ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ С ИНСТИТУТАМИ, УНИВЕРСИТЕТАМИ И ПРЕДПРИЯТИЯМИ БЕЛОРУССИИ

**Материалы круглого стола,
проведенного в ходе работы 91-й сессии
Ученого совета ОИЯИ
17 января 2002 г.**

Под общей редакцией
В. Г. Кадышевского, А. Н. Сисакяна

Дубна 2002

Составители
В. М. Жабицкий, Т. Я. Жабицкая, Н. И. Сисакян, Б. М. Старченко

Фото *Ю. А. Туманова, П. Е. Колесова*

Сотрудничество ОИЯИ с институтами, университетами и предприятиями Бе-
С67 лоруссии: Материалы круглого стола, 17 января 2002 г. / Под общ. ред. В. Г. Кадышевского, А. Н. Сисакяна. — Дубна: ОИЯИ, 2002. — 84 с.; 52 фото.

ISBN 5-85165-708-1

В сборник включены выступления на заседании круглого стола, состоявшемся 17 января 2002 г. в ходе работы 91-й сессии Ученого совета ОИЯИ. В работе круглого стола приняли участие как ученые ОИЯИ, так и представители белорусских научных центров, университетов и промышленных предприятий, сотрудничающих с Объединенным институтом ядерных исследований.

Книга широко иллюстрирована фотографиями, которые были представлены на фотовыставке «Белоруссия в ОИЯИ», приуроченной к этому заседанию, а также снимками, сделанными 17 января 2002 г.

ISBN 5-85165-708-1

© Объединенный институт ядерных исследований, 2002

ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

В. Г. Кадышевский

академик РАН,
директор Объединенного института ядерных исследований

Уважаемые члены Ученого совета, уважаемые гости, коллеги и друзья!

От имени дирекции Объединенного института ядерных исследований я приветствую вас, участников круглого стола, посвященного рассмотрению различных аспектов сотрудничества ОИЯИ с исследовательскими центрами, университетами и организациями Республики Белоруссии.

Академик А. И. Лесникович, Полномочный Представитель Республики Белоруссии в ОИЯИ, полгода назад выступил с предложением провести заседание круглого стола «Белоруссия в ОИЯИ», и сегодня этот замысел осуществляется. Нынешнее заседание — третье по счету (напомню, что аналогичные обсуждения были посвящены рассмотрению сотрудничества ученых ОИЯИ с физиками России и Польши). Фотовыставка, которую мы открыли утром вместе с господином В. И. Недилько, заместителем председателя Комитета по науке при Совете Министров Республики Белоруссии, является прологом настоящего заседания. Мы были рады увидеть многих наших белорусских коллег на фотографиях.

С 1991 г. Белоруссия является страной-участницей нашего Института и играет важную роль в формировании научной политики Объединенного института, реализации исследовательской программы и создании уникального экспериментального оборудования.

В настоящее время более 20 научных центров и университетов Республики Белоруссии сотрудничают с ОИЯИ в области теоретической физики, физики частиц, ядерной физики и физики конденсированных сред. Белорусские ученые принимают активное участие в экспериментах на базовых установках Института, в проектировании и создании современной измерительной и регистрирующей аппаратуры, в обработке данных, а также в реализации образовательной программы ОИЯИ. Весомый вклад вносят промышленные предприятия Белоруссии в создание уникального оборудования для современных детекторов на установках в Дубне и в сотрудничающих с ОИЯИ научных центрах. Дирекция Института благодарна академику А. И. Лесниковичу за его постоянное внимание к нашим проблемам, за его большой личный вклад в развитие сотрудничества физиков из Дубны и белорусских научных центров и университетов.

Ведущие ученые Белоруссии принимают активное участие в работе научных и научно-координационных органов ОИЯИ. Это, например, профессора Н. М. Шу-

мейко и С. К. Рахманов, которые являются членами Ученого совета нашего Института. Известные белорусские ученые являются также членами программно-консультативных комитетов ОИЯИ.

В заключение я хотел бы выразить надежду, что сегодняшнее заседание будет способствовать дальнейшему успешному сотрудничеству ОИЯИ с белорусскими учеными, физиками всех государств-членов, а также с другими партнерами Объединенного института из различных стран мира.

ПРИВЕТСТВИЕ

С. В. Калашников

заместитель государственного секретаря Совета Министров
Союзного государства России и Белоруссии

Господа, уважаемые коллеги!

Позвольте мне от имени Совета Министров Союзного государства России и Белоруссии приветствовать участников сегодняшнего круглого стола, на котором Республика Белоруссия представит свои достижения в области фундаментальных исследований, в самой, наверное, интересной сфере человеческого знания, связанной с изучением структуры материи, строения атомного ядра, материаловедением.

Я хотел бы высказать только одну мысль. Интеграционные процессы, которые сейчас идут в обществе, определяются теми интеграционными процессами, которые происходят в различных секторах человеческой практики и, прежде всего, в интеллектуальной сфере. Я позволю себе высказать мысль, что история развития науки во многом повторяет историю развития человечества, по крайней мере, эти две модели весьма и весьма соприкасающиеся. Побывав сегодня в Дубне, в международном центре, я убедился, насколько за эти десятилетия международный центр смог реализовать интеграционные процессы, без которых невозможна современная наука, воссоздать в своей области то единое научное пространство, без которого не может существовать ученый.

Я хотел бы пожелать, чтобы и сегодняшний круглый стол стал таким дополнительным фактором, который формирует единое научное пространство всего земного шара и отдельных его частей и в то же время является важным стимулом для развития конкретных двусторонних, многосторонних отношений, оказывающих положительное влияние на интеграцию во всех других областях. Я считаю, что проведение вот такого круглого стола будет способствовать дальнейшему развитию взаимоотношений между всеми странами-участницами, представители которых присутствуют здесь за круглым столом, в частности и в рамках Союзного государства России и Белоруссии. Я хочу пожелать вам успешной работы.

Спасибо!

БЕЛОРУССИЯ В ОИЯИ

В. И. Недилько

заместитель председателя Комитета по науке
при Совете Министров Республики Белоруссии

Глубокоуважаемые члены Ученого совета Объединенного института ядерных исследований, почетные гости, дамы и господа!

В этом году исполняется десять лет, как Республика Белоруссия является членом Объединенного института ядерных исследований. Это весьма короткий срок. Тем не менее для нас это вполне знаменательная дата. И в своем вступительном слове я хочу кратко обрисовать участие белорусских ученых и инженеров в деятельности Объединенного института, а также роль ОИЯИ в развитии науки и технологий в нашей стране. Но прежде всего я хотел бы от своего имени, от имени Полномочного Представителя Совета Министров Республики Белоруссии в ОИЯИ академика Лесниковича выразить сердечную признательность руководству Института за возможность посетить ОИЯИ, принять участие в работе Ученого совета, за организацию круглого стола, научно-технической выставки и фотовыставки «Белоруссия в ОИЯИ».

Вот уже десять лет Белоруссия является государством-членом Института. После заявления о вступлении в ОИЯИ, сделанного в декабре 1991 г., в марте 1992 г. Правительство Республики Белоруссии специальным документом оформило и одобрило это вступление и назначило своего первого Полномочного Представителя в ОИЯИ. Это присутствующий здесь уважаемый профессор Шумейко Николай Максимович, член Ученого совета ОИЯИ. Полномочному Представителю было поручено формировать в тесной увязке с проблемно-тематическими планами НИР и международного сотрудничества ОИЯИ годовые координационные планы научно-исследовательских работ, выполняемых в вашем Институте с участием учреждений и организаций Республики Белоруссии. В том же 1992 г. Правительство Белоруссии принимает решение о механизме выделения средств для выплаты долевого взноса ОИЯИ. А в феврале 1993 г. создает новый институт — Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий при Белорусском государственном университете как головную организацию по сотрудничеству с ОИЯИ и другими международными и зарубежными национальными научными организациями по физике микромира.

Конечно, сотрудничество научных центров Белоруссии с ОИЯИ началось не вчера и не десять лет назад. Студенты, аспиранты, научные сотрудники из БГУ, Академии наук, Гомельского университета, других научных организаций и выс-

ших учебных заведений в бывшей еще Белорусской Советской Социалистической Республике начали сотрудничать с ОИЯИ практически с первых лет образования Института. И трудно переоценить роль Объединенного института в становлении и развитии ядерных исследований и технологий в Белоруссии. В стенах ОИЯИ защитили диссертации десятки кандидатов и четырнадцать докторов наук, работающих ныне в нашей стране. В частности, присутствующие здесь директора трех научных ядерных центров Белоруссии — воспитанники Объединенного института ядерных исследований.

В настоящее время сотрудничество Республики Белоруссии с ОИЯИ осуществляется почти по всем основным направлениям в рамках более 20 научных тем и проектов. В последние годы в них принимают участие более 150 исследователей из многих научных организаций и университетов: Белорусский государственный университет, Национальная академия наук, университеты Гомеля и других городов. Кроме того, более десяти научных сотрудников и инженеров из Белоруссии постоянно работают в Объединенном институте в течение 3–9 лет. В табл. 1 дано распределение по направлениям количества тем и участвующих в сотрудничестве белорусских институтов за последние пять лет. Эта таблица отражает заинтересованность научных центров Белоруссии в разработке тех научных направлений, которые реализуются в лабораториях Объединенного института. И вы видите, что, несмотря на многочисленные трудности, которые были последние годы, сотрудничество Белоруссии и ОИЯИ остается устойчивым и не подверженным конъюнктурным колебаниям.

Таблица 1

Научные направления	Кол-во тем/институтов по годам				
	1997	1998	1999	2000	2001
Физика элементарных частиц	9/11	10/7	9/8	9/7	10/8
Релятивистская ядерная физика	6/4	4/2	4/2	4/2	3/3
Физика конденсированных сред	2/4	2/2	2/4	3/5	3/9
Теоретическая физика	2/7	2/6	2/5	3/5	3/9
Физика низких и промежуточных энергий	4/5	4/5	4/4	2/3	2/3
Радиационные и радиобиологические исследования	1/1	1/1	1/1	1/1	2/2
Сети, компьютинг, вычислительная физика	2/2	3/3	3/2	3/2	3/5
Образовательная программа	—	1/2	1/2	1/2	1/2
ВСЕГО	26/16	27/14	26/14	26/14	27/17

Вопросами сотрудничества с ОИЯИ в Белоруссии занимается консультативный орган при Полномочном Представителе — Координационный совет по сотрудничеству с ОИЯИ, в который входят представители заинтересованных

министерств, ведомств, организаций и учреждений. Координационный совет рассматривает направления сотрудничества, проекты годовых совместных планов, отчеты по их выполнению, обсуждает ситуацию с финансированием работ в Дубне и выплатой долевого взноса. Особое внимание совет уделяет и будет уделять эффективности участия Белоруссии в ОИЯИ, адекватности усилий и средств, затраченных по направлениям и темам, реальной заинтересованности в них белорусских научных центров и государственных органов. Ожидается, что в ближайшие годы количество специалистов из Белоруссии, работающих в ОИЯИ по контрактам, не превысит 20 человек. Здесь будет действовать принцип разумного и достаточного минимума с необходимой ротацией и омоложением контингента. Основными формами сотрудничества будут, как и ранее, краткосрочные командировки, совещания, сеансы на экспериментальных установках. При этом более активно будут продвигаться в установленном порядке научные идеи и теории белорусских ученых по принципу: идея — предложение — создание коллаборации — эксперимент. Будут более активно использоваться поистине неисчерпаемые возможности ОИЯИ в подготовке кадров, в образовании научной молодежи. В частности, мы будем предлагать продолжить практику проведения в Белоруссии ставших уже традиционными международных Гомельских школ-семинаров, зародившихся и проводимых совместно с ОИЯИ и получивших высокую оценку научного сообщества Республики Белоруссии.

Различные аспекты сотрудничества Белоруссии с ОИЯИ иллюстрирует табл. 2. В ней показаны данные за период 1996–2001 гг. по взносу Белоруссии в бюджет ОИЯИ, по количеству научных сотрудников, работающих по контрактам, количеству командировок из Белоруссии в Дубну, количеству командированных сотрудников, количеству человекодней, проведенных в командировках, количеству организаций, направивших сотрудников в командировки. Как вы видите, эти цифры (они красноречивее слов) демонстрируют устойчивость, а следовательно, и взаимовыгодность нашего сотрудничества.

Таблица 2

Год	Взнос (тыс. долл.)	Кол-во научных сотрудников	Кол-во командировок	Кол-во командированных	Человеко-дни	Кол-во организаций
1996	1101,2	9	53	31	413	7
1997	1195,0	11	61	26	511	6
1998	1068,0	11	59	34	458	9
1999	1076,4	14	61	41	359	10
2000	831,6	14	96	48	657	11
2001	846,6	14	63	39	544	9

Через Объединенный институт белорусские физики и инженеры установили и развивают научно-техническое сотрудничество с другими ведущими ядерными центрами мира: ЦЕРН, DESY, FNAL, SLAC и др. Например, в настоящее время через ОИЯИ Белоруссия участвует в двух крупнейших экспериментах ЦЕРН: CMS и ATLAS. При этом наиболее масштабным и ответственным является участие научных центров и предприятий Белоруссии в проекте CMS, в котором высокотехнологичный и материальный вклады нашей страны (за счет средств долевого взноса) покрывают львиную долю обязательств ОИЯИ.

Таким образом, сотрудничество с Объединенным институтом ядерных исследований является чрезвычайно важным и необходимым для развития в Белоруссии ядерных технологий, интеграции белорусских ученых в международные исследования и подготовки кадров в этой области, способствует развитию новых высоких технологий на предприятиях, повышению их роли на мировом рынке. Поэтому, по нашему мнению и желанию, это сотрудничество будет развиваться и впредь.

Благодарю вас за внимание.

СОТРУДНИЧЕСТВО НЦ ФЧВЭ БГУ И ОИЯИ

Н. М. Шумейко

директор Национального центра физики частиц
и высоких энергий БГУ, Минск,
член Ученого совета ОИЯИ

Начать свое сообщение о сотрудничестве белорусских ученых с физиками ОИЯИ я хотел бы с небольшого дополнения к докладу Владимира Иосифовича Недилько. Оно касается участия организаций Министерства образования и Национальной академии наук Белоруссии в проектах Объединенного института ядерных исследований. В таблице приведены данные 2001 г. о количестве научных тем, по которым белорусскими и дубненскими учеными проводятся совместные исследования по различным направлениям.

Пять больших подразделений Белорусского государственного университета (BSU) участвуют в программах ОИЯИ: физический факультет (DP), Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий (NC PHEP), Научно-исследовательский институт ядерных проблем (RINP), Научно-исследовательский институт физико-химических проблем (RIPCP) и Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем (RIAPP). Наряду с Белорусским государственным университетом, с ОИЯИ сотрудничают Гомельский государственный университет (GSU), Гомельский государственный технический университет (GSTU). Сотрудничество характеризуется стабильными показателями. Вместе с тем отмечу, что в последние годы увеличивается доля учреждений, которые участвуют в исследованиях по физике конденсированных сред.

Восемь научных центров Национальной академии наук Белоруссии ведут совместные исследования с физиками ОИЯИ. Это находящиеся в Минске Институт физики им. Б. И. Степанова (IP), Институт молекулярной и атомной физики (IAMP), Институт радиационных физико-химических проблем (IRPCP), Институт энергофизики (IEP) Академического научно-технического комплекса «Сосны», Институт радиобиологии (IRB), Институт математики (IM), Институт физики твердого тела и полупроводников (ICM), а также Институт механики металлополимерных систем (IMPMS), расположенный в Гомеле. По данным приведенной таблицы вы можете судить, какова активность в конкретных темах различных организаций, участвующих в сотрудничестве с ОИЯИ.

Отмечу, что в таблице не приведены данные еще по нескольким организациям других ведомств и министерств. Отведенное на мой доклад время не позволяет

представить исчерпывающую информацию. Однако подчеркну, что 24 организации Белоруссии являются партнерами ОИЯИ.

