
ИСТОРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

HISTORICAL MATERIALS

УДК 539.1;537.8;538.9

ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ БГУ: 30 ЛЕТ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В. Г. БАРЫШЕВСКИЙ¹⁾, С. А. МАКСИМЕНКО¹⁾

¹⁾НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ, ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ создан 30 лет назад, в октябре 1986 г. Приведен краткий очерк истории его создания и главных направлений выполняемых научных исследований. Представлен ряд наиболее важных научных результатов, достигнутых в институте за последние годы как в области фундаментальных, так и прикладных исследований.

Ключевые слова: Институт ядерных проблем БГУ; научно-исследовательская работа.

INSTITUTE FOR NUCLEAR PROBLEMS: 30 YEARS OF RESEARCH ACTIVITY

V. G. BARYSHEVSKY^a, S. G. MAKSIMENKO^a

^aResearch Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,
Bobruiskaya street, 11, 220030, Minsk, Republic of Belarus
Corresponding author: sergey.maksimenko@gmail.com

The Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University has been founded 30 years ago, in October, 1986. A short introduction into history and main fields of research activity of the Institute is given. A set of most important results achieved in the Institute during past years both in fundamental and applied research is presented.

Key words: Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University; scientific research.

Образец цитирования:

Барышевский В. Г., Максименко С. А. Институт ядерных проблем БГУ: 30 лет научных исследований // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 4–13.

For citation:

Baryshevsky V. G., Maksimenko S. G. Institute for Nuclear Problems: 30 years of research activity. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 1. P. 4–13 (in Russ.).

Авторы:

Владимир Григорьевич Барышевский – доктор физико-математических наук, профессор; главный научный сотрудник, почетный директор.

Сергей Афанасьевич Максименко – доктор физико-математических наук, профессор; директор.

Authors:

Vladimir Baryshevsky, doctor of science (physics and mathematics), full professor; chief researcher, honorary director.
bar@inp.bsu.by

Sergey Maksimenko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; director.
sergey.maksimenko@gmail.com

Осенью 1986 г. на основании постановления ЦК КПСС и Совета Министров СССР и в соответствии с постановлением ЦК КПБ и Совета Министров БССР от 21 мая 1986 г. № 178-8 Министерством образования БССР был издан приказ от 3 ноября 1986 г. № 556 о создании Научно-исследовательского института (НИИ) ядерных проблем Белорусского государственного университета (современное официальное название с 2000 г. – Научно-исследовательское учреждение (НИУ) «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, НИИ ЯП БГУ). Образование института в рамках университета на основании постановления партии и правительства, конечно же, было обусловлено вескими причинами, и сейчас, по прошествии 30 лет работы НИИ ЯП БГУ, важно вспомнить о том, что послужило фундаментом его создания.

Средой-инкубатором стала кафедра ядерной физики физического факультета БГУ. Заложенные на этой кафедре ее создателем и руководителем (1961–1970), профессором А. Н. Писаревским, традиции проведения как фундаментальных, так и прикладных исследований, предоставление возможностей для личной инициативы были сохранены и в полной мере реализованы профессором С. С. Шушкевичем, заведовавшим кафедрой в 1971–1990 гг. Под его научным руководством были выполнены многочисленные работы в области научного приборостроения и прикладных исследований, важнейшие из которых были отмечены премиями Совета Министров БССР и медалями ВДНХ СССР. Высокий уровень квалификации сотрудников кафедры и широта их научных исследований снискали им заслуженный авторитет в научной среде и вызвали большой интерес студентов, благодаря чему постоянно поддерживался приток молодых талантливых специалистов.

На кафедре активно велись фундаментальные исследования (научный руководитель – профессор В. Г. Барышевский), положившие начало созданию нового направления – ядерной оптики поляризованных сред [1; 2] и открывшие широкий спектр прикладных разработок в физике высоких энергий, астрофизике и ядерной физике. В частности, В. Г. Барышевским сделаны и зарегистрированы в СССР два открытия [3; 4].

Основополагающими для будущих направлений работ в НИИ ЯП БГУ стали теоретические предсказания явления параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), возбуждаемого релятивистскими электронами, пролетающими через кристалл [5; 6], и явления рентгеновского излучения, образованного при каналировании релятивистских электронов и позитронов [7]. В этих работах была построена теория и обоснована возможность создания новых типов рентгеновских источников с плавной перестройкой частоты, а также рентгеновских лазеров на их основе. Эксперименты по обнаружению ПРИ были подготовлены и проведены в 1985 г. в Томске на синхротроне СИРИУС. В результате было доказано существование ПРИ [8].

В конце 1970-х – начале 1980-х гг. на эти работы обратили внимание в Министерстве обороны СССР. Анализ потенциальных возможностей подобных источников, проведенный В. Г. Барышевским, показал, что принципы создания рентгеновских лазеров на основе возбуждения ПРИ имеют общее значение и могут быть использованы для генерации сверхмощного электромагнитного излучения в различных диапазонах длин волн и ускорения пучков частиц [9]. Как следствие, подобные генераторы оказались перспективными для использования в военно-промышленном комплексе при создании различных оборонных систем и оружия. Большую поддержку указанному направлению оказал ректор БГУ академик АН БССР В. А. Белый, который в 1980 г. доложил о результатах исследований первому секретарю ЦК КПБ П. М. Машерову.

Содействие в развертывании работ со стороны П. М. Машерова и секретаря ЦК КПБ А. Т. Кузьмина инициировало более интенсивные исследования в этой области. Меры, принятые ЦК КПСС и ЦК КПБ в связи с важностью возникшего научного направления, способствовали широкому развертыванию научных исследований на кафедре ядерной физики в целях их доведения до стадии разработки экспериментальных макетов и практического использования в опытно-конструкторских работах по созданию



Рис. 1. Заведующий кафедрой ядерной физики БГУ член-корреспондент НАН Беларуси, профессор С. С. Шушкевич (справа) и профессор В. Г. Барышевский. Начало 1970-х гг.
Fig. 1. Head of the nuclear physics department of BSU corresponding member of National Academy of Sciences of Belarus professor S. S. Shushkevich (on right) and professor of V. G. Baryshevsky. Early 1970s

