute for Nuclear Research,  
141980 Dubna, Moscow region, Russian Federation  
Tel. +49 (0) 961 6-34-15-05. Fax +49 (961) 6-28 56  
E-mail: stavss@freenet.de

The development in Russia of intense pulsed neutron sources for physical research — the pulsed fast reactors IBR-1, IBR-30, IBR-II (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna), and the neutron- radiation complex Moscow meson factory — ‘Troitsk trinity’ (Institute for Nuclear Research RAS, Troitsk, Moscow region) — is briefly reviewed. The possibility of generating giant slow neutron pulses in beam-dumps of superhigh energy accelerators is discussed. In particular, the possibility for generation of giant thermal neutron pulsed fluxes by modifying beam-dumps of large hadron collider LHC (CERN) is considered. It is shown that the one-turn extraction of 7-TeV protons stored in the LHC main ring on heavy target with water or zirconium-hydride moderator placed in the front part of the LHC graphite beam-dump block gives every 10 hours a relatively short (about 100  $\mu$ s) thermal neutron pulse with a peak flux density of up to  $\sim 10^{20}$  neutr.  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Possibilities for the use of such neutron pulses in physical research are discussed.

PACS numbers: 28.20.–v, 29.20.–c, 61.12.–q

Bibliography — 45 references

Received 22 June 2005, revised 21 July 2006