Scientific fields distribution of subject quantities and Byelorussian institutions in 2001

Scientific fields	Institutes of the Ministry of Education							Institutes of the National Academy of Sciences							
	BSU					GSU	GSTU	IP	IAMP	IRPCP	IEP	IRB	IM	ICM	IMPMS
	DP	NC PHEP	RINP	RIPCP	RIAPP										
Particle physics	2	6	4	–	1	2	–	4	–	–	–	–	–	1	–
Relativistic nuclear physics	–	–	1	–	–	–	–	–	–	1	1	–	–	–	–
Physics of condensed matter	2	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	1	1
Theoretical Physics	–	1	–	–	–	1	1	2	1	1	–	–	–	–	–
Physics of low and intermediate energies	–	2	1	–	–	–	–	2	–	–	–	–	–	–	–
Radiation and radiobiology research	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–
Networks, computing, computational physics	2	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–
Education	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Sum total	8	12	7	1	2	3	1	8	1	2	1	1	1	2	1

Несколько слов о сотрудничестве ОИЯИ и Белорусского государственного университета. О важности этой деятельности руководство университета поручило мне сообщить. Белорусский университет — старейший и самый большой в республике. Он основан в 1921 г. Более 20 тысяч студентов обучаются в нем. Постановлением правительства и указом президента нашей страны университет признан ведущим высшим учебным заведением в системе образования Белорусской Республики. Взаимодействие Белорусского государственного университета с Объединенным институтом ядерных исследований регулирует генеральное соглашение, подписанное директором ОИЯИ академиком В. Г. Кадышевским и ректором нашего университета профессором А. В. Козулиным.

Теперь я перейду конкретно к характеристике сотрудничества ОИЯИ с Национальным научно-учебным центром физики частиц и высоких энергий Белорусского государственного университета (НЦ ФЧВЭ БГУ). Как уже сказал В. И. Недилько, 1993 г. — год основания нашего центра. Сейчас в него входит че-

тыре исследовательских лаборатории: фундаментальных взаимодействий, физики частиц, квантовой теории поля, электронных методов и средств эксперимента.

При образовании центра основные направления его деятельности были определены соответствующим постановлением белорусского правительства. Это теоретические и экспериментальные исследования свойств фундаментальных взаимодействий и структуры микрочастиц при высоких энергиях; разработка систем регистрации, съема и обработки данных высокоэффективных систем при экстремальных условиях, например, в условиях чрезвычайно жесткой радиации и высоких температур; участие в повышении квалификации научных сотрудников, проводящих исследования в области физики микромира, а также оказание содействия учреждениям высшей школы Республики Белоруссии в подготовке кадров. Одной из задач центра является организационное обеспечение работ, которые проводятся научными организациями и университетами Республики Белоруссии совместно с Объединенным институтом ядерных исследований. И, наконец, центр оказывает содействие государственным ведомствам республики в координации участия белорусских ученых в деятельности различных организаций, занимающихся исследованиями по физике элементарных частиц.

Давая характеристику каждому из перечисленных выше направлений, я хотел бы начать с пункта, связанного с обеспечением содействия образованию научной молодежи и подготовке кадров. Наш центр совместно с Объединенным институтом ядерных исследований, рядом гомельских организаций и Институтом физики Академии наук возобновил в 1997 г. организацию и проведение школ-семинаров, получивших название Гомельских школ. Они являются чрезвычайно ценными для образования научной молодежи. Фактически все молодые физики, проводящие ныне исследования в Белоруссии в области физики микромира, были в свое время слушателями Гомельских школ. Здесь они прошли прекрасную подготовку, познакомились с самыми последними научными достижениями. Сегодня многие из них стали известными учеными, создателями и руководителями крупных научных коллективов и учреждений в Белоруссии.

Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий оказывает необходимое содействие Полномочному Представителю правительства Республики Белоруссии в Объединенном институте ядерных исследований, а также уполномоченным государственным органам в организации всех сторон деятельности по сотрудничеству Республики Белоруссии с ОИЯИ. Научно-организационная сторона такой работы осуществляется в рамках рекомендаций координационного совета, о котором говорил В. И. Недилько. Наш центр также принимает участие в организации работ белорусских институтов и предприятий по выполнению обязательств Республики Белоруссии в рамках долевого взноса в ОИЯИ. Короче говоря, сотрудниками центра выполняется вся необходимая работа в соответствии с поручениями Полномочного Представителя и полномочных орга-

нов Белоруссии по взаимодействию с Объединенным институтом ядерных исследований.

Теперь несколько слов о научном сотрудничестве нашего центра с ОИЯИ. Поскольку у меня довольно мало времени, я расскажу об основных направлениях совместной деятельности с физиками Объединенного института ядерных исследований. Прежде всего — о масштабных разработках, которые проводятся совместно с ОИЯИ в рамках общих программ с ЦЕРН.

На Минском машиностроительном заводе им. Октябрьской революции (МЗОР) осуществляется разработка и создание абсорбера и интерфейсной системы адронного калориметра установки CMS. Создание больших уникальных интегральных схем, многие другие электронные разработки проводятся на НПО «Интеграл» в Минске и на Минском заводе печатных плат. Здесь разработано около 30 типов интегральных схем и около десяти типовых интегральных печатных плат. Электронные разработки предназначены для мюонного детектора эксперимента CMS, а также для некоторых экспериментов, выполняемых в научных центрах Российской Федерации (эксперимент ОКА в Протвино, совместные исследования в Баксанской астрофизической обсерватории Российской академии наук, а также в Институте ядерных исследований РАН). Также на Минском машиностроительном заводе им. Октябрьской революции изготавливаются некоторые компоненты для адронного и электромагнитного калориметров установки ATLAS. Подчеркну, что многие работы, особенно механические, проводятся с микронной точностью. Наши специалисты участвуют в подготовке физической программы исследований, в моделировании физических процессов в установках CMS и ATLAS, что чрезвычайно важно для белорусских ученых.

Важные теоретические исследования проводятся совместно с Лабораторией теоретической физики, а исследования по обработке экспериментальных данных — с некоторыми группами Лаборатории физики частиц и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. У этих работ очень давняя история. Многолетним является сотрудничество теоретиков в разработке процедур, учитывающих радиационные поправки в различных типах экспериментов с помощью ковариантных методов, развитых в Белоруссии и в Объединенном институте. Благодаря совместным усилиям проведены важные детальные исследования многочисленных данных, полученных в экспериментах по глубоконеупругому рассеянию, лептон-адронному и лептон-лептонному рассеянию, аннигиляции лептонов и антилептонов.

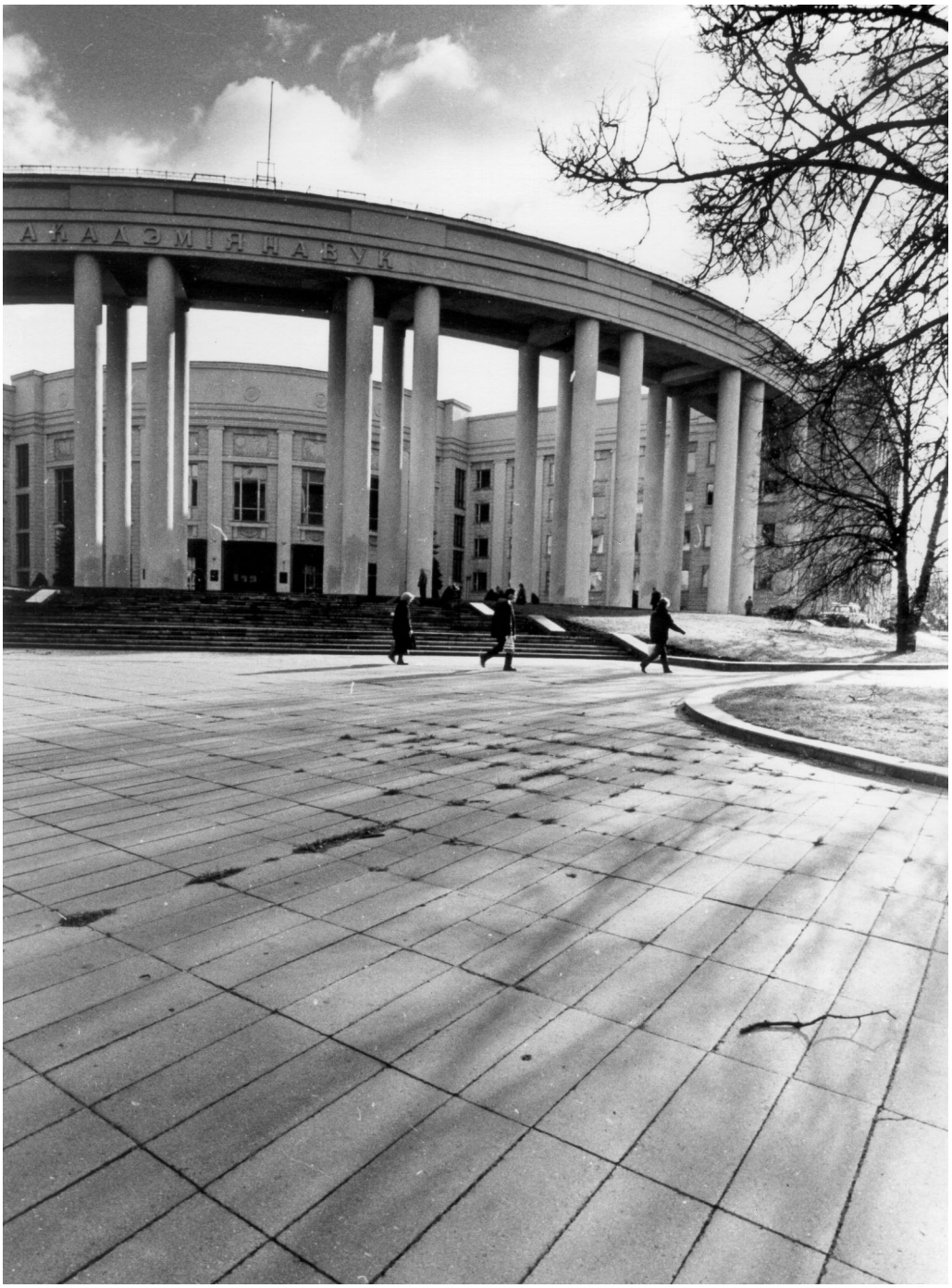
Вместе с Лабораторией нейтронной физики ОИЯИ и ускорительным отделением Лаборатории физики частиц Объединенного института мы участвуем в работах по созданию уникальной аппаратуры на белорусских предприятиях. Так, для проведения исследования в Курчатовском институте на каналах синхротронного излучения создается рентгеновский спектрометр. Для исследований по нейтронной физике в Белоруссии изготавливается рамановский фокальный спектрометр. Эти уникальные установки должны вступить в строй в текущем году.

Несколько иллюстраций по выполнению обязательств, связанных с совместными международными проектами Белоруссии–ОИЯИ–ЦЕРН. Для нас очевидно, что соединение возможностей Объединенного института ядерных исследований и белорусских научных центров, в полном согласии с нашими интересами, приводит к масштабным результатам. В подтверждение этого можно привести работы по уже созданному первому адронному абсорберу адронного калориметра установки CMS. Разработка велась много лет совместными усилиями в ОИЯИ, Белоруссии, ЦЕРН, в ряде российских институтов. Она сопровождалась моделированием различных физических процессов, адаптацией высоких технологий, связанных с микронными точностями. Изготовленная аппаратура уже доставлена в ЦЕРН, где пройдет ее дальнейшее тестирование, сборка и установка в рамках работ по эксперименту CMS.

К сожалению, на реализацию всех наших планов средств не хватает. В связи с этим, а также из-за необходимости завершить работы по другим обязательствам некоторые работы сейчас несколько замедлены как в нашем институте, так и в других институтах Белоруссии. Но они в той или иной мере востребованы и будут востребованы в различных экспериментах, где требуются разработки по электронике на европейском и мировом уровне. Например, это фотоумножители на основе микроканальных пластин из нового материала — так называемого «анодного оксида алюминия». Достоинства, которыми обладают эти приборы по сравнению с обычными фотоумножителями, связаны как со структурой самого материала, так и с разработанной технологией. Сохраняя все достоинства современных фотоумножителей и даже превышая их некоторые параметры, удалось создать фотоумножители, стоимость которых примерно на два порядка ниже стоимости этих же приборов, изготавливаемых по обычным технологиям.

Подводя итоги, хочу сказать, что сотрудничество Национального научно-учебного центра физики частиц и высоких энергий Белорусского государственного университета с Лабораторией физики частиц, Лабораторией ядерных проблем, Лабораторией нейтронной физики, Лабораторией информационных технологий, с другими подразделениями ОИЯИ позволяет добиваться не простого сложения результатов в различных направлениях исследований и разработок, а приводит к большему эффекту, увеличению выхода научно-технической продукции.

Сотрудничество с Объединенным институтом ядерных исследований, на мой взгляд, является бесценным для нас в рамках международных связей. Оно дает нам дополнительные возможности выхода на другие мировые научные центры, а также, что немаловажно, способствует распространению, как сказал В. И. Недилько, теоретических идей и разработок белорусских физиков, их применению на установках, которые отсутствуют в Белоруссии и имеются в Объединенном институте ядерных исследований и сотрудничающих институтах.



Национальная академия наук Белоруссии



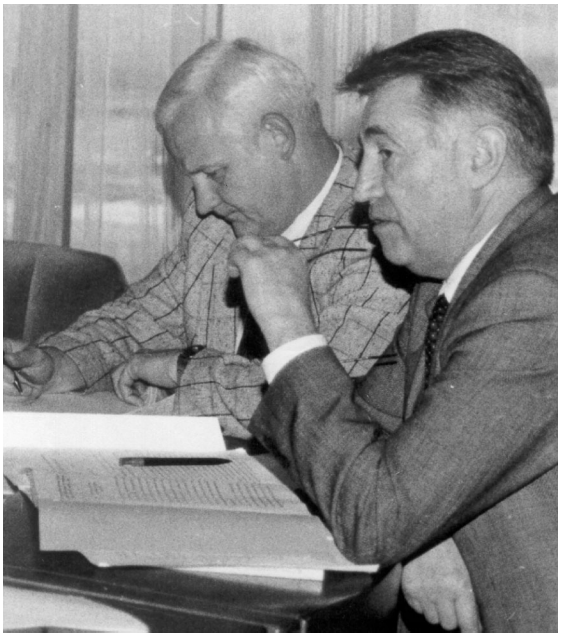
Алушта, 1987 г. VIII Международное совещание по проблемам квантовой теории поля. Член-корреспондент АН СССР Д. В. Ширков (ОИЯИ) и академик АН БССР Ф. И. Федоров (ИФ, Минск)

Дубна, 1998 г. Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ.
Н. А. Русакович и член-корреспондент РАН
В. П. Джелепов — один из основателей ОИЯИ
и инициаторов сотрудничества между ОИЯИ и Белоруссией





Дубна, 2001 г. Визит в ОИЯИ делегации белорусских ученых во главе с Полномочным Представителем правительства РБ академиком А. И. Лесниковичем (второй слева)



Дубна, 2000 г. Заседание совета Международной ассоциации академий наук. Президент НАН Белоруссии А. П. Войтович (ныне председатель парламента) (справа) и помощник президента В. К. Щербин



Гомель, 2001 г. Торжественное открытие школы-семинара
по актуальным проблемам физики элементарных частиц.
Выступает вице-директор ОИЯИ профессор А. Н. Сисакян

В зале заседаний школы-семинара





В. Н. Капшай (Белоруссия), Н. Б. Скачков (ОИЯИ),
Л. Л. Енковский (Украина)

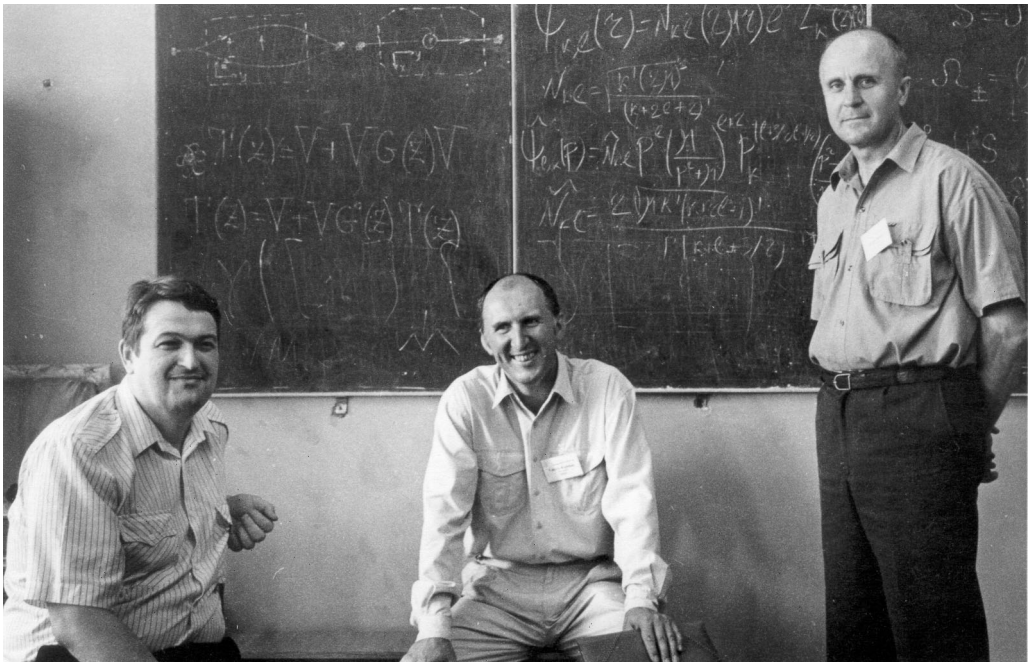
На берегу реки Сож





Заведующий кафедрой теоретической физики профессор
Н. В. Максименко и ректор Гомельского государственного
университета профессор М. В. Селькин