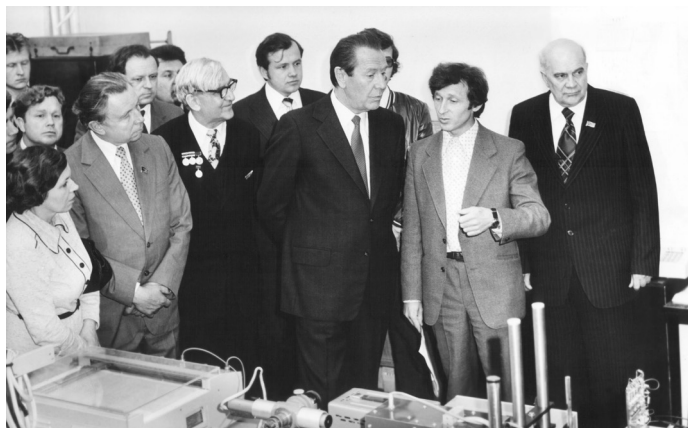


Рис. 2. В. Г. Барышевский (второй справа) докладывает результаты исследований П. М. Машерову (третий справа). На переднем плане академик АН БССР М. А. Ельяшевич и ректор БГУ академик АН БССР В. А. Белый (первый справа)
Fig. 2. V. G. Baryshevsky (second from right) reports to P. M. Masharov (third from right). In the foreground: academician of Academy of Sciences of BSSR M. A. El'yashevich and BSU rector academician AS BSSR V. A. Bely (first from right)

СССР. Причем следует сказать, что долгое время генерация когерентного рентгеновского излучения пучками электронов считалась в принципе невозможной вследствие того, что расстояние между электронами во всех реальных пучках намного больше длины волны рентгеновского излучения. Точка в дискуссии была поставлена в 1984–1985 гг. академиком Ю. Б. Харитоном, член-корреспондентом АН СССР Л. П. Феоктистовым и профессором А. Н. Лебедевым (Физический институт (ФИ) АН СССР), а также на специальном семинаре в ФИ АН СССР. Участие в некоторых дискуссиях высококлассного физика-оптика Л. И. Киселевского, который к тому времени стал ректором БГУ, также способствовало положительному решению вопроса о создании НИИ ЯП именно в Беларуси.

Институт начал функционировать в 1986 г. Очень быстро были развернуты исследования по многим направлениям ядерной физики, которые проводили главным образом сотрудники лаборатории ядерной оптики кафедры ядерной физики, созданной ранее для выполнения этих работ, и выпускники физического факультета БГУ. К работе в аппарате управления были привлечены опытные и энергичные люди: главный бухгалтер А. А. Байраш, главный инженер А. И. Тузин, заместитель директора по общим вопросам В. Г. Путров, заместитель директора по кадрам и режиму А. И. Дикович, на должность заместителя директора по науке был приглашен профессор кафедры теоретической физики Н. М. Шумейко. Возглавлял НИИ ЯП БГУ доктор физико-математических наук, профессор В. Г. Барышевский.

Созданный таким образом очень молодой коллектив к началу 1990-х гг. сумел заложить уникальную экспериментальную базу, в основном разместившуюся в технологическом корпусе Белорусского научно-исследовательского института мелиорации (г. Минск, ул. Богдановича, 153). Белорусская школа научного приборостроения позволила собрать в НИИ ЯП БГУ группу высокопрофессиональных специалистов по разработке ядерно-физической аппаратуры и различных измерительных систем (В. И. Мороз, М. Г. Лифшиц, Э. И. Подольный, Ю. Кононов, В. А. Евдокимов, В. В. Кузьмин, А. М. Белов, А. О. Грубич, Б. А. Тарнопольский, М. В. Батурицкий, В. И. Иванов, А. И. Жидович и др.). Активно включилась в работу и пришедшая с кафедры ядерной физики группа теоретиков (И. Я. Дубовская, В. В. Тихомиров и др.).

Одновременно в НИИ ЯП БГУ очень быстро развивались работы по созданию средств контроля за ядерным оружием и техническому обеспечению программы стратегического разоружения (ответственный исполнитель работ – В. И. Мороз). Большим успехом коллектива было участие в подготовке советско-американского эксперимента на борту крейсера «Слава» в Черном море по обнаружению ядерного оружия (1989), что явилось признанием мирового уровня проводимых в НИИ ЯП БГУ прикладных исследований [12].

Важнейшим направлением работ с начала 1990-х гг. стала деятельность в области преодоления последствий чернобыльской катастрофы. В 1990 г. решением Правительства Беларуси была принята Республиканская научно-техническая программа по созданию и выпуску аппаратуры и оборудования для обеспечения радиометрического и дозиметрического контроля (РНТП 18.02р), рассчитанная на 1991–1995 гг. Главным исполнителем программы был определен НИИ ЯП БГУ. Характеристики основных приборов, разработанных и серийно выпускаемых по заданиям РНТП, приведены в каталоге «Приборы для радиоэкологического мониторинга», изданном в 1996 г. [13].

новых видов источников излучения, получивших впоследствии в научной среде название объемных лазеров на свободных электронах (ОЛСЭ) [10; 11]. В начале 1980-х гг. работы подобного уровня проводились исключительно в России. Благодаря чрезвычайно важным результатам деятельности научного коллектива кафедры было принято не вполне стандартное решение – развивать в Беларуси совместно со специализированными российскими институтами столь важные для страны исследования. Эти работы в значительной мере стимулировал кандидат физико-математических наук Е. Ф. Титков (НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ), активно занимавшийся разработкой лазерных методов дистанционного контроля радиационной обстановки в окружающей среде.

Необходимо отметить, что созданию НИИ ЯП БГУ предшествовала активная научная дискуссия в ведущих физических центрах

Для развития сети радиационного и экологического контроля в соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 17 января 1997 г. № 7 НИИ ЯП БГУ в качестве головной организации выполнял государственную научно-техническую программу «Разработать и внедрить методы и аппаратные средства для обеспечения радиационной и экологической безопасности» («Радиоэкология») на период 1997–2000 гг.

С начала 1990-х гг. в НИИ ЯП БГУ под руководством доктора физико-математических наук М. В. Коржика были начаты систематические исследования свойств кристаллических соединений с целью создания нового поколения высокоэффективных трансформаторов энергии ионизирующего излучения в свет, в частности сцинтилляторов [14]. Разработан новый класс сцинтилляционных материалов – вольфрамат свинца PWO. На основе тяжелого сцинтиллятора вольфрамата свинца созданы электромагнитные калориметры детекторов CMS и ALICE в Европейской организации ядерных исследований (CERN).

