
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 53.082.77

И. Ю. ИВАНОВ, А. А. ВАСИЛЬЕВ, М. Е. ВЗНУЗДАЕВ, Н. И. ВОРОПАЕВ, П. КАММЕЛЬ,
П. А. КРАВЦОВ, А. В. НАДТОЧИЙ, Г. Е. ПЕТРОВ, К. ПЕТИЖАН, В. А. ТРОФИМОВ

КРИОГЕННАЯ ВРЕМЯПРОЕКЦИОННАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА МЮОНА ДЕЙТРОНОМ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ MUSUN

Силами лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики разработана и изготовлена ионизационная время-проекционная камера (CryoTPC). Описаны технические особенности установки и приведены результаты ее испытаний.

Ключевые слова: времяпроекционная камера, захват мюона, дейтерий, криогеника.

Введение. Международный эксперимент MuSUN [1] с использованием мюонного пучка μE3 Швейцарской мезонной фабрики (S μ S, Swiss muon source) института им. Пауля Шеррера (PSI) осуществляется коллективом исследователей из России, Швейцарии и США [2]. Основной задачей эксперимента является прецизионное (с погрешностью не выше $\sim 1,5\%$) измерение скорости ядерного захвата мюона (μ -захвата) дейтроном:



Заявленная точность измерений необходима для экспериментальной проверки современной теории слабого взаимодействия, так называемой эффективной теории поля (Effective Field Theory, EFT), основы которой были заложены в 1990-х гг. Стивеном Вайнбергом [3].

Сопоставив измеренную скорость μ -захвата с вычисленной, возможно определить с высокой точностью сечения фундаментальных астрофизических реакций:



Ядерная реакция синтеза с участием двух протонов (2) протекает на Солнце и является основным источником электронных нейтрино. Реакции (3) и (4) используются для регистрации потоков нейтрино в нейтринных экспериментах [4]. Возможность точного вычисления характеристик нейтрино позволит решить многие вопросы в этой области науки.

Таким образом, рассматриваемый в настоящей статье эксперимент весьма актуален и его результаты будут востребованы в различных областях современной физики.

Экспериментальная методика. Для измерения скорости μ -захвата с высокой точностью в эксперименте MuSUN применена методика, успешно зарекомендовавшая себя в

предшествующем эксперименте MuCAP, где исследовался процесс захвата отрицательного мюона на протоне [5]. Методика основана на измерении разницы времени жизни отрицательного μ^- и положительного μ^+ мюонов в дейтерии. Так как положительный мюон ядрами вещества не захватывается, разница времени будет равна скорости захвата отрицательного мюона ядром дейтерия. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

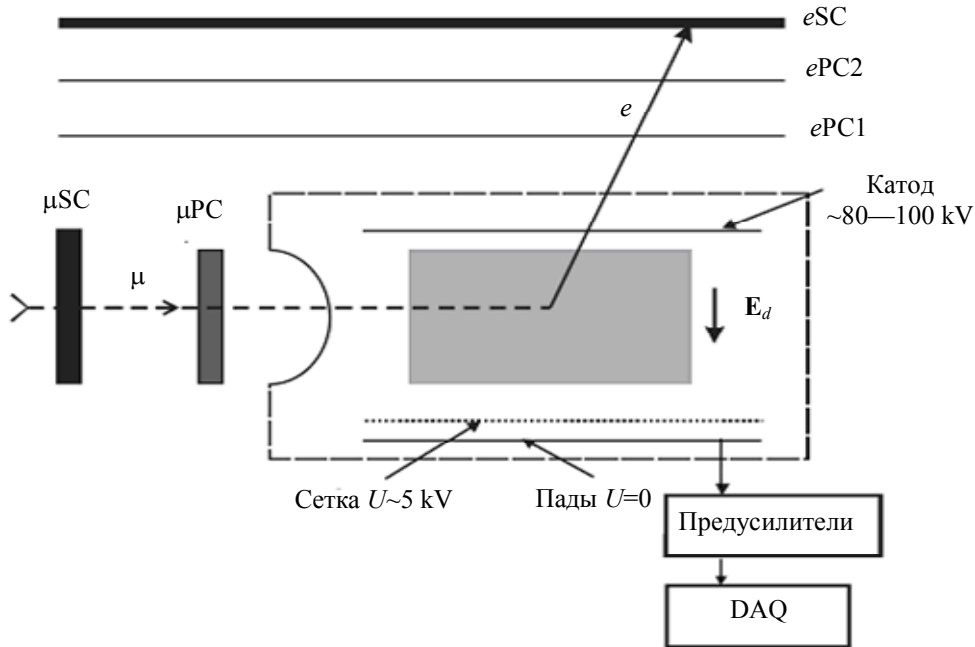
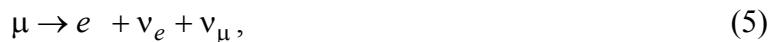