Физики-теоретики В. В. Андреев, В. Н. Капшай, С. Г. Шульга





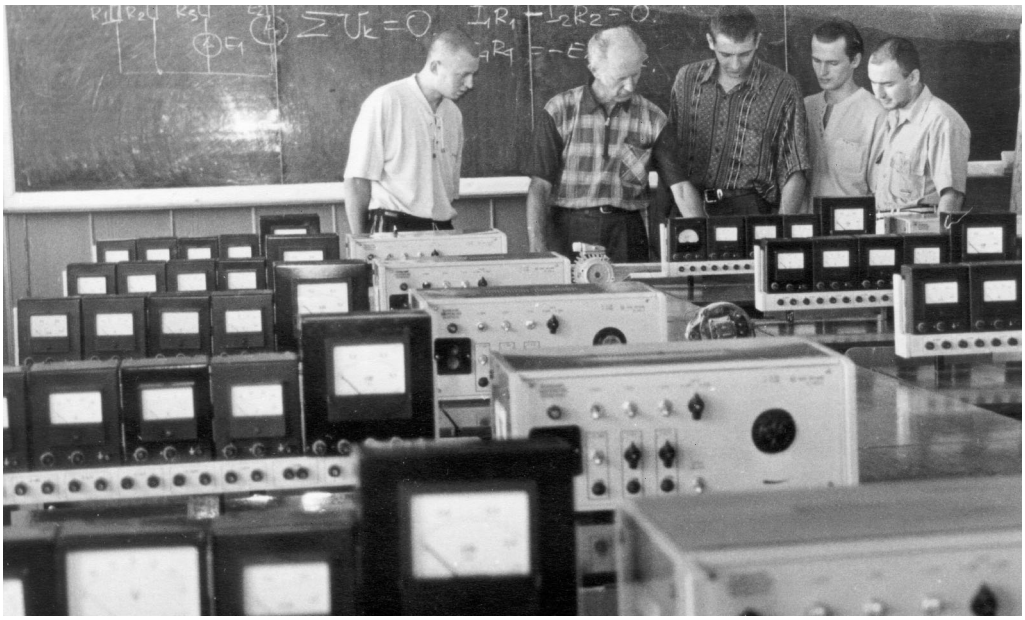
Лаборатория лазерных систем. Установка для лазерных офтальмологических операций. Инженеры С. А. Саськов и В. В. Сонько



Проректор Гомельского государственного технического университета по научной работе профессор В. М. Кенько и первый проректор профессор С. И. Тимошин



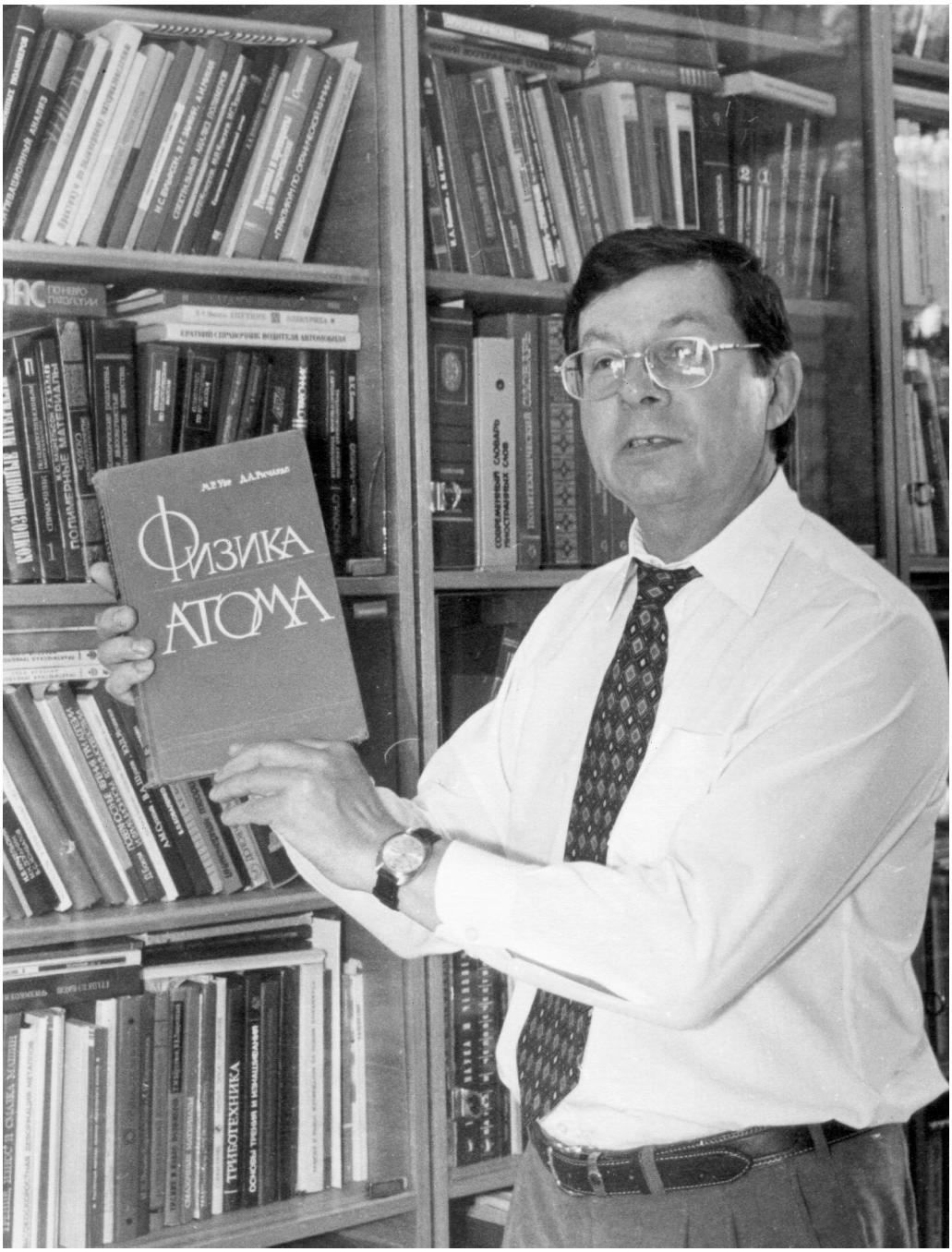
Лаборатория технической керамики и силикатов. Начальник лаборатории А. А. Бойко с образцами абразивных инструментов



Лаборатория электротехники и промышленной электроники

Лаборатория автоматизации и робототехники.
Лаборант Л. П. Цуканова и доцент М. И. Михайлов

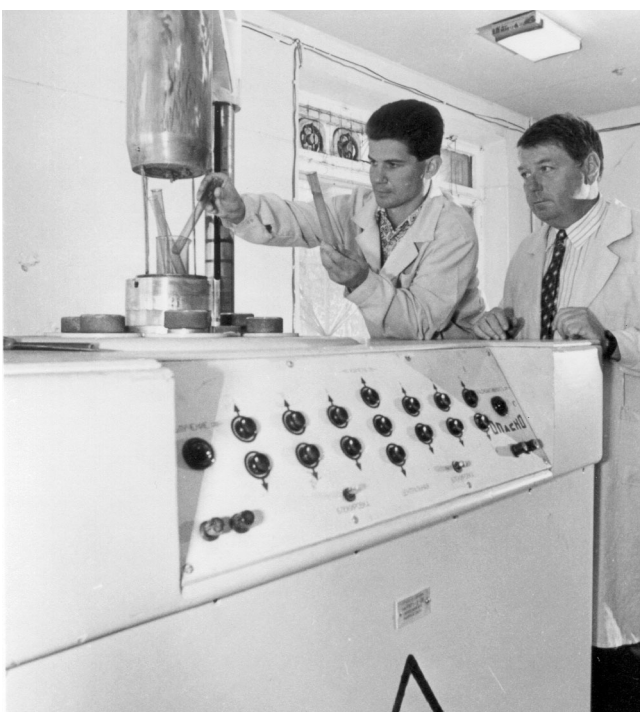




Директор Института механики металлополимерных систем
член-корреспондент НАНБ Ю. М. Плескачевский



Лаборатория адаптивных материалов. У испытательного стенда старший научный сотрудник Д. А. Черноус, заведующий лабораторией С. В. Шилько и аспирант Д. А. Конек



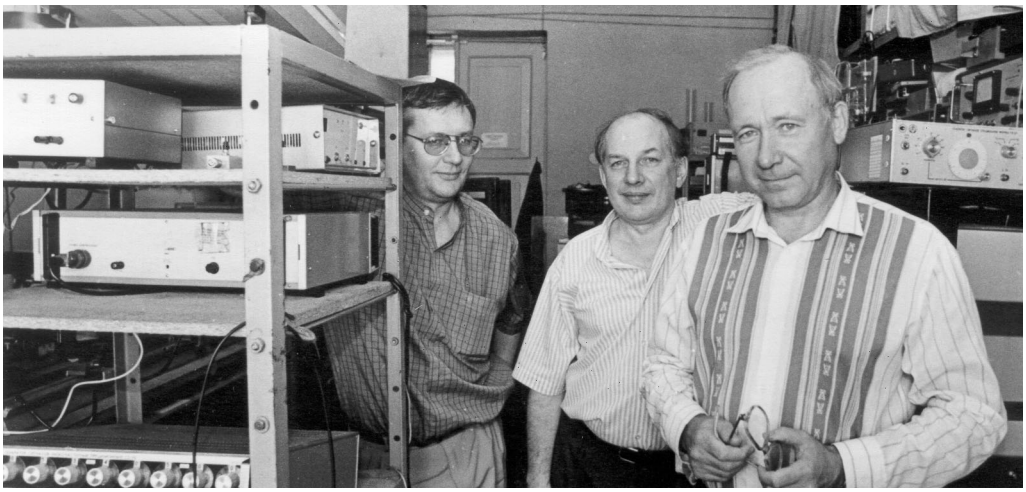
Лаборатория радиационного модифицирования материалов. У гамма-установки аспирант В. М. Станкевич и профессор В. В. Смирнов



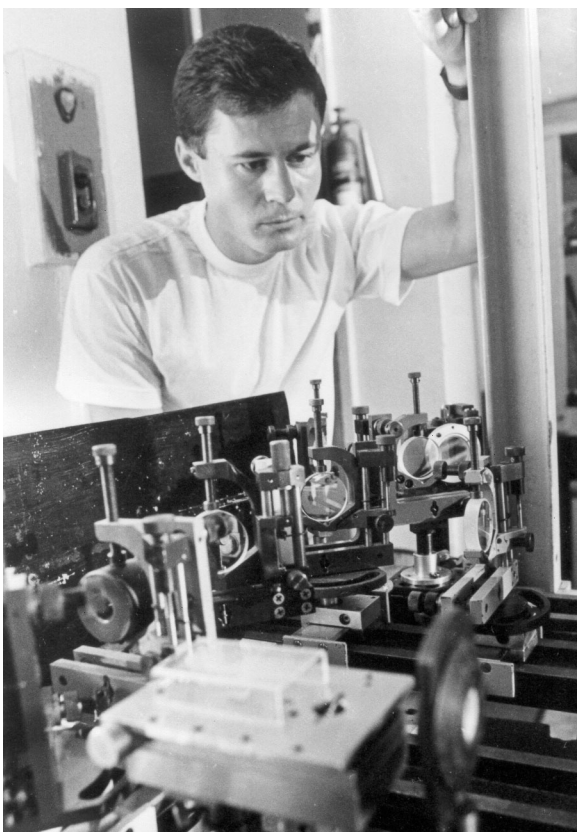
Заместитель директора
Института физики
по научной работе
член-корреспондент НАНБ
профессор В. А. Орлович

Лаборатория теоретической физики. Заведующий лабораторией
член-корреспондент НАНБ профессор Л. М. Томильчик,
профессор Е. В. Докторов, член-корреспондент НАНБ
профессор А. А. Богуш, ведущий научный сотрудник И. С. Сацункевич





Лаборатория молекулярной кинетики. Старший научный сотрудник В. С. Старовойтов, ведущие научные сотрудники В. Н. Чижевский и Б. Ф. Кунцевич



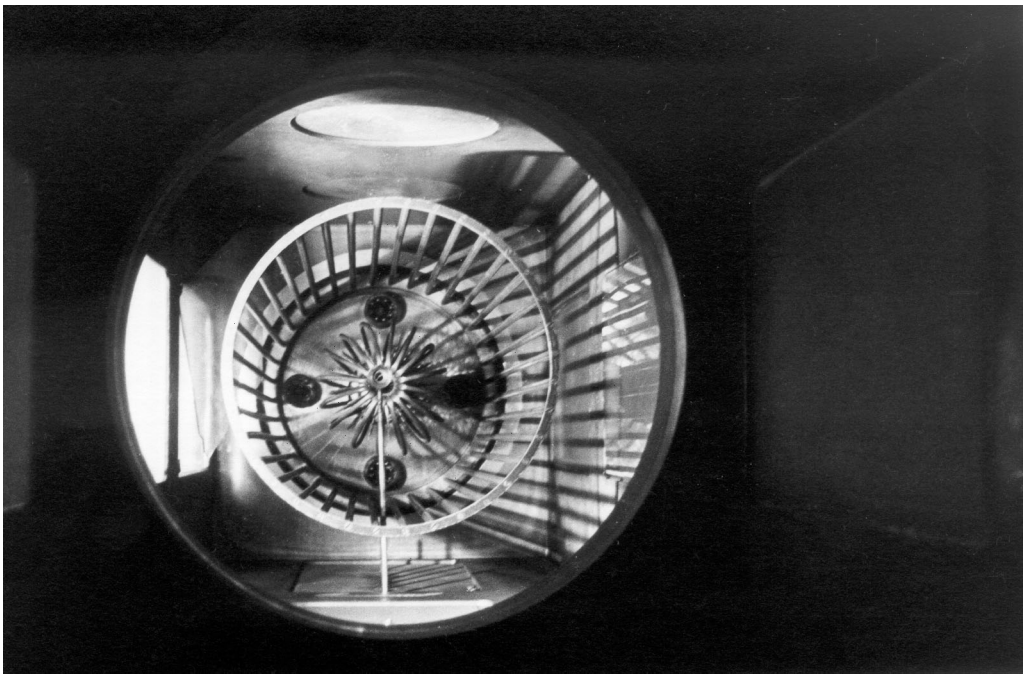
Лаборатория нелинейной оптики. У установки по исследованию квантовых шумов научный сотрудник Р. В. Чулков



Заместитель директора
Института молекулярной
и атомной физики НАНБ
профессор В. В. Машко

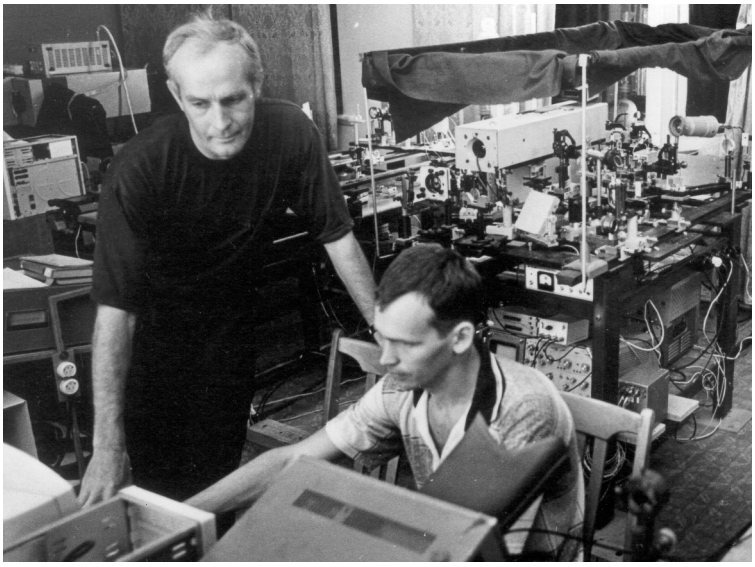
Лаборатория радиационной плазмодинамики.
Аспирант В. В. Аскерко и ведущий научный сотрудник В. М. Асташинский