Поскольку фундамент исследовательской программы НИИ ЯП БГУ был заложен еще на кафедре ядерной физики БГУ, их сотрудники и в настоящее время сохраняют тесные научно-педагогические связи. Необходимо отметить выходцев из НИИ ЯП БГУ – ведущих преподавателей кафедры доцентов И. Я. Дубовскую и М. В. Дежурко, а также сотрудников НИИ ЯП БГУ – профессора В. В. Тихомирова, доктора физико-математических наук А. С. Лобко, кандидатов физико-математических наук К. Г. Батракова, Д. С. Быченка, Х. Суареса, научных сотрудников И. В. Мороза, В. А. Мечинского, которые обеспечивают преподавание многих ключевых дисциплин и участвуют в подготовке специалистов для Белорусской АЭС. Совместно с физическим и химическим факультетами БГУ активно ведется разработка учебно-научного электронного портала ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь BelNET¹. Научно-исследовательским институтом ядерных проблем БГУ получена лицензия Госатомнадзора Министерства по чрезвычайным ситуациям (МЧС) Республики Беларусь, позволяющая проведение экспертиз в организациях и учреждениях на право работы с источниками ионизирующего излучения. Подготовлены специалисты и организована работа лаборатории ядерной спектрометрии и экспертиз радиационной безопасности². По договору с Департаментом по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС МЧС Республики Беларусь в лаборатории теоретической физики и моделирования ядерных процессов (заведующий лабораторией – кандидат физико-математических наук С. А. Кутень) проведен обзор нормативного и методического обеспечения радиационных измерений в системах радиационного контроля и анализ приборной базы системы радиационного контроля Республики Беларусь и Российской Федерации, даны рекомендации по гармонизации методов и методик исследования системы радиационного контроля в рамках Таможенного союза. Результаты выполнения данного договора внедрены в РУП «Белорусский государственный институт метрологии».

Во второй половине 1990-х гг. в НИИ ЯП БГУ создана и сейчас интенсивно развивается новая исследовательская дисциплина – наноэлектромагнетизм, объединяющая методы классической электродинамики, современной квантовой физики конденсированного состояния и физической электроники в целях моделирования электромагнитных и электронных свойств наноструктур. Выполненные исследования формируют наноэлектромагнетизм как самостоятельное направление, обеспечивающее пионерские результаты по предсказанию физических эффектов в наноструктурах и моделированию отклика наноструктур на электромагнитные воздействия [15–17]. Создана материальная база синтеза

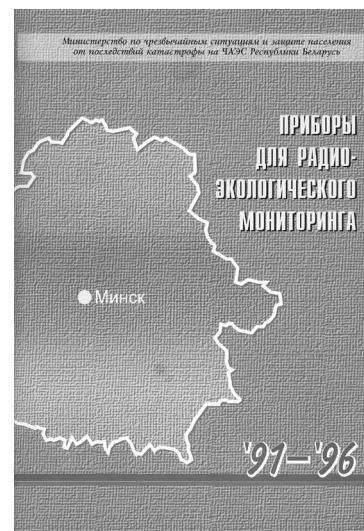


Рис. 3. Обложка каталога «Приборы для радиоэкологического мониторинга» (Минск, 1996)

Fig. 3. Cover of the catalog «Equipment for radiation and ecology monitoring» (Minsk, 1996)

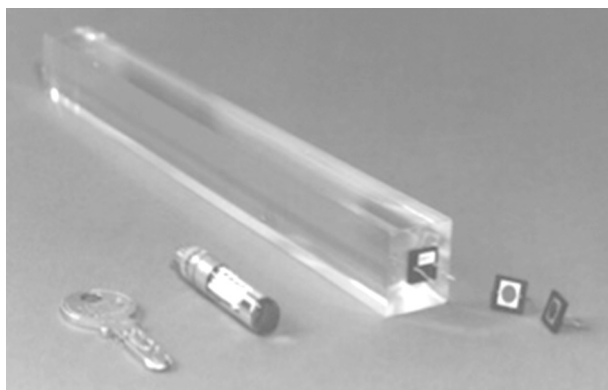


Рис. 4. Элемент электромагнитного калориметра на основе вольфрамата свинца

Fig. 4. Element of the electromagnetic calorimeter on the basis of lead tungstate

¹Электронный портал ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь. URL: <https://bsu.inpnet.net/belnet/> (дата обращения: 02.09.2016).

²Лицензия Госатомнадзора Республики Беларусь на право осуществления деятельности в области использования ядерной энергии и источников ионизирующего излучения от 2 мая 2016 г. № 33134/615-4.

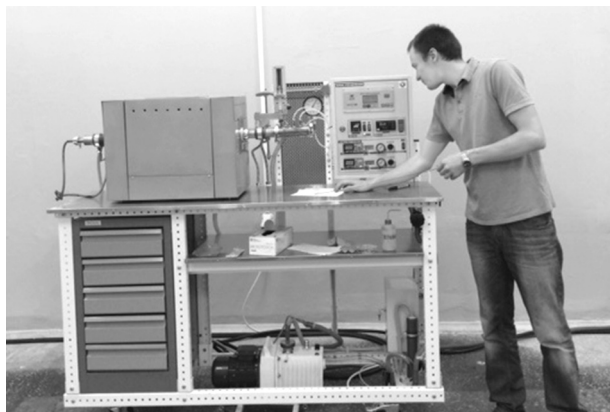


Рис. 5. Старший научный сотрудник лаборатории нанoeлектромагнетизма Д. С. Быченко во время эксплуатации установки CVD-синтеза углеродных нанотрубок, разработанной и изготовленной в Институте неорганической химии Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск
Fig. 5. Senior researcher of Laboratory of Nanoelectromagnetics D. S. Bychenok works on the facility for CVD synthesis of carbon nanotubes, developed and manufactured at the Institute of Inorganic Chemistry SB RAS, Novosibirsk

углеродных наноструктур и исследований их свойств, которая включает, в частности, установки CVD-синтеза многостенных углеродных нанотрубок и графеновых слоев большой площади (до 10 см^2), а также терагерцовый спектрометр.

Разработка и изготовление наноструктурированных магнитных материалов выполняются в лаборатории физики перспективных материалов под руководством доктора физико-математических наук Ю. А. Федотовой [18; 19].

За последние десять лет в НИИ ЯП БГУ произошел ряд существенных изменений, среди которых в первую очередь следует отметить присоединение к нему в соответствии с постановлением Совета министров Республики Беларусь от 27 июля 2015 г. № 636 Национального научно-учебного центра физики частиц и высоких энергий (НЦ ФЧВЭ) БГУ. Мы ожидаем от этого события существенного синергетического эффекта. В настоящее время НИИ ЯП БГУ выполняет обязанности по организационному обеспечению научно-исследовательских работ, осуществляемых в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) с участием организаций и учреждений Республики Беларусь.