Рис. 1

Мюон из пучка регистрируется входными детекторами (μPC и μSC), после чего попадает внутрь основного детектора, заполненного прошедшим изотопную и химическую очистку дейтерием, где теряет энергию за счет ионизации атомов среды вплоть до полной остановки.

Остановившийся отрицательный мюон замещает в молекуле D_2 электрон и образует $d\mu$ -мезоатом. Мезоатом может „погибнуть“ из-за таких процессов, как перехват мюона на примеси элементов с большей массой ядра и мюонный катализ dd - и pd -синтеза. С целью подавления этих процессов дейтерий очищается от тяжелых примесей до уровня 10^{-9} , от протия — до уровня 10^{-4} , и охлаждается до температуры 30 К.

подавляющее большинство отрицательных мюонов и все положительные далее распадаются:



порождая электрон и два нейтрино. Электрон с энергией 10—60 МэВ проникает через стенки камеры и регистрируется системой детекторов $e\text{PC1}$, $e\text{PC2}$, $e\text{SC}$.

Для того чтобы исключить поглощение входных мюонов стенками камеры, измеряются три пространственные координаты точки остановки мюона. Это достигается благодаря использованию ионизационной камеры, у которой система анодов поделена на отдельные участки (так называемые пады).

В объеме камеры помещается высоковольтная система, состоящая из плоского катода, находящегося под напряжением ~ 80 — 100 кВ, заземленного анода, разделенного на плоские токопроводящие пластины (пады), и экранирующей сетки под напряжением ~ 5 кВ, расположенной на расстоянии 1—2 мм от анода. В пространстве между катодом и падами возникает электростатическое поле E_d (дрейфовая зона).

Мюон, влетев в камеру, ионизует атомы дейтерия, образуя трек из свободных электронов и дейтронов. В электростатическом поле свободные электроны дрейфуют по направлению к аноду с постоянной скоростью. Достигнув сетки, электроны проникают в дрейфовый

зазор сетка—анод и наводят на отдельных падах импульс тока, который регистрируется зарядочувствительным предусилителем. Далее аналоговый сигнал с предусилителя оцифровывается регистрирующей системой и полученная информация записывается в компьютер через систему сбора данных (DAQ). Номер пада анода, на котором появился сигнал, задает две координаты в анодной плоскости, время появления сигнала задает третью координату.

Сетка служит для экранировки анодов от ионов трека, обеспечивая линейную зависимость времени появления сигнала на падах от вертикальной координаты точки остановки мюона.

Временное распределение мюон—электрон представлено на рис. 2. Здесь по оси абсцисс отложен временной интервал между срабатыванием входного детектора μ SC и электронного eSC, а на оси ординат в логарифмическом масштабе — число событий N , соответствующих данному интервалу времени. Построенные зависимости для положительных и отрицательных мюонов имеют экспоненциальное распределение с параметрами τ_{μ^+} и τ_{μ^-} соответственно. Искомая величина Λ_d связана с этими параметрами следующим соотношением:

$$\Lambda_d = \frac{1}{\tau_{\mu^-}} - \frac{1}{\tau_{\mu^+}}. \quad (6)$$

Для определения Λ_d с заявленной точностью необходимо зарегистрировать более 10^{10} событий распада как для μ^- , так и для μ^+ .