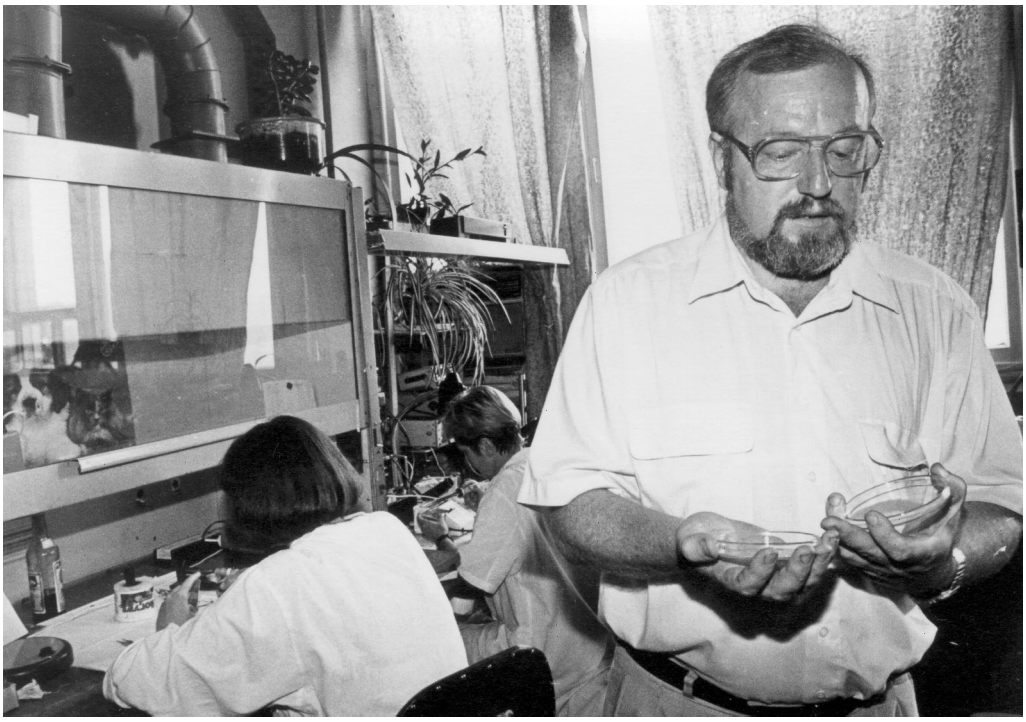




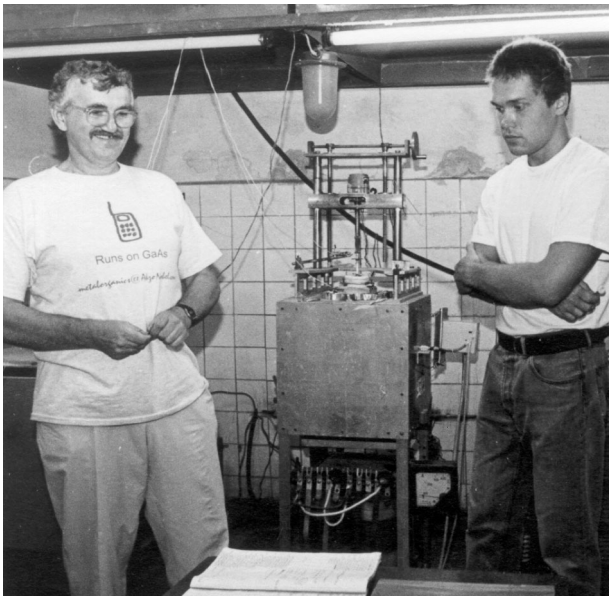
Лаборатория радиационной плазмодинамики. Внутренняя камера двухступенчатого квазистационарного плазменного ускорителя

Лаборатория физики инфракрасных лучей.
Ведущий научный сотрудник С. А. Тихомиров
и младший научный сотрудник О. В. Буганов





Отдел твердотельной электроники. Заведующий отделом
А. П. Драпезо с образцами продукции института

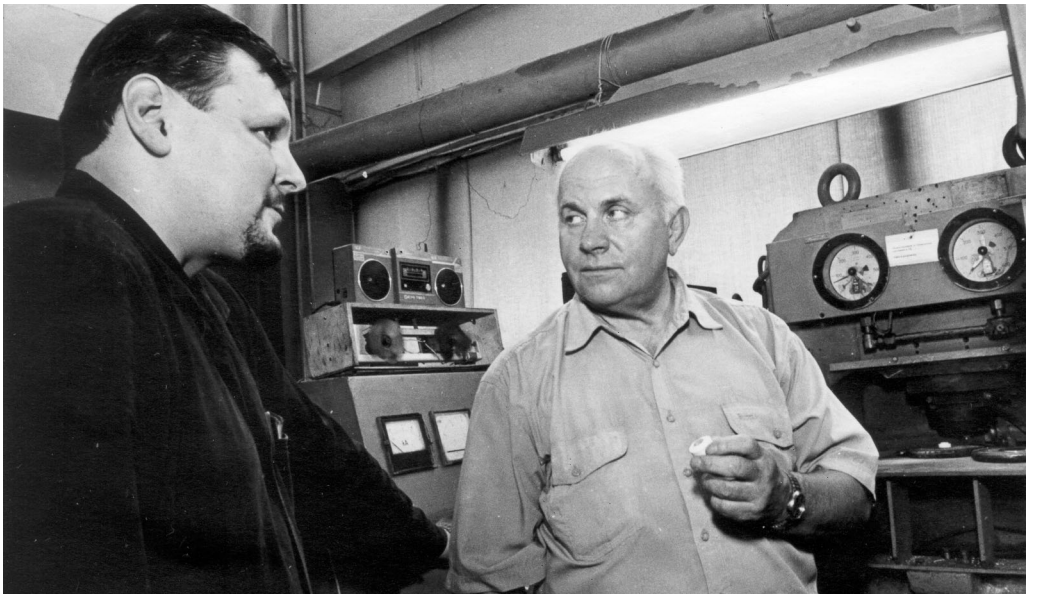


Лаборатория физики
сверхпроводящих материалов.
Заведующий лабораторией
С. Н. Барило и младший научный
сотрудник С. Н. Устинович

Заместитель директора
Института физики твердого тела
и полупроводников НАНБ
по научной работе профессор
В. М. Рыжковский



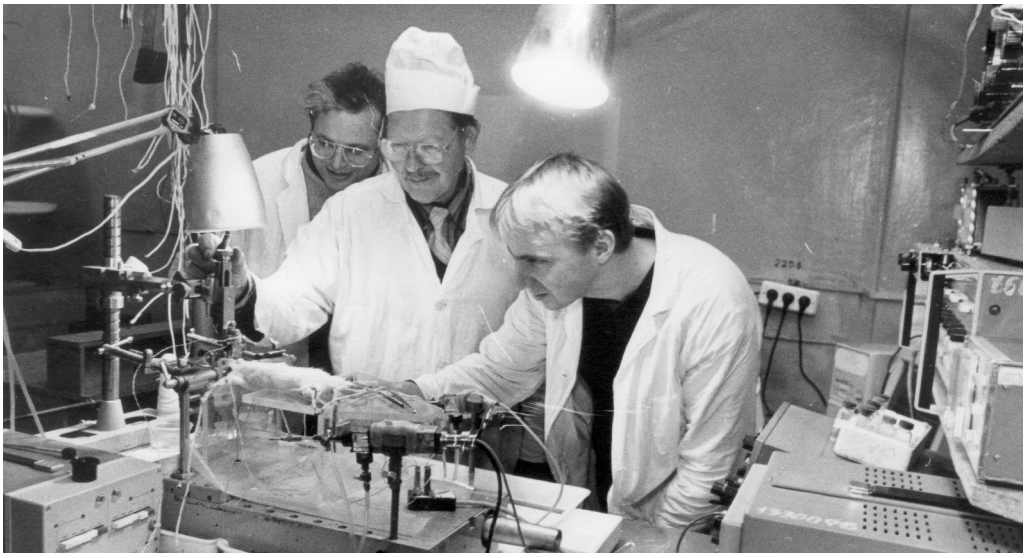
Лаборатория синтеза сверхтвердых материалов.
Лаборант Г. А. Позняков и заведующий отделом В. Б. Шипило





Директор Института радиобиологии
академик НАНБ Е. Ф. Конопля

Лаборатория физиологии. Ассистент Г. А. Прудников,
научный сотрудник В. А. Сюсюкин и аспирант Д. Г. Сташкевич
занимаются изучением нервных процессов сердечно-сосудистой системы





Лаборатория мониторинга. Младший научный сотрудник Л. А. Кузьмина, научный сотрудник И. Н. Дорожок, заведующий лабораторией В. А. Кнатько и научный сотрудник И. И. Ивашкевич

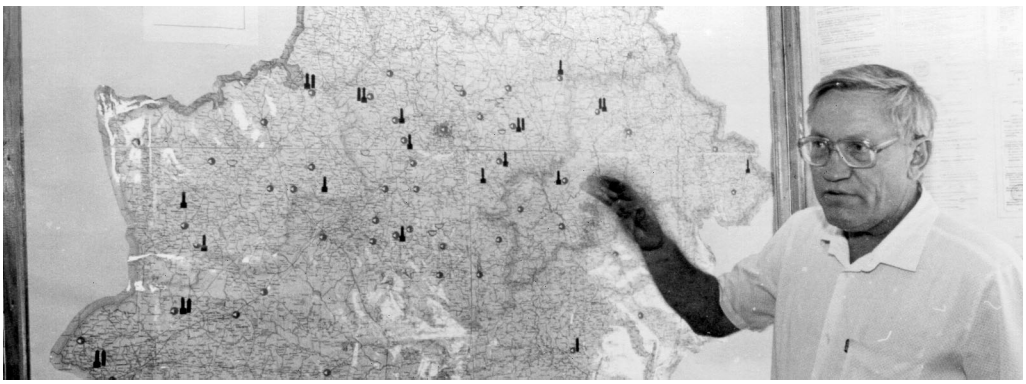
Лаборатория физиологии. Работы по изучению структурно-функционального состояния рецепторов ведет научный сотрудник Е. С. Комар





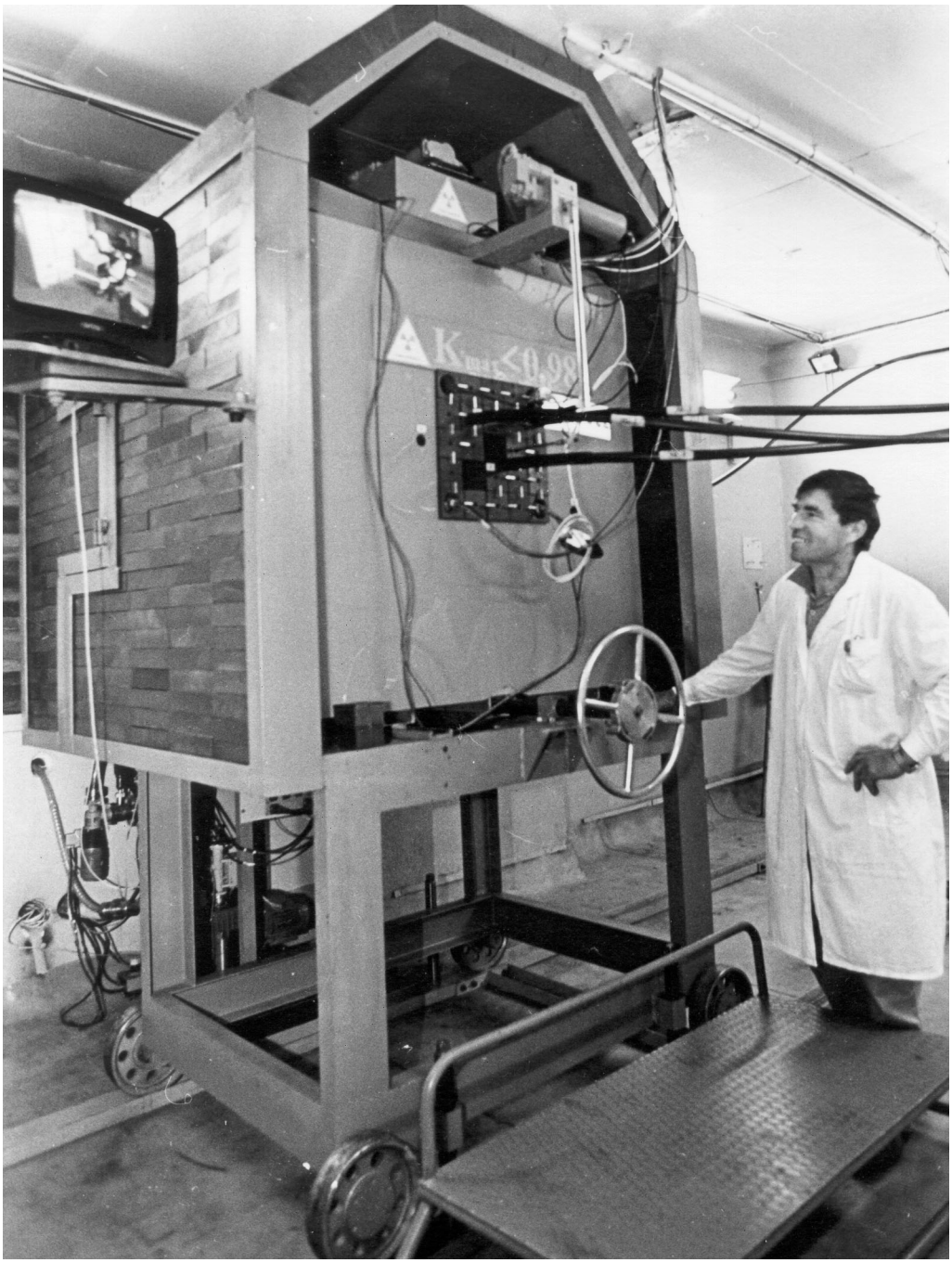
Генеральный директор
Академического
научно-технического
комплекса «Сосны»
С. Е. Чигринов

Директор Института
радиоэкологических проблем
В. В. Скурат



Институт проблем энергетики. Лаборатория радиохимии.
Начальник сектора радиоизотопных технологий П. А. Павлюкович

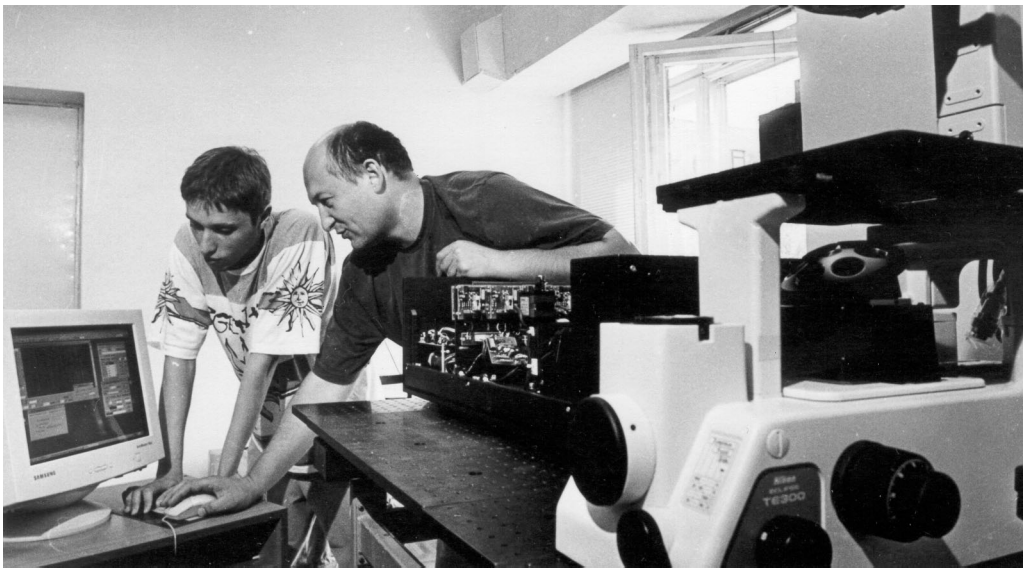




Институт радиационных физико-химических проблем.
У подкритической сборки «Яліна» начальник стенда И. Г. Серафимович