В НИИ ЯП БГУ созданы и активно действуют следующие научные школы:

- **ядерной оптики и физики высоких плотностей энергии.** Основатель и научный руководитель школы – профессор В. Г. Барышевский;

- **электродинамики и электромагнитных свойств наноструктур (нанoeлектромагнетизма),** основоположниками и научными лидерами которой являются профессор С. А. Максименко и доктор физико-математических наук Г. Я. Слепян;

- **физики частиц и высоких энергий.** Образована в результате слияния школы, основанной в НЦ ФЧВЭ профессором Н. М. Шумейко, с аналогичной в этой области, существовавшей в НИИ ЯП БГУ до присоединения к нему НЦ ФЧВЭ (профессора В. Г. Барышевский, В. В. Тихомиров, доктора физико-математических наук М. В. Коржик, А. С. Лобко и др.).

Следует отметить, что на стыке двух школ – ядерной оптики и физики частиц и высоких энергий – развивается новое направление – космофизика (В. В. Тихомиров [20], А. Э. Марголин [21], С. Л. Черкас [22]).

Благодаря пионерским результатам в области исследования углеродных наноструктур, в частности графена, НИИ ЯП БГУ стал одной из двух научных организаций в Беларуси – головных по выполнению проектов Седьмой рамочной программы научных исследований ЕС (координатор – профессор С. А. Максименко) [23], а также единственным научно-исследовательским учреждением за пределами ЕС, вошедшим в качестве исполнителя в европейский мегагрант Graphene Flagship, объединяющий усилия 149 научно-исследовательских организаций Европы для достижения европейского лидерства в исследовании и применении графена (ответственные исполнители – профессор С. А. Максименко и кандидат физико-математических наук П. П. Кужир) [24]. В настоящее время в НИИ ЯП БГУ выполняются четыре проекта программы ЕС «Горизонт-2020».

Согласно рейтингу организаций Беларуси по индексу Хирша НИИ ЯП БГУ занимает 3-е место в таблице «Топ-25 организаций Беларуси по индексу Хирша» и 2-е место в таблице «Рейтинг учреждений образования Республики Беларусь и научно-исследовательских учреждений вузов по индексу Хирша». Личное значение индекса Хирша выше 15 имеют 12 сотрудников НИИ ЯП БГУ.

Благодаря значимым научным результатам НИИ ЯП БГУ имеет весомый авторитет у коллег как внутри страны, так и за ее пределами. Это позволило привлечь к участию в организованных в НИИ ЯП БГУ конференциях и школах высококлассных специалистов из различных областей науки. Приведем названия нескольких мероприятий: 64-я Международная конференция «Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий «ЯДРО-2014»» (июль 2014 г.);

4-я и 5-я международные конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии (ИСМАРТ) – Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies» (октябрь 2014 и сентябрь 2016 г.); рабочее совещание «Современные ядерно-физические методы исследования в физике конденсированных сред» (сентябрь 2011, 2013 и 2015 гг.); 1-я и 2-я международные конференции «Fundamental and Applied NanoElectroMagnetics» (FANEM, май 2012 и май 2015 г.).

За последние годы сотрудниками НИИ ЯП БГУ получен ряд важных научных результатов как в фундаментальных, так и прикладных исследованиях. Среди них следует отметить следующие.

На разработанном и изготовленном с участием НИИ ЯП БГУ электромагнитном калориметре эксперимента CMS на Большом адронном коллайдере (LHC) в CERN получены результаты, указывающие на существование бозона Хиггса в процессе его распада на два фотона с высоким разрешением по массе. Соавторами первых двух работ, сообщающих об открытии бозона Хиггса, стали 14 сотрудников НИИ ЯП БГУ.

Впервые наблюдался предсказанный В. В. Тихомировым [25] эффект многократного объемного отражения положительно [26] и отрицательно [27] заряженных частиц высоких энергий изогнутыми плоскостями одного кристалла в эксперименте, проведенном на ускорителе SPS совместно с учеными университета Феррары (Италия) при поддержке Итальянского института ядерной физики (INFN). Предсказан [28] и обнаружен на ускорителе SPS (CERN) эффект многократного увеличения интенсивности излучения гамма-квантов расходящимися пучками электронов высоких энергий в условиях многократного объемного отражения в одном кристалле [29]. Предсказан [30] и на микротроне MAMI Майнцского университета (Германия) обнаружен эффект увеличения длины деканализирования электронов, вызываемый их захватом в глубине кристалла [31].

Измерено дифференциальное сечение 3-струйных событий при энергии 7 ТэВ в системе центра масс протонов детектором ATLAS на LHC [32] и дифференциальное сечение процесса Дрелла – Яна при энергии 8 ТэВ в системе центра масс протонов детектором CMS на LHC [33], модернизирован генератор событий LePeProGen для моделирования процесса Дрелла – Яна, создан генератор Монте-Карло для моделирования эксклюзивного рождения электронных пар в электрон-протонном рассеянии как фоновый процесс к рождению «тяжелых» фотонов. Оценен вклад излучения жесткого фотона при измерении зарядовой асимметрии в лептон-протонном рассеянии в ультрарелятивистском приближении [34].

Показано, что при торможении антипротонов в веществе эффект ядерной прецессии позволяет получить сведения о реальной части амплитуды рассеяния антипротона на протоне (ядре) при нулевых энергиях, т. е. в области, недоступной для прямого измерения в стандартных экспериментах по рассеянию [35].

В рамках теории с минимальной длиной предложен новый подход к решению проблем расходимостей в квантовой теории поля, перехода в гравитации из низких энергий в высокие, темной энергии [36].

Выполнены эксперименты на образцах калиброванных по длине нанотрубок, устанавливающих однозначную связь спектрального положения терагерцового пика поглощения тонких пленок из одностенных углеродных нанотрубок (УНТ) с их длиной. Показано, что основным механизмом формирования терагерцового пика является локализованный плазменный (антенный) резонанс в одностенных УНТ. Впервые получено экспериментальное доказательство антенных свойств нанотрубок и подтвержден теоретически предсказанный эффект замедления поверхностного плазмона в нанотрубках [37].

Предложена методика синтеза структур типа сэндвича графен/полимер на диэлектрических подложках. Проведены экспериментальные исследования электромагнитного отклика данных структур в СВЧ-диапазоне. Установлено, что структура графен/полимер может обеспечить до 75 % ослабление электромагнитного сигнала. Разработаны способы увеличения поглощения падающего электромагнитного излучения СВЧ-диапазона в монослоях графена за счет подбора оптимальной толщины и диэлектрических параметров подложки, оптимального угла падения и поляризации падающей волны. На основе данного эффекта сформулирован принцип работы и создана схема эффективного поляризатора электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра [38; 39].