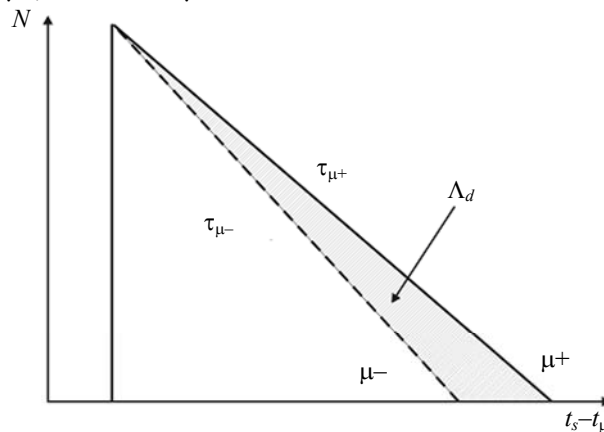


Рис. 2

„Сердцем“ эксперимента является криогенная ионизационная времяпроекционная камера (CryoTPC), наполненная сверхчистым дейтерием при давлении 5 атм и температуре 30 К. Конструкция CryoTPC и необходимая для ее работы инфраструктура была разработана в Лаборатории криогенной и сверхпроводящей техники Петербургского института ядерной физики РАН (ПИЯФ). Представление о конструкции детектора можно получить с помощью рис. 3.

Детектор представляет собой цилиндрическую камеру (4) диаметром 202 мм и длиной 360 мм, изготовленную из алюминиевого сплава АМГ-6. Толщина стенки камеры в ее цилиндрической части составляет 2,5 мм; в торцах сделаны утолщения до 20 мм для расположения крепежных отверстий под шпильки М8. Торцы камеры закрыты фланцами из стали 12Х18Н10Т; в меньший из фланцев впаяно полусферическое бериллиевое окно диаметром 60 мм с толщиной стенки 0,4 мм (1), в больший (9) вварены высоковольтные вводы (8 и 11), сигнальные разъемы типа D-SUB (12) и штуцер для ввода-вывода газа (на рисунке не показан). Кроме этого, большой фланец несет кронштейны (14), на которых размещена высоковольтная структура времяпроекционной камеры.

Четыре керамических стойки-изолятора (20) закреплены непосредственно на кронштейнах; алюминиевая пластина катода (5) толщиной 1,5 мм лежит на стойках-изоляторах. Корректирующие проволоки диаметром 2 мм (19) уложены в пазы стоек-изоляторов на

равном расстоянии друг от друга; резисторы высоковольтного делителя (7) припаяны непосредственно к корректирующим проволокам.

Рамка экранирующей сетки (16) изготовлена из сплава „ковар“ и крепится к кронштейнам посредством поддержек (15 и 22), гальваническую развязку с „землей“ обеспечивают керамические изоляторы (21). Сетка изготовлена из проволоки диаметром 25 мкм (17), напаянной на рамку с шагом 250 мкм.

Аноды (18) представляют собой медные ламели, нанесенные химическим способом на тонкую керамическую пластину (анодную плоскость), которая крепится непосредственно к рамке сетки посредством винтов М3, зазор между анодной плоскостью и сеткой выставляется с помощью тонких подкладных шайб. Сигнал с анодов снимается через плоские кабели (13).

Дополнительную жесткость и вибрационную устойчивость конструкции придают опорные стержни (23), которые входят в отверстия на утолщенной части алюминиевой камеры.

Катод, анодная плоскость и корректирующие проволоки ограничивают чувствительный объем времяпроекционной камеры.