Институт математики НАНБ. Заместитель директора института
профессор П. И. Соболевский, ученый секретарь А. А. Сенько,
заведующий отделом стохастического анализа профессор А. Д. Егоров,
ведущий инженер А. В. Жерело и старший научный сотрудник Д. В. Синькевич



Белорусско-японское совместное предприятие «SOLAR TII».
У конфокального микроскопа «Nanofinder»
инженер П. М. Ярощик и директор предприятия В. Д. Копачевский

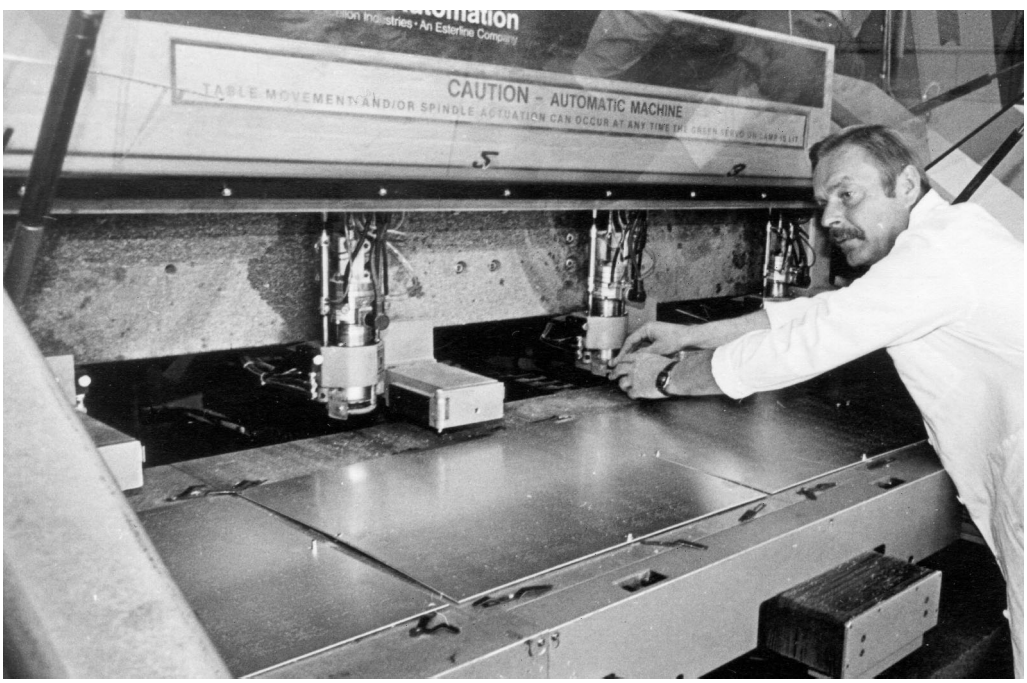
Участок сборки. Слесарь В. Е. Петровский
и начальник участка В. П. Сидоров

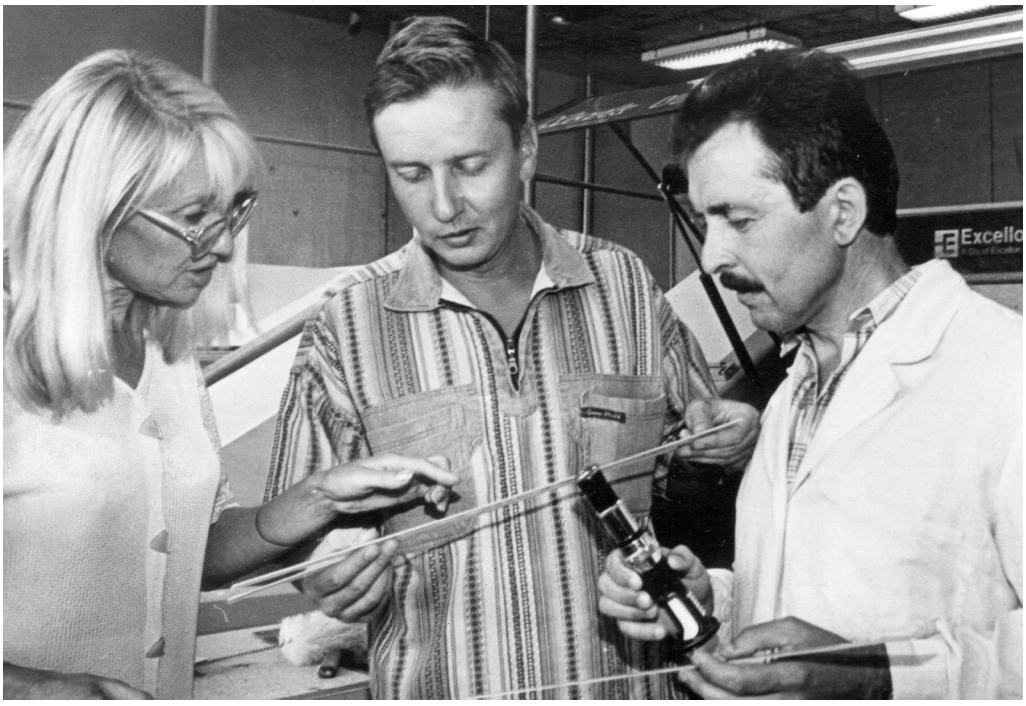




Минское производственное объединение вычислительной техники.
Завод печатных плат. Директор завода В. В. Шевельдин
и заместитель директора Н. А. Пекарский

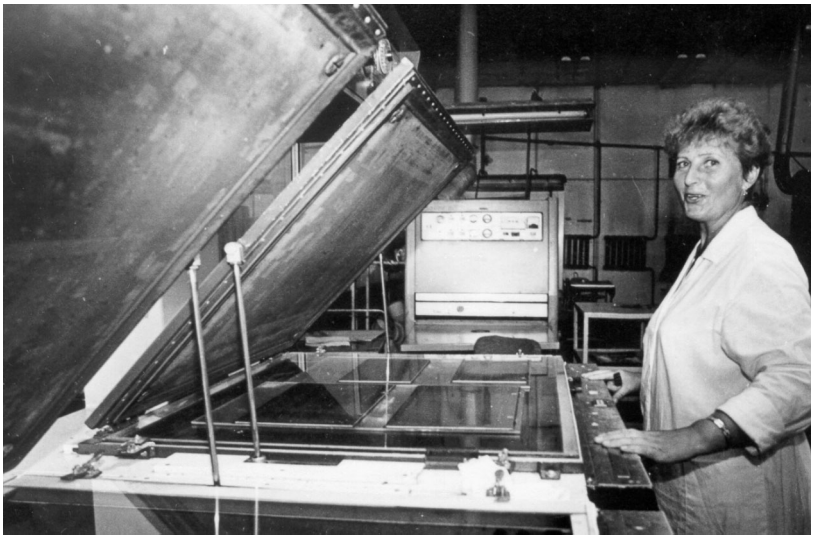
Станок для сверления печатных плат. Подготовка к сверлению
печатных плат для катодных стриповых камер установки CMS (ЦЕРН)





Проверка точности сверления печатных плат. Ведущий технолог завода И. Е. Тищенко, научный сотрудник А. В. Литомин (НЦ ФЧВЭ БГУ) и механик М. С. Гульцов

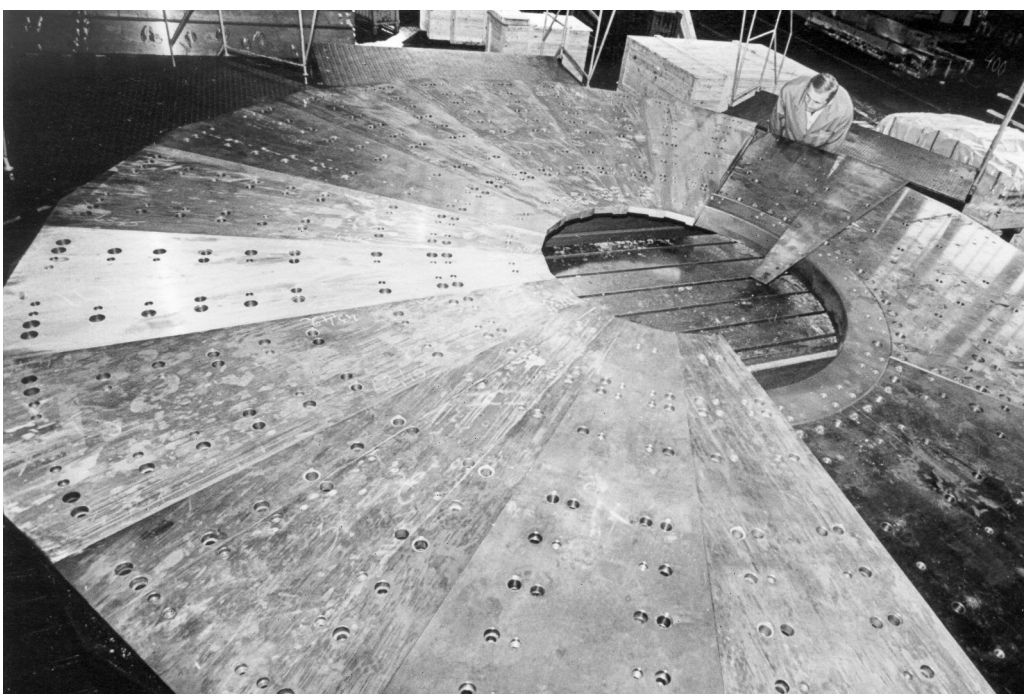
Участок фотоэкспонирования печатных плат

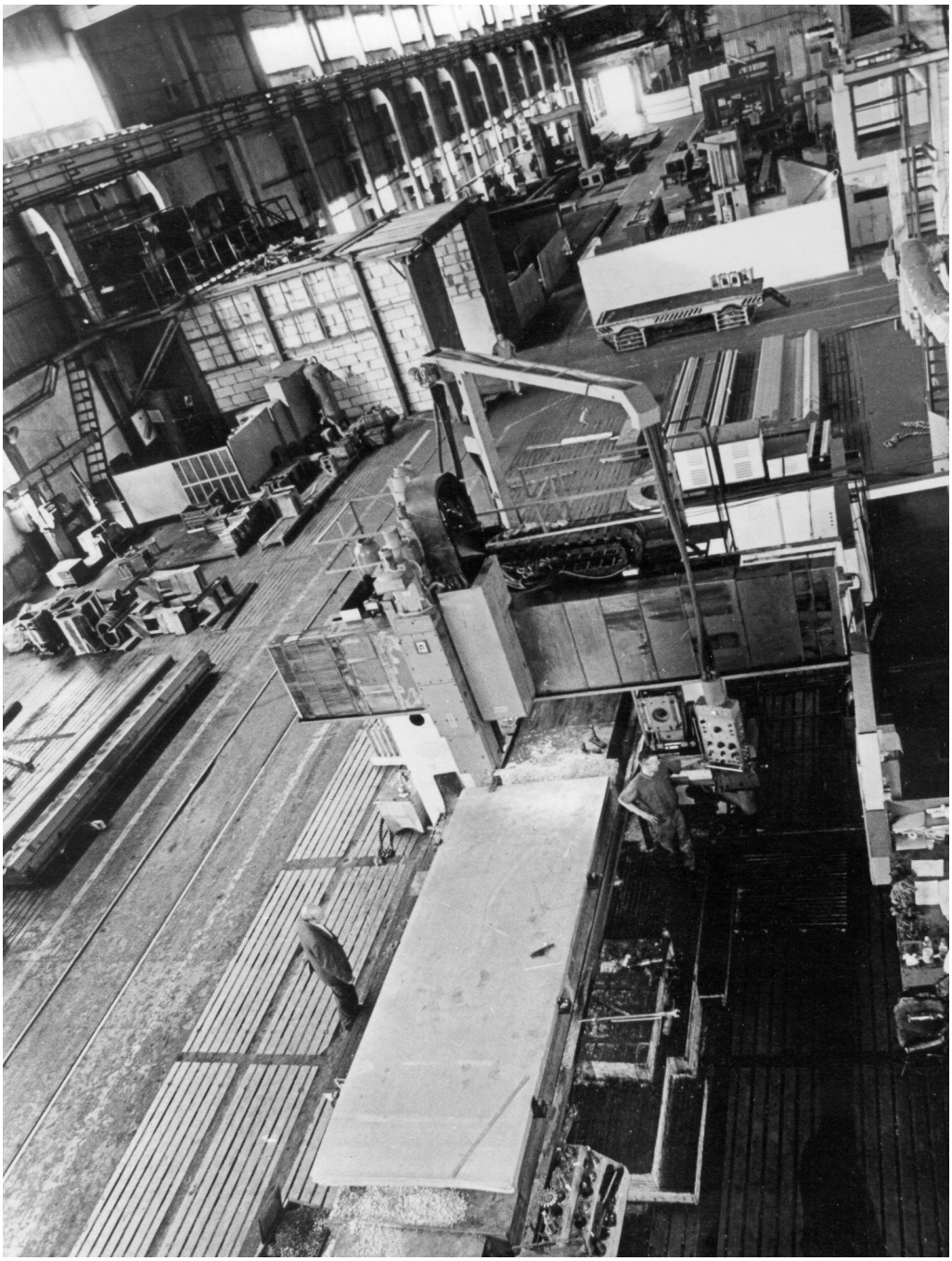




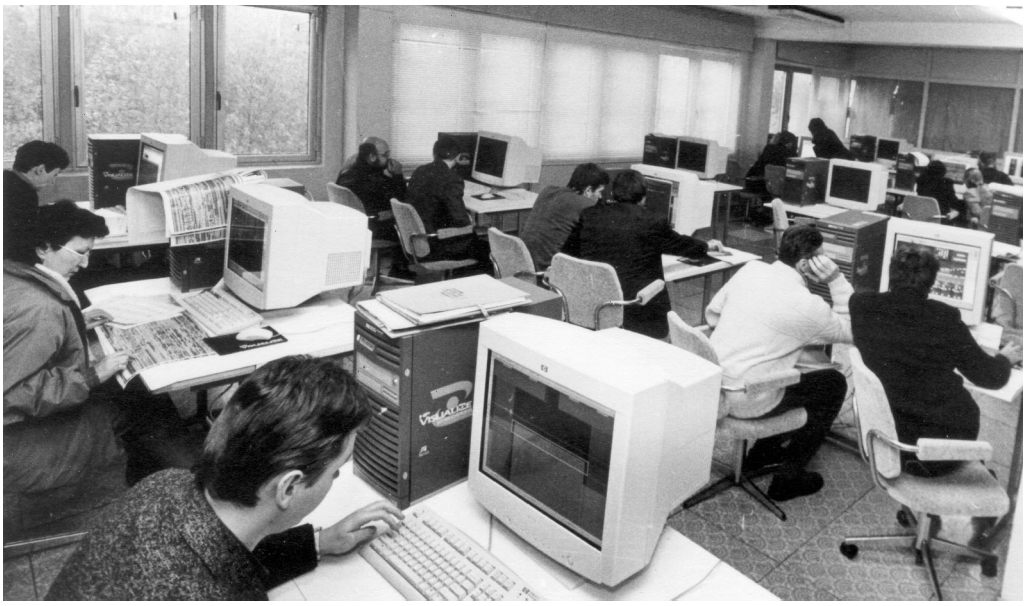
Генеральный директор Машиностроительного завода
им. Октябрьской революции М. М. Кривомаз (справа)
и директор торговой фирмы МЗОР А. В. Сыса

Стенд для контрольной сборки абсорбента
адронного калориметра установки CMS (ЦЕРН)





Фрезерный станок с плитой для сектора среднего диска установки CMS (ЦЕРН)



Научно-производственное объединение «Интеграл».
Центр проектирования интегральных схем

Лаборатория электронной микроскопии. Ведущие инженеры
А. В. Демьянович, Т. Г. Бахматович и инженер Г. П. Неделькина



Директор завода «Интес»
Ф. П. Баршай



Лаборатория ионных методов элементного анализа материалов.
Результаты измерений обсуждают инженер А. В. Солин (НЦ ФЧВЭ БГУ),
начальник сектора Г. Г. Чигирь и главный технолог объединения В. С. Цымбал