Показана принципиальная возможность выращивания кристаллов вольфрамата свинца в установках открытого типа из иридиевых тиглей, что открывает перспективу создания производства этих сцинтилляционных кристаллов для нужд физики высоких энергий [40].

Разработан экспериментальный образец генератора СВЧ-импульса с виртуальным катодом, системой питания, использующей прямое преобразование химической энергии взрыва в электрическую. Созданы и испытаны экспериментальные образцы взрывомагнитных генераторов, позволяющих запитать СВЧ-генератор и обеспечить получение электронных пучков с током до 30 кА. Максимальная мощность СВЧ-излучения, полученная в экспериментах, достигала уровня 500 МВт/м². Проведены испытания экспериментального образца СВЧ-генератора с системой питания, использующей как прямое

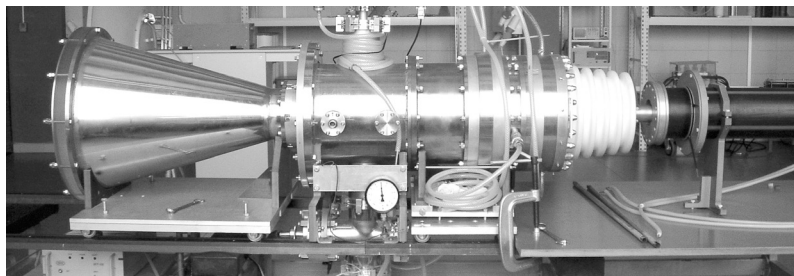


Рис. 6. Экспериментальный образец генератора с виртуальным катодом для получения СВЧ-излучения в диапазоне частот от 2,5 до 5,0 ГГц
Fig. 6. Experimental prototype of virtual cathode oscillator provides microwave radiation in frequency range from 2.5 to 5.0 GHz

преобразование химической энергии взрыва в электрическую, так и от емкостных накопителей энергии [41]. Работы способствуют созданию в стране экспериментальной базы для проведения испытаний электрической техники.

Внесен существенный вклад в разработку и обоснование технических предложений по модернизации торцевых частей электромагнитного калориметра экспериментальной установки коллаборации CMS (CERN) для работы в условиях LHC с увеличенной светимостью. Проведена оценка деградации цилиндрической части калориметра на период до 2018 г. Выявлены границы использования понижения температуры для уменьшения шумов фотоприемников в детекторных ячейках. Установлены ограничения и преимущества различных сцинтилляционных материалов для построения передних калориметров экспериментальных установок на коллайдерах с высокой светимостью. Показана принципиальная возможность использования материалов структурного типа граната на основе иттрия для создания радиационно стойких электромагнитных калориметров [42].

Получено объяснение избыточной радиационной деградации адронного калориметра детектора CMS (LHC) и предложен экономически эффективный метод повышения его радиационной стойкости, позволяющий выдержать весь срок эксплуатации при повышенной светимости коллайдера LHC [43].

Разработаны экспериментальные методики получения магнитоанизотропных наноструктурированных пленок FeCoZr – диэлектрик (CaF_2 , Al_2O_3) [44; 45] и CoPd, CoPt на основе пористых матриц Al_2O_3 и TiO_2 [19] со сложной морфологией и контролируемым комплексом магнитоэлектрических характеристик для применения в микро- и магнитоэлектронике, магнитной сенсорике и перпендикулярной записи информации сверхвысокой плотности.

В испытаниях первого сверхпроводящего ниобиевого резонатора отечественного производства прямым аппаратным методом измерена его добротность в состоянии сверхпроводимости, а также значение добротности $\sim 1,5 \cdot 10^9$ на частоте 1,3 ГГц. Работа проводится по заказу и в тесном сотрудничестве с ОИЯИ совместно с УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси и Научно-производственным центром НАН Беларуси по материаловедению [46].

Предложен и экспериментально опробован новый метод измерения компонентного состава спирто-содержащих продуктов, который может быть использован при разработке международных стандартов контроля качества и безопасности алкогольной продукции, автомобильного топлива с использованием этанола и др. [47; 48].

Создан опытный образец комплекса оборудования для обезвреживания фармацевтических отходов и цитостатических фармацевтических препаратов, на котором выполнен большой объем опытно-технологических работ по обезвреживанию последних (РНПЦ детской онкологии, гематологии и иммунологии, РУП «Центр экспертиз и испытаний в здравоохранении» и др.)¹.

Помимо фундаментальных и прикладных исследований, НИИ ЯП БГУ установил прочные договорные связи с предприятиями различных форм собственности и научными организациями по осуществлению научного сопровождения разработок и проведению экспертиз. В частности, ученые и специалисты НИИ ЯП БГУ сотрудничают в области медицинской физики и ядерно-физического приборостроения с НПО «Атомтех», ведущим предприятием в области производства ядерно-физической аппаратуры, а также с Белорусской медицинской академией последипломного образования, РНПЦ онкологии и медицинской радиологии и Госатомнадзором МЧС Республики Беларусь.

¹ Карпович В. А. Комплекс оборудования для обезвреживания фармацевтических отходов и цитостатических фармацевтических препаратов // Золотая медаль за участие в конкурсе «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года» на Петербургской технической ярмарке. 2016.