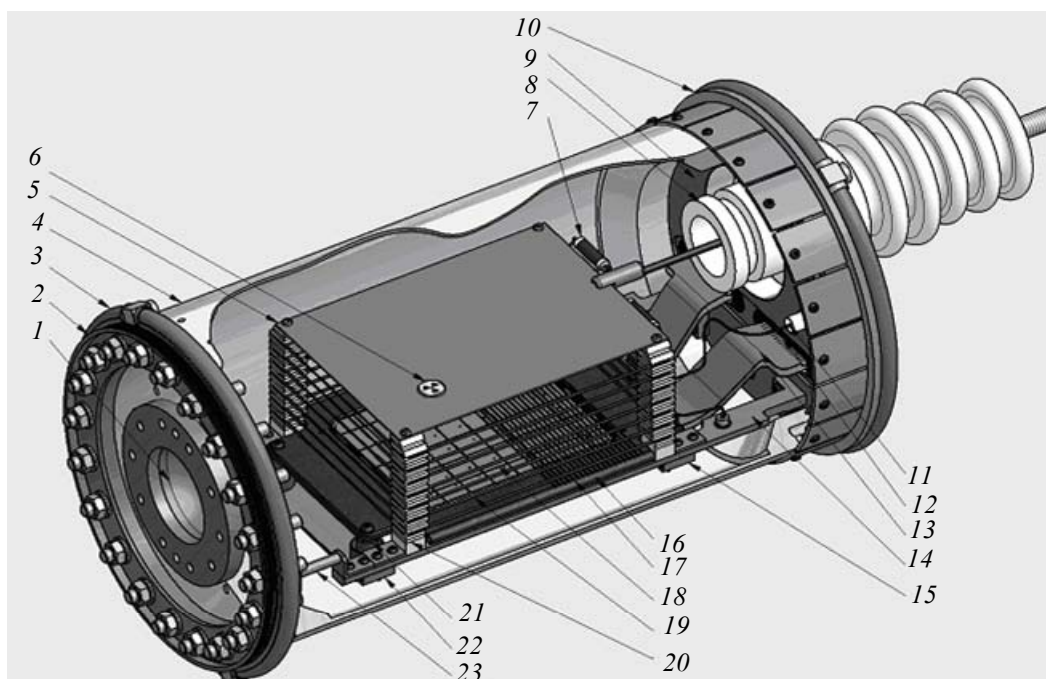


Рис. 3

Резисторы высоковольтного делителя подобраны таким образом, что потенциал выравнивающих проволок равномерно изменяется при удалении от катода к заземленному аноду. Геометрия катода, анода и выравнивающих проволок, а также распределение потенциала на них обеспечивают равномерность и однородность электростатического поля внутри чувствительного объема камеры.

Для получения калибровочных треков, необходимых для настройки камеры, на катоде закреплен источник альфа-частиц на основе изотопа америций-241 с интенсивностью 50 Бк (6).

Для охлаждения и поддержания стабильной температуры камера снабжена теплообменниками (3 и 10) и нагревателями (2). Работа системы охлаждения, а также всей установки заслуживает специального рассмотрения.

Система охлаждения (рис. 4) построена на основе криогенератора (1) и представляет собой замкнутый контур, состоящий из конденсатора (4), вертикальных медных трубок (6), горизонтальных сильфонов (7) и теплообменников времяпроекционной камеры (8 и 9). Система заполняется неоном при комнатной температуре под давлением ~5 атм, после чего герметически закрывается. В рабочем режиме криогенератор охлаждает медную крышку конденсатора, снабженную пластинчатым радиатором для увеличения поверхности теплообмена (3).

Неон конденсируется на радиаторе и стекает вниз по медным трубкам и далее по сильфонам, попадая в теплообменники. В теплообменниках неон испаряется и, охлаждая камеру, вновь поступает в конденсатор через возвратные трубки (5). Электрический нагреватель (2), предназначенный для регулирования температуры и нагрева системы, смонтирован на крышке конденсатора.

Полное время охлаждения камеры от комнатной температуры до 30 К составляет 12 часов.