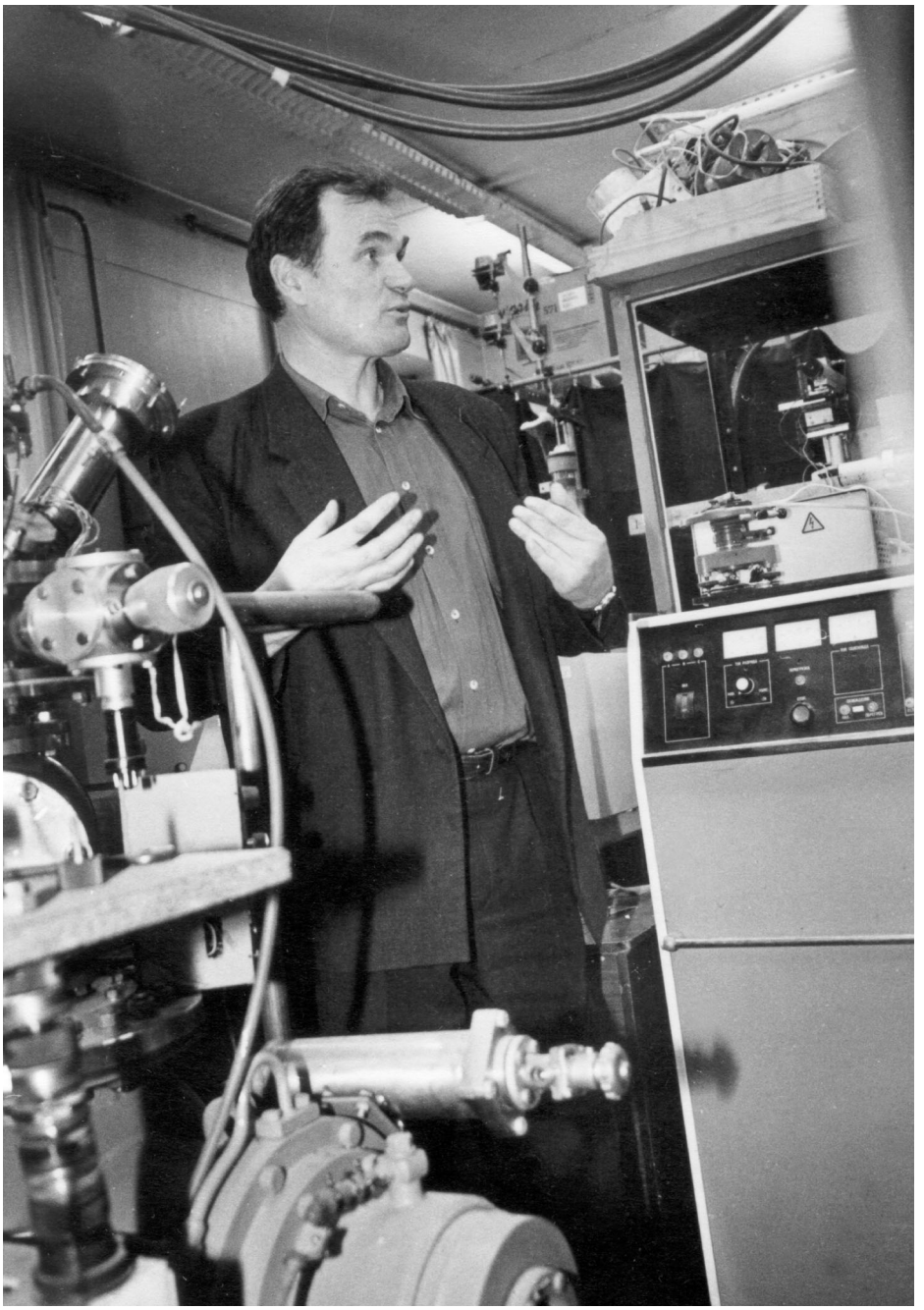
Белорусский государственный университет

Проректор БГУ
по научной работе,
член Ученого совета ОИЯИ
профессор С. К. Рахманов

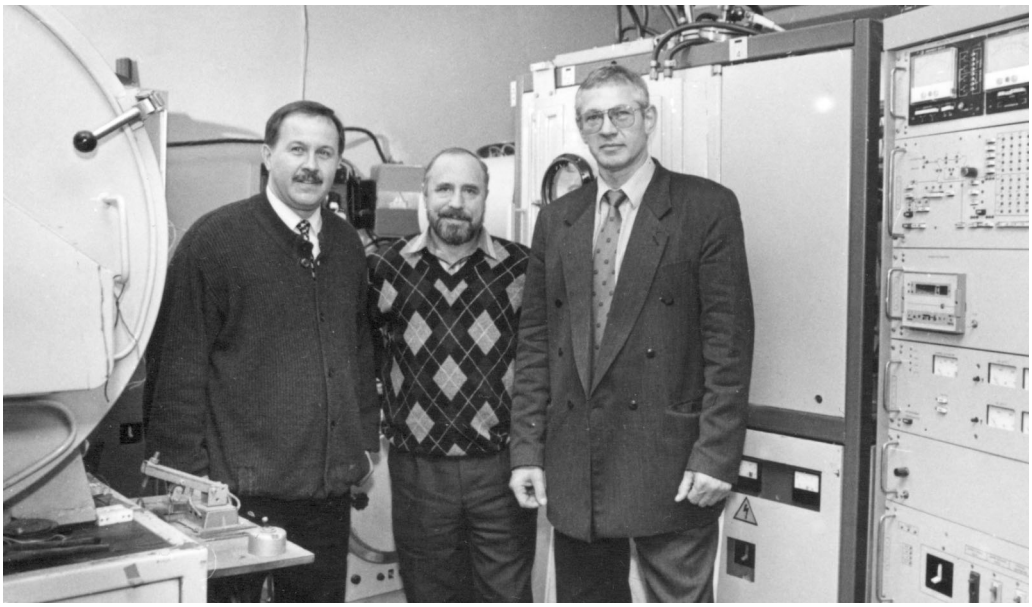


Выставка «Белорусскому государственному университету — 80 лет»





Кафедра физики полупроводников. Исследования свойств полупроводниковых приборов на алмазах проводит старший научный сотрудник Н. М. Казючиц



Лаборатория физики ионно-плазменных модификаций твердых тел.
Заведующий лабораторией В. В. Углов, инженер А. В. Калин
и начальник научно-исследовательской части БГУ В. В. Понарядов

Кафедра твердого тела. Работы по радиационной
стойкости материалов ведет С. И. Жукова





Ректор БГУ
профессор А. В. Козулин
и декан физического факультета
профессор В. М. Анищик

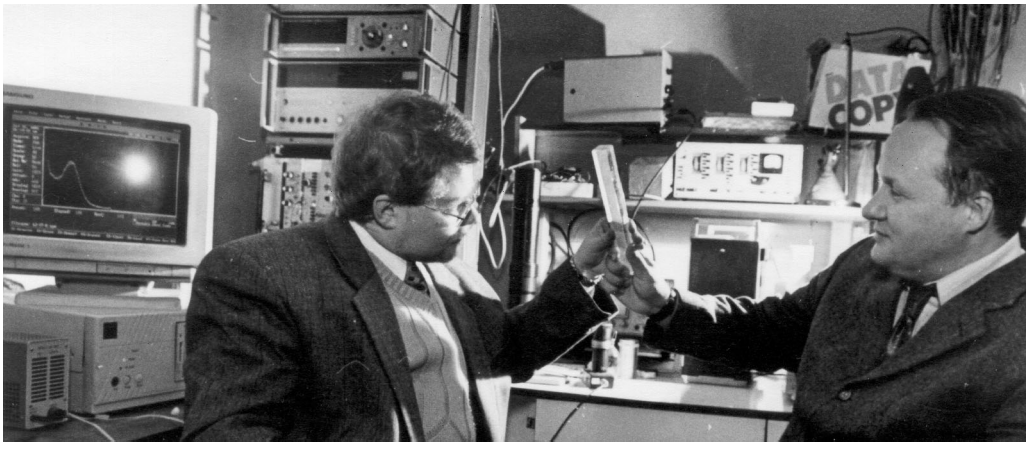
Торжественное открытие нового корпуса физфака БГУ





Институт ядерных проблем БГУ. Лаборатория сильноточной электроники.
Заведующий лабораторией В. И. Столярский, научный сотрудник П. Ф. Сафронов,
директор ИЯП БГУ профессор В. Г. Барышевский и научный сотрудник И. И. Ильенко

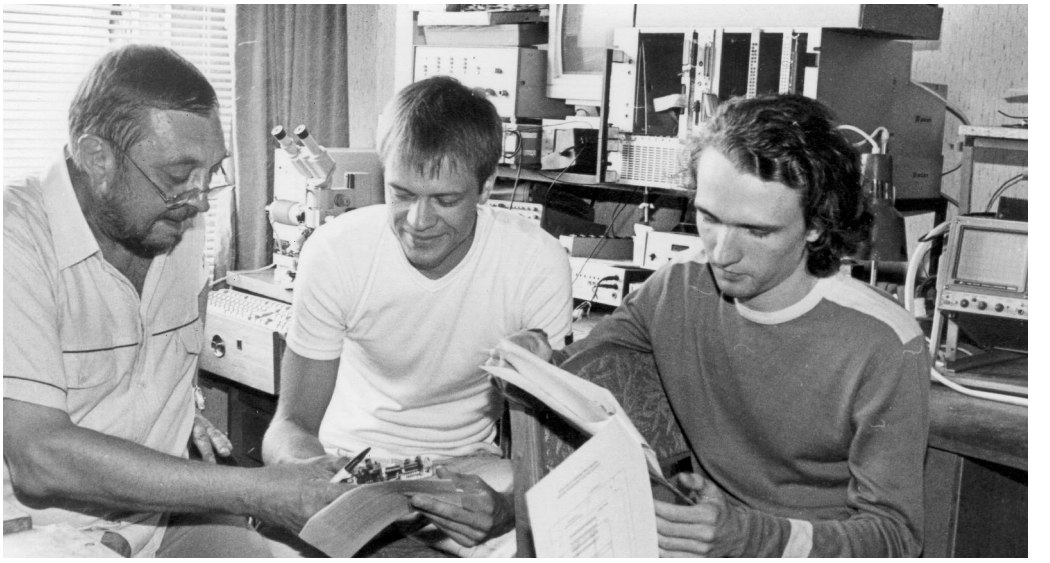
Отдел экспериментальной физики высоких энергий.
Старший научный сотрудник Г. Ю. Дробышев
и заведующий отделом М. В. Коржик



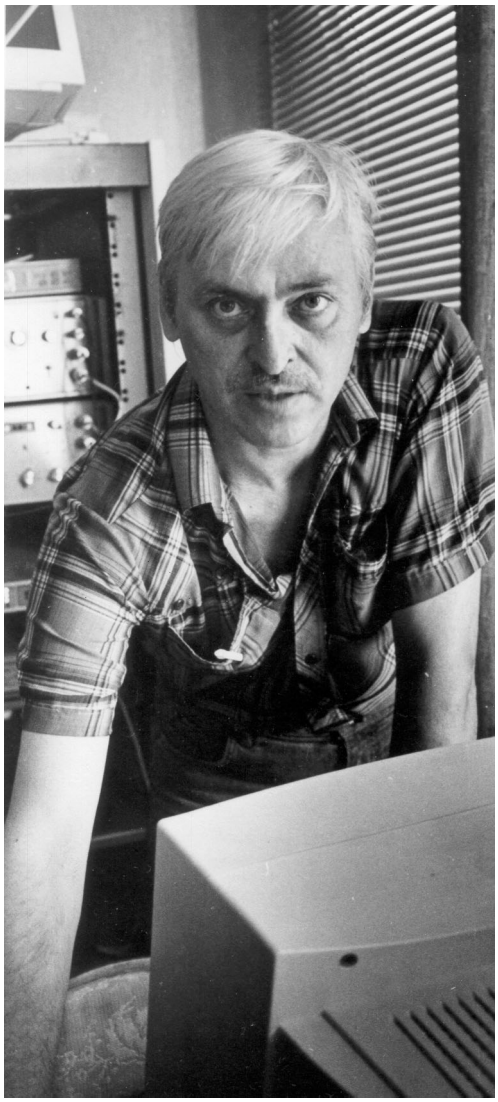


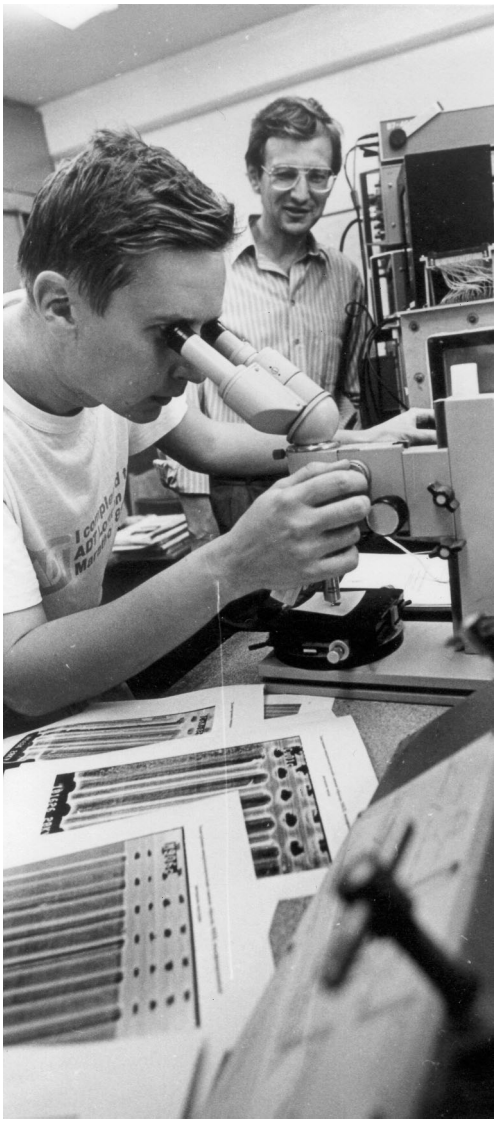
Национальный центр физики частиц и высоких энергий БГУ.
Профессор Н. М. Шумейко и ведущие научные сотрудники
Р. В. Стефанович, В. С. Румянцев обсуждают
планы сотрудничества с ОИЯИ

Лаборатория электронных методов и средств эксперимента.
Заведующий лабораторией Ф. Е. Зязюля, инженер А. Г. Тихонов
и младший научный сотрудник Д. В. Степаньков

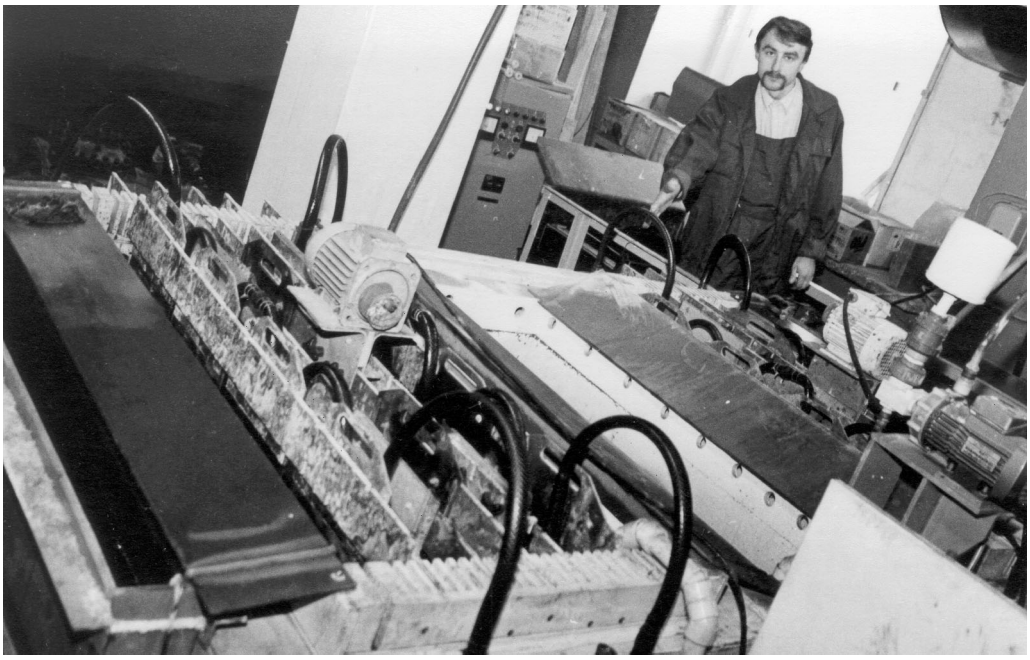


Начальник канала спутниковой связи
А. И. Мамонов





Лаборатория физики частиц.
У стенда для изучения характеристик
микроканальных пластин
научный сотрудник А. В. Литомин
и старший научный сотрудник
И. Ф. Емельянчик



Установка по переработке драгметаллов.
Работы ведет младший научный сотрудник А. В. Царев