Таким образом, можно утверждать, что в НИИ ЯП БГУ создан высокопрофессиональный творческий коллектив, способный решать самые серьезные задачи современной фундаментальной и прикладной науки и университетского образования. За прошедшие 30 лет институт доказал свою значимость и необходимость в структуре науки и образования в нашей стране и сегодня с уверенностью смотрит в будущее.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Барышевский В. Г. Ядерная оптика поляризованных сред. 2-е изд. Минск, 1995.
2. Baryshevsky V. G. High-Energy Nuclear Optics of Polarized Particles. Singapore, 2012.
3. Барышевский В. Г., Подгорецкий М. И. Явление ядерной прецессии нейтронов // Государственный реестр открытий СССР. № 224 с приоритетом от 3 апреля 1964 г.
4. Явление вращения плоскости поляризации жестких гамма-квантов / В. Г. Барышевский [и др.] // Государственный реестр открытий СССР. № 360 с приоритетом от 12 февраля 1965 г. в части теоретического обоснования и от 28 июля 1971 г. в части экспериментального доказательства явления.
5. Барышевский В. Г. О рассеянии света потоком электронов, проходящих через кристалл // Докл. АН БССР. 1971. Т. 15 (4). С. 306–308.
6. Барышевский В. Г., Феранчук И. Д. О переходном излучении гамма-квантов в кристалле // ЖЭТФ. 1971. Т. 61, № 3 (9). С. 944.
7. Baryshevskii V. G., Dubovskaya I. Ya. Coherent Radiation of the Channelling Positron (Electron) // Phys. Stat. Sol. B. 1997. Vol. 82. P. 403–412.
8. Экспериментальное обнаружение параметрического рентгеновского излучения / Ю. Н. Адисhev [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41. С. 259.
9. Барышевский В. Г. Неустойчивость волн в периодической среде // Докл. АН БССР. 1987. Т. 31 (12). С. 1089.
10. Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D. Parametric beam instability of relativistic charged particles in a crystal // Phys. Lett. A. 1984. Vol. 102 (3). P. 141–144.
11. Барышевский В. Г. Поверхностное параметрическое излучение релятивистских частиц // Докл. АН СССР. 1988. Т. 299. С. 1363.
12. Gamma-ray Measurements of a Soviet Cruise-Missile Warhead / S. Fetter [et al.] // Science. 1990. Vol. 248. P. 828–834.
13. Приборы для радиоэкологического мониторинга. Минск, 1996.
14. Inorganic Scintillators for detector Systems / P. Lecoq [et al.]. Berlin ; Heidelberg, 2006.
15. Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions and surface wave propagation / G. Ya. Slepian [et al.] // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. P. 17136–17149.
16. Maksimenko S. A., Slepian G. Ya. Nanoelectromagnetics of low-dimensional structures // The Handbook of Nanotechnology: Nanometer Structures, Theory, Modeling, and Simulation / ed. A. Lakhtakia. Bellingham, 2004. P. 145–206.
17. Maffucci A., Maksimenko S. A. Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Dordrecht, 2016.
18. Fedotova J. A. FeCoZr – Al₂O₃ granular nanocomposite films with tailored structural, electric, magnetotransport and magnetic properties // Advances in Nanoscale Magnetism : proc. of the Int. Conf. on Nanoscale Magnetism ICNM-2007 (Istanbul, Turkey, 25–29 June 2007). [Germany], 2008. P. 231–367.
19. Maksimenko A., Fedotova J., Marszalek M. Magnetic characteristics of CoPd and FePd antidot arrays on nanoporous Al₂O₃ templates // J. Magn. Magn. Mater. 2016. Vol. 400. P. 200–205.
20. Tikhomirov V. V., Tselkov Yu. A. How particle collisions increase the rate of accretion from the cosmological background onto primordial black holes in braneworld cosmology // Phys. Rev. D. 2005. Vol. 72. 121301(R).
21. Shalyt-Margolin A. Gravity at All the Energy Levels. Contours of a Future Building. Saarbrücken, 2014.
22. Cherkas S. L., Kalashnikov V. L. Determination of the UV cut-off from the observed value of the Universe acceleration // J. Cosm. Astropart. Phys. 2007. Vol. 01. P. 028.
23. Institutional Development of Applied Nanoelectromagnetics: Belarus in ERA Widening, EU project BY-NanoERA, ID 266529, Call ID FP7-INCO-2010-6, 2010–2013. URL: http://cordis.europa.eu/project/rcn/96756_en.html (date of access: 11.10.2016).
24. Graphene-based revolutions in ICT and beyond, project FP7-ICT, ID 604391 Graphene, Call ID FP7-ICT-2013-FET-F, 2013–2016. URL: http://cordis.europa.eu/project/rcn/109691_en.html (date of access: 11.10.2016).
25. Tikhomirov V. V. Multiple Volume Reflection from Different Planes Inside One Bent Crystal // Phys. Lett. B. 2007. Vol. 655, issue 5/6. P. 217–222.
26. First observation of multiple volume reflection by different planes in one bent silicon crystal for high-energy protons / W. Scandale [et al.] // Phys. Lett. B. 2009. Vol. 682, issue 3. P. 274–277.
27. Observation of multiple volume reflection by different planes in one bent silicon crystal for high-energy negative particles / W. Scandale [et al.] // Europhys. Lett. 2011. Vol. 93, № 5. P. 56002.
28. Guidi V., Bandiera L., Tikhomirov V. V. Radiation generated by single and multiple volume reflection of ultrarelativistic electrons and positrons in bent crystals // Phys. Rev. A. 2012. Vol. 86, issue 4. P. 042903.
29. Broad and Intense Radiation Accompanying Multiple Volume Reflection of Ultrarelativistic Electrons in a Bent Crystal / L. Bandiera [et al.] // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111, issue 25. P. 255502.
30. Tikhomirov V. V. Simulation of Multi-GeV electron energy losses in crystals // Nucl. Instrum. Meth. B. 1989. Vol. 36, issue 3. P. 282–285.
31. Steering of a sub-GeV electron beam through planar channeling enhanced by rechanneling / A. Mazzolari [et al.] // Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 112, № 13. Article ID 135503.
32. Measurement of three-jet production cross-sections in *pp* collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector / G. Aad [et al.] // Eur. Phys. J. C. 2015. Vol. 75. P. 228.
33. Measurement of the differential and double-differential Drell – Yan cross section in *pp* collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV / S. Chatrchyan [et al.] // JHEP. 2013. Vol. 12. P. 030.

34. Radiative corrections beyond the ultra relativistic limit in unpolarized ep elastic and Moller scatterings for the PRad Experiment at Jefferson Laboratory / I. Akushevich [et al.] // Eur. Phys. J. A. 2015. Vol. 51, issue 1. P. 1.
35. Baryshevsky V. G. Growth of nuclear spin precession frequency of antiprotons (negative hyperons) under deceleration in matter with polarized nuclei // Phys. Lett. B. 2012. Vol. 711, issue 5. P. 394–397.
36. Shalyt-Margolin A. E. Probable Entropic Nature of Gravity in Ultraviolet and Infrared Limits. Part I. An Ultraviolet Case // Advances in High Energy Physics. 2013. Vol. 2013. Article ID 384084.
37. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes / M. V. Shuba [et al.] // Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85, issue 16. Article ID 165435.
38. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption / K. Batrakov [et al.] // Sci. Rep. 2014. Vol. 4. P. 7191.
39. Enhanced microwave-to-terahertz absorption in Graphene / K. Batrakov [et al.] // Appl. Phys. Lett. 2016. Vol. 108, issue 12. P. 123101.
40. New crystals for dual-readout calorimetry / N. Akchurin [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. Vol. 604, issue 3. P. 512–526.
41. Experimental Study of an Axial Vircator With Resonant Cavity / V. Baryshevsky [et al.] // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43, issue 10. P. 3507–3511.
42. Response of LYSO:Ce scintillation crystals to low energy gamma-rays / K. G. Afanaciev [et al.] // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. Vol. 12, issue 2. P. 319–324.
43. Improvement of radiation hardness of the sampling calorimeters based on plastic scintillators / S. V. Afanasiev [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. A. 2013. Vol. 717. P. 11–13.
44. Growth-induced non-planar magnetic anisotropy in FeCoZr – CaF₂ nanogranular films: structural and magnetic characterization / J. V. Kasiuk [et al.] // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 116, issue 4. P. 044301.
45. Oxidation controlled phase composition of FeCo(Zr) nanoparticles in CaF₂ matrix / J. V. Kasiuk [et al.] // Mater. Character. 2016. Vol. 113. P. 71–81.
46. Measuring of ultrahigh unloaded Q factor using excitation of a superconducting cavity by the electron beam / N. S. Azaryan [et al.] // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. Vol. 10, issue 7. P. 788–794.
47. Direct Determination of Volatile Compounds in Spirit Drinks by Gas Chromatography / S. V. Charapitsa [et al.] // J. Agric. Food Chem. 2013. Vol. 61, issue 12. P. 2950–2956.
48. Новый метод определения количества примесей в алкогольной продукции методом газовой хроматографии / С. В. Черепица [и др.] // Виноделие и виноградарство. 2015. № 2. С. 12–16.