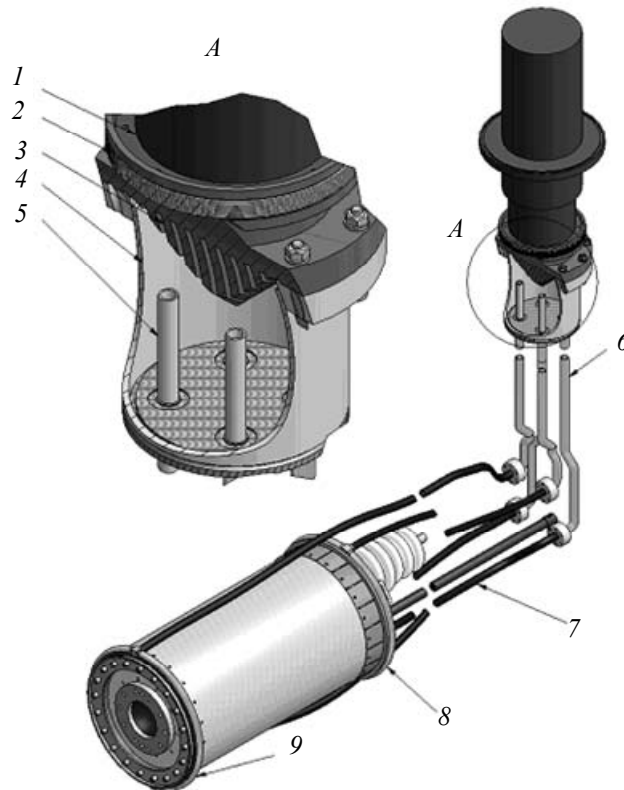


Рис. 4

Общая структура установки. Установка (рис. 5) состоит из CryoTPC (12), системы ее охлаждения, вакуумной и высоковольтной систем, которые конструктивно связаны вакуумным объемом (10). Установка смонтирована на двух стойках (3, 14), каждая из которых независимо закреплена на собственной подвижной платформе (8, 15). Разнесенный подвес и гибкий тарельчатый сильфон (2) позволяют снизить вибрационное воздействие криогенератора (1) на CryoTPC.

Вакуумная система на основе турбомолекулярного насоса (4) со скоростью откачки до 400 л/с обеспечивает поддержание вакуума в системе на уровне 10^{-7} мм рт. ст. Высокий вакуум необходим для теплоизоляции CryoTPC и системы охлаждения, а также играет роль высоковольтной изоляции.

Для обеспечения прохождения мюонного пучка внутрь вакуумного объема передний фланец алюминиевой обечайки (11) снабжен окном из высокопрочного полимера (13).

Для наполнения CryoTPC дейтерием, а системы охлаждения неонем используется газовый пульт (6). Поддержание заданной чистоты и давления газа в камере обеспечивается криогенной циркуляционной системой очистки, подробно описанной в [6]. Изотопная чистота дейтерия обеспечивается предварительной его подготовкой в системе криогенной дистилляции [7].

Высоковольтная система состоит из RC-фильтра (5), помещенного в специальный объем, заполненный трансформаторным маслом, и высоковольтного источника (на схеме не показан).

Зарядочувствительные предусилители расположены вне вакуумного объема на специальном фланце (7). На верхнем фланце (9) расположены разъемы системы температурной стабилизации СтупТРС.

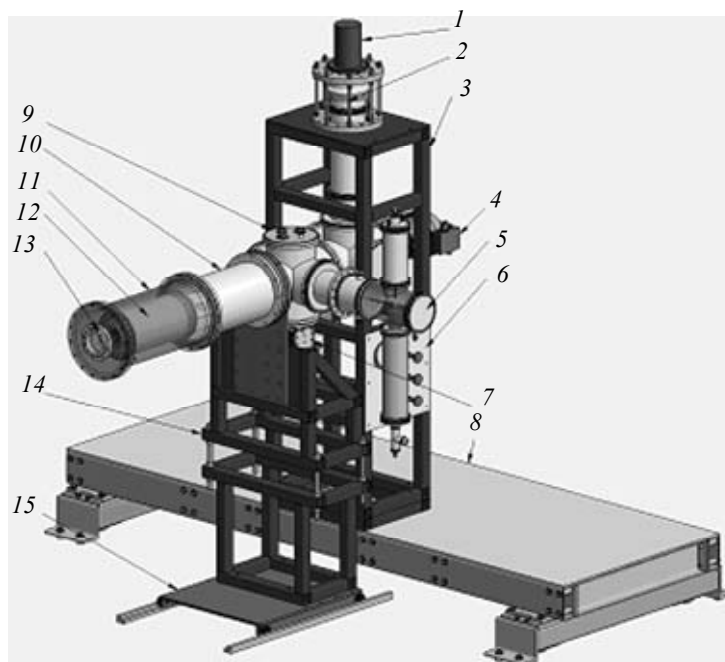


Рис. 5

Результаты испытаний камеры. Криогенная времяпроекционная камера была разработана и изготовлена в ПИЯФ, затем перевезена в PSI и смонтирована с системой охлаждения в 2009 г.