Научно-производственная диагностическая лаборатория



Директор Института
физико-химических проблем
профессор О. А. Ивашкевич



Лаборатория биохимии лекарственных препаратов. Группа молодых сотрудников института: Е. А. Леонченко, Е. В. Усова, С. Л. Овсянко, Д. Л. Янович

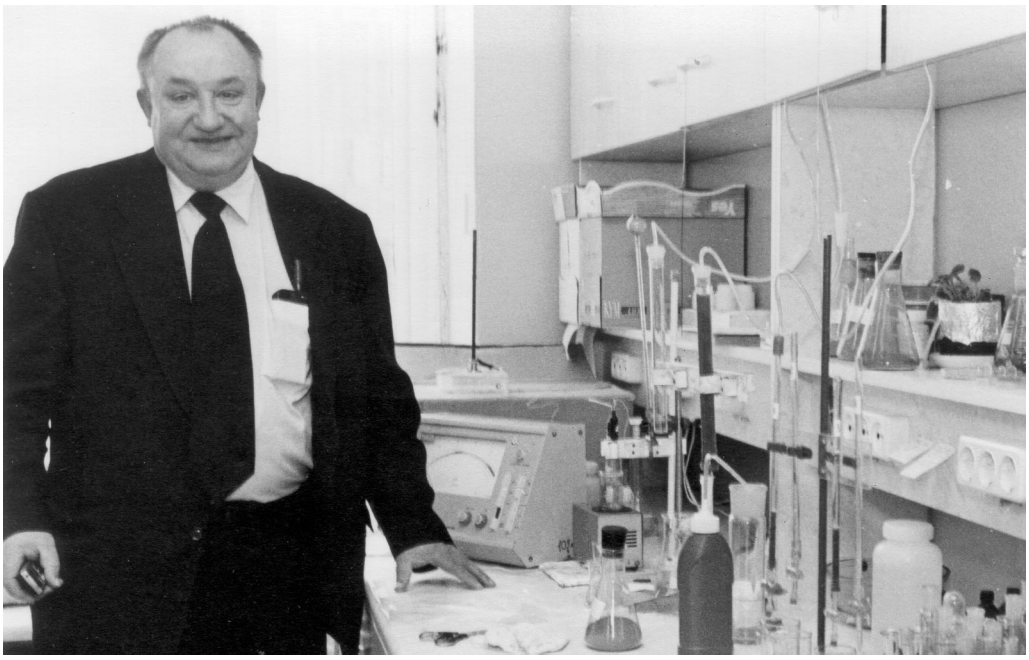




Заместитель директора предприятия «Унидрагмет»
Е. А. Гусев в плавильном цехе

Склад готовой продукции





Генеральный директор предприятия «Унитехпром»
профессор Е. М. Рахманько

Директор центра малотоннажной химии Е. Б. Макаревич





Директор завода
искусственных алмазов
Г. А. Дубров

У пульта управления синтезом главный технолог завода С. Г. Бохан



О ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НОВОГО ФИЗИЧЕСКОГО ЯВЛЕНИЯ ОСЦИЛЛЯЦИИ И ВРАЩЕНИЯ СПИНА ДЕЙТРОНОВ, ПРОЛЕТАЮЩИХ ЧЕРЕЗ НЕПОЛЯРИЗОВАННУЮ МИШЕНЬ, НА НУКЛОТРОНЕ ОИЯИ

В. Г. Барышевский

Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ, Минск

В работах [1–11] нами теоретически показано, что при прохождении дейтронов через вещество возникает новое макроскопическое квазиоптическое явление, при котором спин дейтрона осциллирует и вращается вокруг направления импульса. Явление имеет место в любой среде и определяется зависящей от спина частью амплитуды упругого когерентного рассеяния дейтрона вперед, что позволяет провести непосредственное измерение указанной амплитуды. В отличие от всех известных в настоящее время спиновых явлений, возникающих при сильном взаимодействии релятивистских частиц друг с другом и ядрами, величина рассматриваемого эффекта не падает, а растет с увеличением энергии дейтрона. По этой причине обнаружение и изучение указанного явления при энергиях порядка единиц ГэВ не только имеет общефизический интерес, но и позволяет перенести наработанный опыт на установки с любыми высокими и сверхвысокими энергиями (в том числе и на коллайдеры).

Перейдем к изложению сути явления. При влете частицы в вещество возникает явление преломления, в результате которого волновое число частицы в среде k' не равняется волновому числу в вакууме k:

$$k' = kn,$$

где n — показатель преломления:

$$n = 1 + \frac{2\pi\rho}{k^2} f(0), \tag{1}$$

где ρ — число атомов в кубическом сантиметре, $f(0)$ — амплитуда рассеяния на угол 0.

В результате волновая функция, описывающая движение частицы с определенным импульсом в вакууме $\psi_0(z) = \mathrm{e}^{ikz}$, при влете частицы в среду принимает вид

$$\psi_0(z) = \exp\{iknz\} = \exp\{ikz\}\exp\{ik(n-1)z\} = \frac{2\pi\rho z}{k}\mathrm{Re}\, f(0).$$

Однако в обычном эксперименте эти факторы никак не проявляются, так как поток частиц j, который измеряет детектор, пропорционален квадрату модуля волновой функции

$$j \sim |\psi|^2 = \exp\{-2k \operatorname{Im} nz\}.$$

Такая ситуация сохраняется до тех пор, пока мы не обращаем внимания на то, что у частицы есть спин. В результате амплитуда рассеяния начинает зависеть от ориентации спина. Так, например, для частицы со спином 1 амплитуда рассеяния на угол 0 имеет вид

$$\hat{F}(0) = T_0 + T_2(\mathbf{Sn})^2, \tag{2}$$

где $\mathbf{S}$ — оператор спина дейтрона. Это приводит к тому, что и показатель преломления зависит от ориентации спина падающей частицы. В общем случае волновая функция дейтрона

$$\psi_0 = \{\mathfrak{a}e^{i\delta_{+1}}, \mathfrak{b}e^{i\delta_0}, \mathfrak{c}e^{i\delta_{-1}}\}. \tag{3}$$

Под написанным в строчку выражением следует понимать спиновый столбец.

Среднее значение спина $\mathbf{S}$

$$\langle \mathbf{S} \rangle = \frac{\langle \psi | \hat{\mathbf{S}} | \psi \rangle}{|\psi|^2},$$

$$\langle S_x \rangle = \sqrt{2}e^{-\frac{1}{2}\rho(\sigma_0+\sigma_1)z} 2\mathfrak{b}\mathfrak{a} \cos\left[\frac{2\pi\rho}{k} T_2' z\right] \Big/ |\psi|^2,$$

$$\langle S_y \rangle = 0,$$

$$\langle S_z \rangle = 0,$$

а тензор квадруполяризации

$$\langle Q_{xx} \rangle = \{2\mathfrak{a}^2 e^{-\rho\sigma_1 z} + \mathfrak{b}^2 e^{-\rho\sigma_0 z}\}/|\psi|^2,$$

$$\langle Q_{yy} \rangle = \{-4\mathfrak{a}^2 e^{-\rho\sigma_1 z}/2 + \mathfrak{b}^2 e^{-\rho\sigma_0 z}\}/|\psi|^2, \tag{4}$$

$$\langle Q_{zz} \rangle = \{2\mathfrak{a}^2 e^{-\rho\sigma_1 z} - 2\mathfrak{b}^2 e^{-\rho\sigma_0 z}\}/|\psi|^2,$$

$$\langle Q_{xy} \rangle = 0,$$

$$\langle Q_{xz} \rangle = 0, \tag{5}$$

$$\langle Q_{yz} \rangle = \left\{-\frac{3}{\sqrt{2}} e^{-\frac{1}{2}\rho(\sigma_0+\sigma_1)z} 2\mathfrak{b}\mathfrak{a} \sin\left[\frac{2\pi\rho}{k} T_2' z\right]\right\} \Big/ |\psi|^2,$$

где $|\psi|^2 = 2\mathfrak{a}^2 e^{-\rho\sigma_1 z} + \mathfrak{b}^2 e^{-\rho\sigma_0 z}$ и z — длина пути частицы в среде. Ось z направлена по импульсу, а ось x — по вектору спина дейтрона.

Оценки величины эффекта для водорода и углерода. Пусть плотность водородной мишени 0,0675 г/см^3. Фаза осцилляций и дихроизм $\mathcal{A}$ определяются выражениями

$$\phi(z) = \frac{2\pi\rho}{k}\,\mathrm{Re}\,(F_1(0) - F_0(0))z, \tag{6}$$

$$\mathcal{A}(z) = \frac{I_0(z) - I_{\pm 1}(z)}{I_0(z) + I_{\pm 1}(z)} = \frac{2\pi\rho}{k}\,\mathrm{Im}\,(F_1(0) - F_0(0))z, \tag{7}$$

где $I_m(z)$ — интенсивность дейтронов с проекцией спина m на расстоянии z при условии, что падающий пучок не поляризован. Для неполяризованного пучка $I_{-1}(0) = I_0(0) = I_1(1) = I/3$. Для водородной мишени получены значения $\phi \sim 1{,}1 \cdot 10^{-2}$ рад/м, $\mathcal{A} \sim -3{,}9 \cdot 10^{-2}$ м$^{-1}$ при энергии дейтронов в лабораторной системе $1 - 4$ ГэВ.

Для углеродной мишени с плотностью 2,2 г/см^3 можно получить $\phi \sim 0{,}22$ рад/м, $\mathcal{A} \sim -0{,}65$ м$^{-1}$ при энергии дейтрона в лабораторной системе 1–4 ГэВ.

Таким образом, при прохождении углеродной мишени длиной 30–50 см фаза порядка 0,1 рад, т. е. примерно 5,6 градуса. Это означает, что Q_{zy} тоже порядка 0,1. Следует напомнить также, что при изменении знака вертикальной компоненты вектора поляризации дейтрона знак тензорной поляризации Q_{zy} тоже изменяется (ось z направлена вдоль импульса дейтрона, ось y ортогональна плоскости, в которой лежит начальный вектор поляризации дейтрона и его импульс).

Список литературы

1. *Baryshevsky V. G., Podgoretsky M. I.* // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1964. V. 47. P. 1050 [Sov. Phys. JETP. 1965. V. 20. P. 704].
2. *Baryshevsky V. G.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1983. V. 38. P. 569;
   Baryshevsky V. G. // Phys. Lett. B. 1983. V. 120. P. 267.
3. *Baryshevsky V. G., Dubovskaya I. Ya.* // Yad. Phys. 1991. V. 53. P. 1249 [Sov. J. Nucl. Phys. 1991. V. 53, No. 5. P. 770].
4. *Baryshevsky V. G., Dubovskaya I. Ya.* // Phys. Lett. B. 1989. V. 256. P. 529.
5. *Baryshevsky V. G., Shekhtman A. G.* // Phys. Rev. C. 1996. V. 53. No. 1. P. 267.
6. *Baryshevsky V. G.* // Phys. Lett. A. 1992. V. 171. P. 431.
7. *Baryshevsky V. G.* // J. Phys. G. 1993. V. 19. P. 273.
8. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Cherkas S.* // J. Phys. G. 1998. V. 24. P. 2049.
9. *Baryshevsky V., Batrakov K., Cherkas S.* LANL e-print archive: hep-ph/9907464 v1, 23 July 1999.
10. *Baryshevsky V. G.* // Sov. J. Nucl. Phys. 1988. V. 48. P. 1063.
11. *Baryshevsky V. G.* LANL e-print archive hep-ph/0109099.

ОБЪЕМНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В. Г. Барышевский

Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ, Минск

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) (устройства, в которых релятивистские пучки электронов генерируют когерентное электромагнитное излучение) представляют собой чрезвычайно важное и активно развивающееся направление науки и техники.

В настоящее время осуществлена генерация излучения в самых различных диапазонах длин волн: начиная от сантиметровых и кончая оптическими. Начал осуществляться проект рентгеновского ЛСЭ.

Независимо от типа ЛСЭ в основе его работы лежат два важнейших физических явления — явление индуцированного излучения и явление возникновения под влиянием излучения периодической модуляции (бунчировки) плотности электронного пучка (явление пучковой неустойчивости). Генерация в ЛСЭ возбуждается различными механизмами спонтанного излучения: магнитотормозным излучением в ондуляторе, излучением Смит-Парсела и Черенкова, излучением в лазерной волне. Но независимо от того, какой именно вид спонтанного излучения применяется в конкретном ЛСЭ, все приборы этого типа используют обратную связь, создаваемую или двумя параллельными зеркалами, расположенными на краях рабочей области, или одномерной дифракционной решеткой, в которой испускаемая и дифрагированная (отраженная) волны распространяются вдоль электронного пучка (одномерная распределенная обратная связь).

Хорошо известно, что любая излучающая система характеризуется спектром собственных колебаний и так называемым дисперсионным уравнением, описывающим в случае малых возмущений (линейный режим) возможные типы волн в системе и связь между частотой и волновым числом собственных колебаний системы. В случае ЛСЭ такое дисперсионное уравнение показывает, что в системе существуют связанные между собой электромагнитные волны и так называемые продольные волны электронной плотности. Тщательный анализ свойств этого дисперсионного уравнения показал [1], что дисперсионное уравнение для ЛСЭ в коллективном (комптоновском) режиме совпадает с дисперсионным уравнением обычного усилителя бегущей волны [2] и коэффициент усиления ЛСЭ (инкремент неустойчивости электронного пучка) в условиях синхронизма волн пропорционален $\rho_0^{1/3}$ (где ρ_0 — плотность электронного пучка) и имеет вид

$$\mathrm{Im}\, k_{\parallel} = \frac{\sqrt{\varepsilon_0}}{2c} \sqrt[3]{\frac{\omega_L^2 |A_{nn}|}{2\omega\varepsilon_0 \gamma}},$$

где $\omega_L^2 = 4\pi e^2 \rho_0 / m$, ω_L — ленгмюровская частота.

В работе [3] было показано, что при движении релятивистского пучка электронов через кристалл (среду, обладающую пространственно-периодической диэлектрической проницаемостью), а также в щели (волноводе) в дифракционной решетке [4] возможно выполнение условий, при которых появляется новая физическая закономерность, а именно: инкремент неустойчивости электронного пучка в условиях синхронизма волн в этом режиме оказывается пропорциональным не $\rho_0^{1/3}$, а $\rho_0^{1/(3+S)}$, где S — число возникающих в результате брэгговской дифракции в решетке излучаемых электромагнитных волн, а ρ_0 — плотность электронного пучка. Если в процессе дифракции участвуют две волны, то в точке совпадения корней дисперсионного уравнения можно получить следующее выражение для $\mathrm{Im}\, k_{\parallel}$:

$$\mathrm{Im}\, k_{\parallel} = \left(\frac{\omega_0 |Q| \, |\chi_\tau| \tau}{u^2 c^2 \sqrt{2\tau_z^2 - \tau^2}} \right)^{1/4} = \left(\frac{\omega_L^2 A_{nn} |\chi_\tau| \tau}{2\gamma u^2 c^2 \sqrt{2\tau_z^2 - \tau^2}} \right)^{1/4}.$$

В результате имеем рост инкремента неустойчивости (коэффициента усиления):

$$\frac{\mathrm{Im}\, k_{\parallel}^{(s=1)}}{\mathrm{Im}\, k_{\parallel}^{(s=0)}} \approx \left(\frac{\omega_L^2 |A_{nn}|}{\omega^4 \chi_\tau^3 \gamma} \right)^{-\frac{1}{12}} >> 1.$$

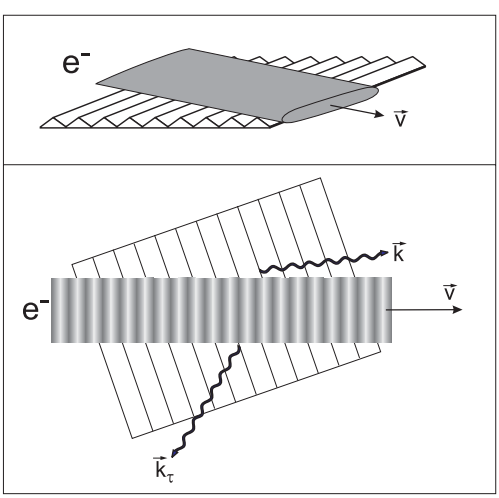


Рис. 1. Двухволновая дифракция в ОЛСЭ

Как показывает теория, в условиях вырождения корней изменяется и поведение порогового тока

$$j_{\mathrm{start}} \sim 1/[(kL)^3 (k\chi_\tau L)^{2s}].$$

Объемные лазеры на свободных электронах (ОЛСЭ) являются чрезвычайно перспективной разновидностью ЛСЭ, способной обеспечить излучение в широкой области спектра, от сантиметрового до рентгеновского (см. [5–7]). Отличительной особенностью ОЛСЭ является использование в качестве объемных резонаторов одно-, двух- и трехмерных дифракционных решеток, обеспечивающих объемную распреде-

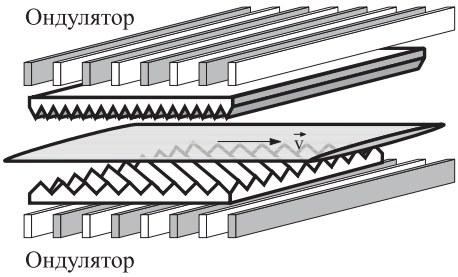


Рис. 2. Возможная конфигурация ОЛСЭ с ондулятором

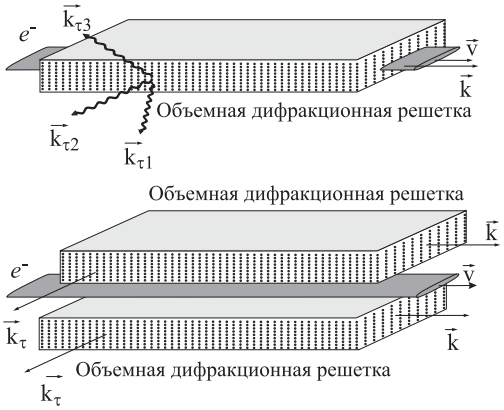


Рис. 3. Возможная конфигурация ОЛСЭ

ленную обратную связь и, как следствие, возможность плавной перестройки частоты.