REFERENCES

1. Baryshevskii V. G. Yadernaya optika polarizovannykh sred. 2nd ed. Minsk, 1995 (in Russ.).
2. Baryshevsky V. G. High-Energy Nuclear Optics of Polarized Particles. Singapore, 2012.
3. Baryshevskii V. G., Podgoretskii M. I. Yavlenie yadernoi pretsessii neitronov. Gosudarstvennyi reestr otkrytii SSSR. No. 224 s prioritom ot 3 aprelya 1964 g. (in Russ.).
4. Baryshevskii V. G., Lobashev V. M., Lyuboshits V. L., et al. Yavlenie vrashcheniya ploskosti polarizatsii zhestkikh gamma-kvantov. Gosudarstvennyi reestr otkrytii SSSR. No. 360 s prioritom ot 12 fevralya 1965 g. v chasti teoreticheskogo obosnovaniya i ot 28 iyulya 1971 g. v chasti eksperimental'nogo dokazatel'stva yavleniya (in Russ.).
5. Baryshevskii V. G. O rasseyanii sveta potokom elektronov, prokhodyashchikh cherez kristall. Dokl. AN BSSR. 1971. Vol. 15 (4). P. 306–308 (in Russ.).
6. Baryshevskii V. G., Feranchuk I. D. O perekhodnom izluchenii gamma-kvantov v kristalle. Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiz. 1971. Vol. 61, No. 3 (9). P. 944 (in Russ.).
7. Baryshevskii V. G., Dubovskaya I. Ya. Coherent Radiation of the Channelling Positron (Electron). Phys. Stat. Sol. B. 1997. Vol. 82. P. 403–412.
8. Adishchev Yu. N., Baryshevskii V. G., Vorob'ev S. A., et al. Eksperimental'noe obnaruzhenie parametricheskogo rentgenovskogo izlucheniya. Pis'ma v Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiz. 1985. Vol. 41. P. 259 (in Russ.).
9. Baryshevskii V. G. Neustoiichivost' voln v periodicheskoi srede. Dokl. AN BSSR. 1987. Vol. 31 (12). P. 1089 (in Russ.).
10. Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D. Parametric beam instability of relativistic charged particles in a crystal. Phys. Lett. A. 1984. Vol. 102 (3). P. 141–144.
11. Baryshevskii V. G. Poverkhnostnoe parametricheskoe izluchenie relyativistskikh chastits. Dokl. AN SSSR. 1988. Vol. 299. P. 1363 (in Russ.).
12. Fetter S., Cochran T. B., Grodzins L., et al. Gamma-ray Measurements of a Soviet Cruise-Missile Warhead. Science. 1990. Vol. 248. P. 828–834.
13. Pribory dlya radioekologicheskogo monitoringa. Minsk, 1996 (in Russ.).
14. Lecoq P., Annenkov A., Gektin A., et al. Inorganic Scintillators for detector Systems. Berlin ; Heidelberg, 2006.
15. Slepian G. Ya., Maksimenko S. A., Lakhtakia A., et al. Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions and surface wave propagation. Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. P. 17136–17149. DOI: 10.1103/PhysRevB.60.17136.
16. Maksimenko S. A., Slepian G. Ya. Nanoelectromagnetics of low-dimensional structures. The Handbook of Nanotechnology: Nanometer Structures, Theory, Modeling, and Simulation. Ed. A. Lakhtakia. Bellingham, 2004. P. 145–206. DOI: 10.1117/3.537698.ch5.
17. Maffucci A., Maksimenko S. A. Fundamental and Applied Nano-Electromagnetics. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Dordrecht, 2016. DOI: 10.1007/978-94-017-7478-9.
18. Fedotova J. A. FeCoZr – Al₂O₃ granular nanocomposite films with tailored structural, electric, magnetotransport and magnetic properties. Advances in Nanoscale Magnetism : proc. of the Int. Conf. on Nanoscale Magnetism ICNM-2007 (Istanbul, Turkey, 25–29 June 2007). [Germany], 2008. P. 231–367.
19. Maximenko A., Fedotova J., Marszalek M. Magnetic characteristics of CoPd and FePd antidot arrays on nanoporous Al₂O₃ templates. J. Magn. Magn. Mater. 2016. Vol. 400. P. 200–205.
20. Tikhomirov V. V., Tselkov Yu. A. How particle collisions increase the rate of accretion from the cosmological background onto primordial black holes in braneworld cosmology. Phys. Rev. D. 2005. Vol. 72. 121301(R). DOI: 10.1103/PhysRevD.72.121301.