Работоспособность СтупТРС была подтверждена испытаниями с использованием тестового альфа-источника. На рис. 6 продемонстрирован пример сигнала, порождаемого треком альфа-частицы тестового источника. Сигнал измерен с выхода предусилителей цифровым осциллографом. Совпадающие по времени пики на верхней и нижней линиях соответствуют треку одиночной альфа-частицы, распределенному между двумя соседними падами.

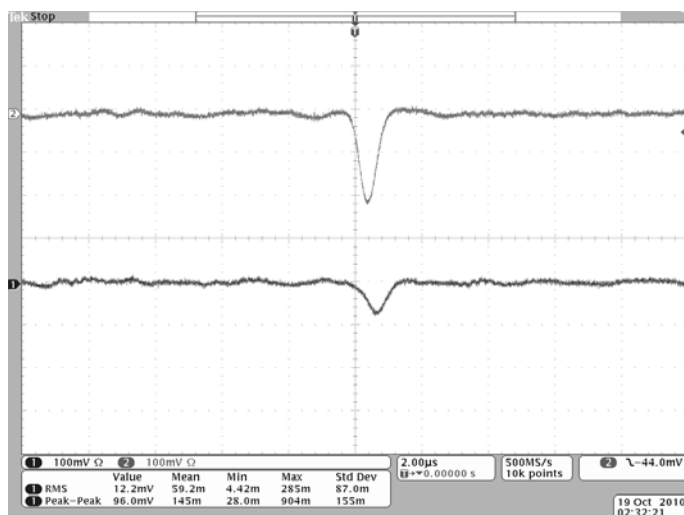


Рис. 6

В течение 2010 года в PSI были проведены два успешных экспериментальных сеанса на пучке $S\mu S$. Сеансы показали работоспособность самой камеры, ее системы охлаждения и системы сбора данных. На 2011—2013 гг. запланирован ряд продолжительных экспериментальных сеансов с получением полного массива экспериментальных данных, необходимых для получения физического результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эксперимент MuSun [Электронный ресурс]: <<http://www.npl.illinois.edu/exp/musun/>>.
2. Институт имени Пауля Шеррера [Электронный ресурс]: <<http://psi.ch>>.
3. *Weinberg S.* // Phys. Lett. B. 1990. Vol. 251. P. 288.
4. *Aharmim B.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. Vol. 101. P. 111 301.
5. *Andreev V. A.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 032 002.
6. *Ganzha V.* et al. // NIM A. 2007. Vol. 578. P. 485—497.
7. *Alekseev I.* et al. // Fusion Science and Technology. 2008. Vol. 54, N 2. P. 407—410.

Сведения об авторах

- Илья Юрьевич Иванов** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший лаборант; E-mail: ivannov_ilya@mail.ru
- Александр Анатольевич Васильев** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; заведующий кафедрой; E-mail: vassilie@pnpi.spb.ru
- Марат Евгеньевич Взнуздаев** — канд. хим. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: marat@pnpi.spb.ru
- Николай Иванович Воробаев** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; старший научный сотрудник; E-mail: vogoraev@pnpi.spb.ru
- Петер Каммель** — PhD, профессор; Университет штата Вашингтон, США; E-mail: pkammel@uw.edu
- Петр Андреевич Кравцов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: pkravt@gmail.com
- Александр Васильевич Надточий** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; старший научный сотрудник; E-mail: avnad@pnpi.spb.ru
- Геннадий Егорович Петров** — Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН; ведущий инженер; E-mail: petrov@pnpi.spb.ru
- Клод Петижан** — PhD, Институт Пауля Шеррера, Швейцария; ведущий исследователь; E-mail: Claude.Petitjean@psi.ch
- Виктор Алексеевич Трофимов** — канд. физ.-мат. наук; Петербургский институт ядерной физики им. В. П. Константинова РАН, базовая кафедра Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики: приборы и методы поляризационных экспериментов; старший научный сотрудник; E-mail: vtrof@gmail.com

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
01.03.11 г.