21. Shalyt-Margolin A. Gravity at All the Energy Levels. Contours of a Future Building. Saarbrücken, 2014.
22. Cherkas S. L., Kalashnikov V. L. Determination of the UV cut-off from the observed value of the Universe acceleration. *J. Cosm. Astropart. Phys.* 2007. Vol. 01. P. 028. DOI: 10.1088/1475-7516/2007/01/028.
23. Institutional Development of Applied Nanoelectromagnetics: Belarus in ERA Widening, EU project BY-NanoERA, ID 266529, Call ID FP7-INCO-2010-6, 2010–2013. URL: http://cordis.europa.eu/project/rcn/96756_en.html (date of access: 11.10.2016).
24. Graphene-based revolutions in ICT and beyond, project FP7-ICT, ID 604391 Graphene, Call ID FP7-ICT-2013-FET-F, 2013–2016. URL: http://cordis.europa.eu/project/rcn/109691_en.html (date of access: 11.10.2016).
25. Tikhomirov V. V. Multiple Volume Reflection from Different Planes Inside One Bent Crystal. *Phys. Lett. B.* 2007. Vol. 655, issue 5/6. P. 217–222.
26. Scandale W., Vomiero A., Bagli E., et al. First observation of multiple volume reflection by different planes in one bent silicon crystal for high-energy protons. *Phys. Lett. B.* 2009. Vol. 682, issue 3. P. 274–277.
27. Scandale W., Vomiero A., Bagli E., et al. Observation of multiple volume reflection by different planes in one bent silicon crystal for high-energy negative particles. *Europhys. Lett.* 2011. Vol. 93, No. 5. P. 56002.
28. Guidi V., Bandiera L., Tikhomirov V. V. Radiation generated by single and multiple volume reflection of ultrarelativistic electrons and positrons in bent crystals. *Phys. Rev. A.* 2012. Vol. 86, issue 4. P. 042903.
29. Bandiera L., Bagli E., Guidi V., et al. Broad and Intense Radiation Accompanying Multiple Volume Reflection of Ultrarelativistic Electrons in a Bent Crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 111, issue 25. P. 255502.
30. Tikhomirov V. V. Simulation of Multi-GeV electron energy losses in crystals. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 1989. Vol. 36, issue 3. P. 282–285.
31. Mazzolari A., Bagli E., Bandiera L., et al. Steering of a sub-GeV electron beam through planar channeling enhanced by rechanneling. *Phys. Rev. Lett.* 2014. Vol. 112, No. 13. Article ID 135503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.135503.
32. Aad G., Abbott B., Abdallah J., et al. Measurement of three-jet production cross-sections in pp collisions at 7 TeV centre-of-mass energy using the ATLAS detector. *Eur. Phys. J. C.* 2015. Vol. 75. P. 228. DOI: 10.1140/epjc/s10052-015-3363-3.
33. Chatrchyan S., Khachatryan V., Sirunyan A. M., et al. Measurement of the differential and double-differential Drell – Yan cross section in pp collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *JHEP.* 2013. Vol. 12. P. 030. DOI: 10.1007/JHEP12(2013)030.
34. Akushevich I., Gao H., Ilyichev A., et al. Radiative corrections beyond the ultra relativistic limit in unpolarized ep elastic and Moller scatterings for the PRad Experiment at Jefferson Laboratory. *Eur. Phys. J. A.* 2015. Vol. 51, issue 1. P. 1. DOI: 10.1140/epja/i2015-15001-8.
35. Baryshevsky V. G. Growth of nuclear spin precession frequency of antiprotons (negative hyperons) under deceleration in matter with polarized nuclei. *Phys. Lett. B.* 2012. Vol. 711, issue 5. P. 394–397. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.04.031.
36. Shalyt-Margolin A. E. Probable Entropic Nature of Gravity in Ultraviolet and Infrared Limits. Part I. An Ultraviolet Case. *Advances in High Energy Physics.* 2013. Vol. 2013. Article ID 384084. DOI: 10.1155/2013/384084.
37. Shuba M. V., Paddubskaya A. G., Kuzhir P. P., et al. Experimental evidence of localized plasmon resonance in composite materials containing single-wall carbon nanotubes. *Phys. Rev. B.* 2012. Vol. 85, issue 16. Article ID 165435. DOI: 10.1103/PhysRevB.85.165435.
38. Batrakov K., Kuzhir P., Maksimenko S., et al. Flexible transparent graphene/polymer multilayers for efficient electromagnetic field absorption. *Sci. Rep.* 2014. Vol. 4. P. 7191.
39. Batrakov K., Kuzhir P., Maksimenko S., et al. Enhanced microwave-to-terahertz absorption in Graphene. *Appl. Phys. Lett.* 2016. Vol. 108, issue 12. P. 123101. DOI: 10.1063/1.4944531.
40. Akchurin N., Bedeschi F., Cardini A., et al. New crystals for dual-readout calorimetry. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2009. Vol. 604, issue 3. P. 512–526. DOI: 10.1016/j.nima.2009.03.101.
41. Baryshevsky V., Gurinovich A., Gurnevich E., et al. Experimental Study of an Axial Vircator With Resonant Cavity. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. Vol. 43, issue 10. P. 3507–3511. DOI: 10.1109/TPS.2015.2439332.
42. Afanaciev K. G., Avrtikov A. M., Baranov V. Yu., et al. Response of LYSO:Ce scintillation crystals to low energy gamma-rays. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. Vol. 12, issue 2. P. 319–324. DOI: 10.1134/S1547477115020028.
43. Afanasiev S. V., De Barbaro P., Golutvin I. A., et al. Improvement of radiation hardness of the sampling calorimeters based on plastic scintillators. *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2013. Vol. 717. P. 11–13. DOI: 10.1016/j.nima.2013.03.051.
44. Kasiuk J. V., Fedotova J., Przewoznik J., et al. Growth-induced non-planar magnetic anisotropy in FeCoZr – CaF₂ nanogranular films: structural and magnetic characterization. *J. Appl. Phys.* 2014. Vol. 116, issue 4. P. 044301. DOI: 10.1063/1.4891016.
45. Kasiuk J. V., Fedotova J., Przewoznik J., et al. Oxidation controlled phase composition of FeCo(Zr) nanoparticles in CaF₂ matrix. *Mater. Character.* 2016. Vol. 113. P. 71–81. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.01.010.
46. Azaryan N. S., Baturitsky M. A., Budagov Yu. A., et al. Measuring of ultrahigh unloaded Q factor using excitation of a superconducting cavity by the electron beam. *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. Vol. 10, issue 7. P. 788–794. DOI: 10.1134/S1547477114010063.
47. Charapitsa S. V., Kavalenka A. N., Kulevich N. V., et al. Direct Determination of Volatile Compounds in Spirit Drinks by Gas Chromatography. *J. Agric. Food Chem.* 2013. Vol. 61, issue 12. P. 2950–2956. DOI: 10.1021/jf3044956.
48. Cherepitsa S. V., Sytova S. N., Zakharov M. A., et al. New Method of Determining the Amount of Impurities in Alcohol Products by Gas Chromatography. *Vinodelie i vinogradarstvo.* 2015. No. 2. P. 12–16 (in Russ.).

Статья поступила в редколлегию 31.10.2016.
Received by editorial board 31.10.2016.