Важно подчеркнуть, что даже одномерная дифракционная решетка может обеспечивать объемную (не одномерную) обратную связь, если угол брэгговской дифракции. При определенных условиях ОЛСЭ обеспечивает более эффективный процесс излучения, чем обычный ЛСЭ, использующий одномерную распределенную обратную связь. Более того, благодаря возможности использовать широкие электронные пучки и дифракционные решетки больших объемов, ОЛСЭ позволяет получать на много порядков большие мощности излучения при существенно меньших размерах, чем обычные ЛСЭ. Фактически на основе идеи создания ОЛСЭ возникает в настоящее время новая ветвь СВЧ, оптической и рентгеновской лазерной техники, позволяющая создавать генераторы, обеспечивающие плавную перестройку частоты в широкой области спектра и высокую мощность излучения. Первый ОЛСЭ начал работать в НИИ ядерных проблем 20 апреля 2001 г. [8].

Список литературы

1. *Gover A., Livni Z.* // Optics Communications. 1978. V. 26. P. 375.
2. *Pierci J. R.* Travelling wave tubes. Van Nostrand, Princeton, 1950.
3. *Baryshevsky V. G., Feranchuk I. D.* // Phys. Lett. A. 1984. V. 102. P. 141.
4. *Барышевский В. Г.* // Доклады Академии наук СССР. 1988. Т. 299, № 6. С. 1363.
5. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya.* // J. Phys. D. 1991. V. 24. P. 1250.
6. *Baryshevsky V. G., Batrakov K. G., Dubovskaya I. Ya.* // NIM. 1995. V. 358. P. 493.
7. *Baryshevsky V. G.* LANL e-print archive physics/9806039.
8. *Baryshevsky V. G.* LANL e-print archive physics/0107043.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСМУТАЦИИ ДОЛГОЖИВУЩИХ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ И МЛАДШИХ АКТИНИДОВ В ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКЕ, УПРАВЛЯЕМОЙ ГЕНЕРАТОРОМ НЕЙТРОНОВ

С. Е. Чигринов

Академический научно-технический комплекс «Сосны» НАНБ, Минск

Для меня высокая честь выступить на заседании Ученого совета Объединенного института ядерных исследований. Много лет я провел в Дубне, и значительная часть моего доклада будет посвящена нашему сотрудничеству. Название моего доклада — «Экспериментальные и теоретические исследования трансмутации долгоживущих осколков деления и младших актинидов в подкритической сборке, управляемой генератором нейтронов». Эта работа выполняется в рамках проекта ISTC (Международного научно-технического центра в Москве), Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национальной академии наук Белоруссии. Частично проект финансируется европейским сообществом.

Я хотел бы отметить, что работы по ядерной физике в Белоруссии начались примерно сорок лет назад. Они проводились в области нейтронной физики, гамма-спектроскопии, гамма-спектрометрии, радиобиологии, радиохимии. Особенно много работ было выполнено по физике реакторов, где в течение последних двадцати пяти лет проведено колоссальное количество различных исследований по геометрии, конфигурации и составу реакторных сборок. В настоящее время создаются соответствующие библиотеки ядерных данных. Все эти работы ведутся при поддержке Международного научно-технического центра.

Нами проводятся также работы по созданию моделей и методов расчетов, связанных с исследованием взаимодействия пучков частиц и ядер высоких энергий с веществом. Мы проводим исследования по электроядерному методу и экспериментальные исследования подкритических систем, управляемых ускорителями высоких энергий. В качестве примера отмечу полученные нами данные для различных реакций, где присутствуют ядра младших актинидов (кюрий, америций), для уран-плутониевого и торий-уранового циклов вплоть до энергий 150 МэВ. Эти работы также частично финансируются Международным научно-техническим центром.

Буквально несколько слов о проводимых нами исследованиях по электроядерному методу. Известно, что его основой является использование синтеза высоко-

энергетических реакций расщепления и деления атомных ядер. Для электроядерной установки необходим ускоритель высоких энергий на 1–2 ГэВ с достаточно большими токами, нейтронная мишень, производящая нейтроны различных энергий, и подкритические сборки с коэффициентом умножения примерно 0,95. Центральным пунктом расчетов по электроядерному методу является трехстадийная модель, связанная с описанием каскадной, предравновесной и испарительной стадий. Испарительная часть определяет в основном, примерно на 90 %, выход нейтронов в бланкет. Подтверждением этого являются экспериментальные данные, полученные, например, японскими учеными в исследованиях взаимодействия протонного пучка с энергиями 500 МэВ и 1,5 ГэВ со свинцовой

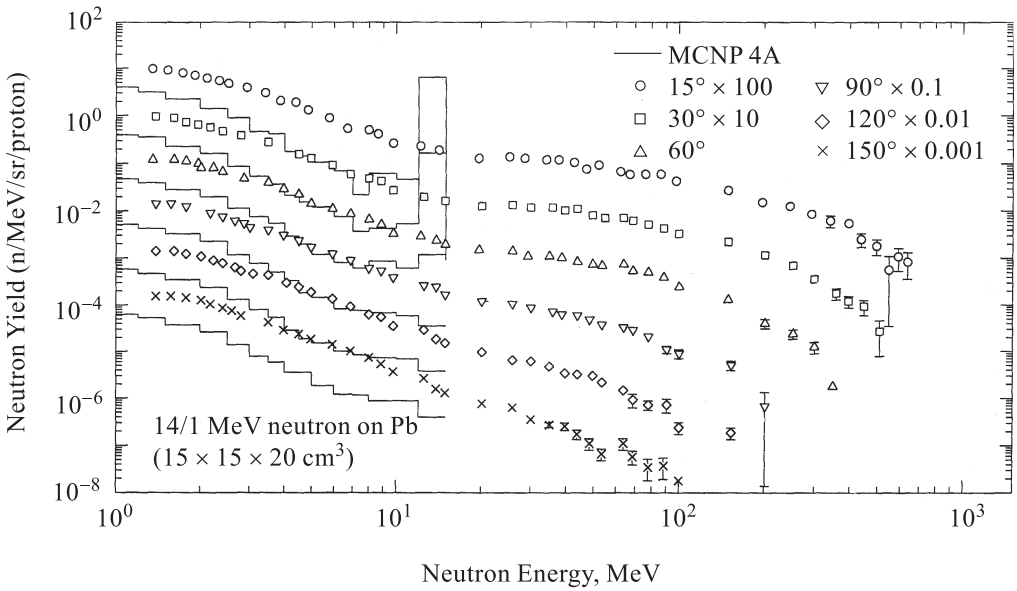


Рис. 1. Спектр нейтронов из толстой мишени, размером 15 × 15 см и толщиной 20 см, облученной нейтронами с энергией 14,1 МэВ. Гистограмма (сплошная линия) получена в результате численных расчетов. Экспериментальные данные взяты из работы: *Takada H. et al.* // IAEA-TECDOC-985, 1997

мишенью. Спектр нейтронов, которые вылетают из нейтронпроизводящих мишеней, очень широкий (см. рис.1). Однако в рассматриваемом случае основная часть спектра — это нейтроны, которые вылетают с энергией меньше 20 МэВ. Это как раз те нейтроны, которые попадают в бланкет, составляя основную часть, примерно 90 %. С учетом этих данных ясно, что для исследований можно использовать установки, генерирующие нейтроны низких энергий: если нейтроны с энергией до 27 МэВ дают основной вклад, то не нужно использовать громадные ускорители частиц высокой энергии на 1–2 ГэВ для генерации нейтронов, а достаточно иметь ис-

точник нейтронов необходимой энергии. Нами сделаны расчеты (см. рис.1), в которых получается идентичный спектр нейтронов как от протонного пучка, облучающего толстую свинцовую мишень, так и от пучка 14-мэвных нейтронов. Полученный результат обусловлен как раз вкладом испарительной части спектра

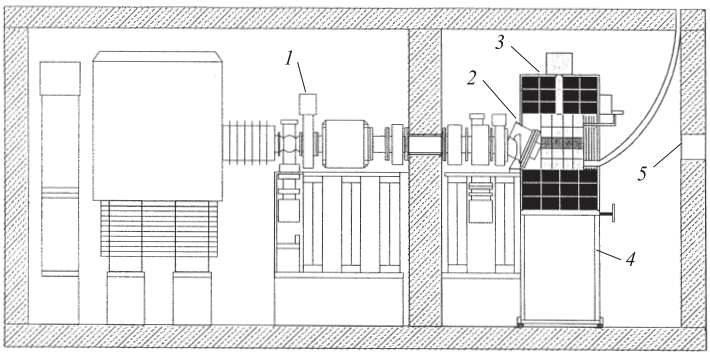


Рис. 2. Установка «Ялина»: *1* — нейтронный генератор, *2* — Ti – ^{3}H мишенная система, *3* — подкритическая сборка, *4* — подвижная платформа, *5* — коллиматор

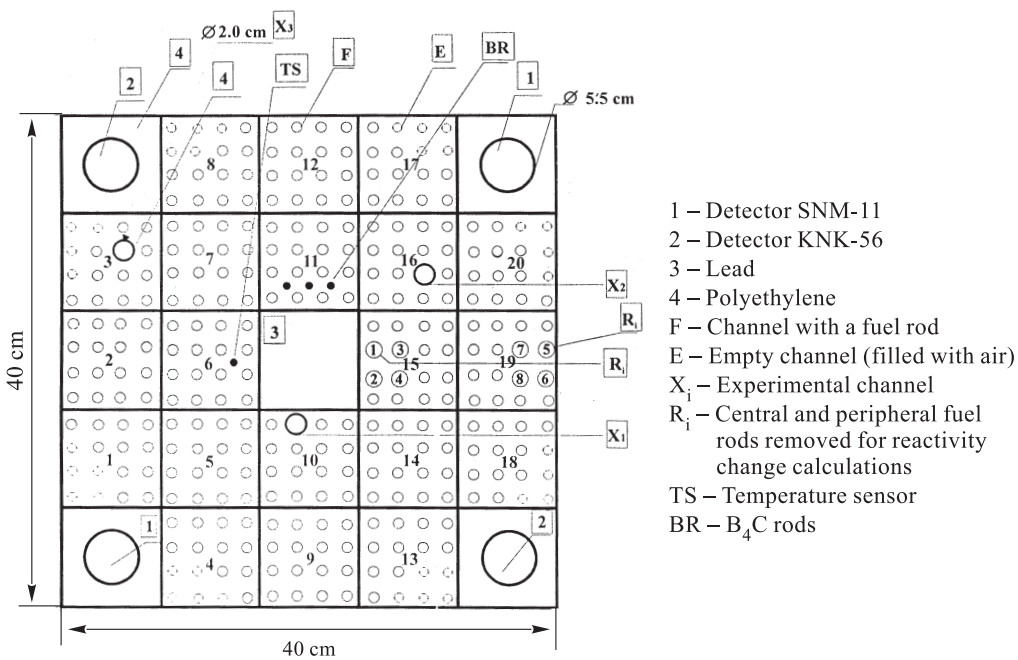


Рис. 3. Подкритическая сборка

нейтронов. Это означает, что для изучения физики подобных систем можно использовать мощные высокоинтенсивные генераторы нейтронов.

В нашем институте лет пять назад введен в эксплуатацию генератор нейтронов с характеристиками, позволяющими проводить исследования по трансмутации и электроядерному методу. При использовании тритиевой мишени получается около $1–2 \cdot 10^{12}$ нейтронов в секунду с энергией нейтронов 13 –15 МэВ. Для дейтериевой мишени выход нейтронов около $2–3 \cdot 10^{10}$ в секунду с энергией 2–3 МэВ, а для калифорниевого источника — около $5 \cdot 10^{7}$ нейтронов в секунду. Созданная установка (см. рис. 2) состоит из генератора нейтронов, тритиевой мишени и подкритической сборки. Коэффициент умножения в подкритической сборке 0,90–0,98. Сборка (см. рис. 3) состоит из полиэтиленовых блоков, где с шагом в два сантиметра размещены урановые стержни. Внутри находится свинцовая мишень, которая облучается нейтронами с энергией 14 МэВ. Есть также соответствующие экспериментальные каналы, и мы в настоящее время проводим достаточно широкий круг экспериментых работ на этой установке. В такой системе формируется очень мягкий спектр нейтронов. Измерение в таком спектре, скажем, скоростей трансмутации долгоживущих осколков или младших актинидов является чрезвычайно интересным. Здесь, например, можно получать данные для активационных интегралов. Кроме того, генератор нейтронов может работать с очень хорошими импульсными характеристиками: длительность нейтронного импульса примерно десять микросекунд (см. рис. 4). Мы можем работать с импульсами от одной до ста микросекунд и частотой их повторения от одного до тысячи герц. На рис. 5 приведен отклик урановой подкритической сборки на воздействие такого импульса нейтронов. Хочу отметить, что, как это ни странно, физика таких подкритических систем до настоящего времени практически не изучалась. Если у нас все получится, то скорости трансмутации ядер будут измеряться для Zr-93, Tc-99, Sn-126, I-129, Cs-135, Cs-137, Th-232, U-233, Np-237, Am-241, Am-243. В настоящее время мы измерили скорость

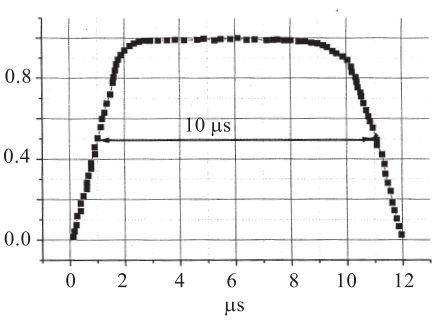


Рис. 4. Форма нейтронного импульса, генерируемого на мишени Ti – D

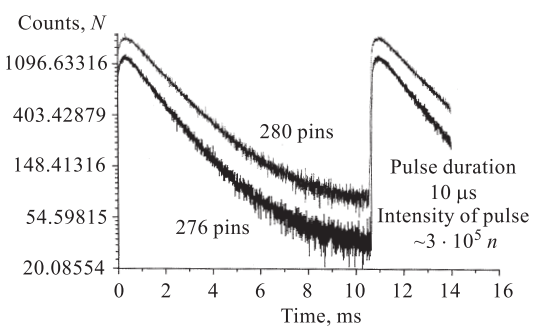


Рис. 5. Отклик урановой подкритической сборки на воздействие нейтроного импульса, генерируемого на мишени Ti – D

трансмутации америция-243, нептуния-237 и йода-129. Возникающие проблемы связаны, в основном, с изготовлением хороших чистых мишеней.

Совсем недавно, благодаря нашим прекрасным отношениям с директором Лаборатории ядерных проблем Н. А. Русаковичем, директором Лаборатории информационных технологий И. В. Пузыниным и при помощи и большой поддержке администрации ОИЯИ, мы провели ряд экспериментов на фазотроне, где облучили привезенную из Минска систему на протонном пучке с энергией 660, 450 и 200 МэВ. Эксперименты были сделаны в мае и ноябре 2001 г. На рис. 6 приведены данные для активационных интегралов для реакции ^{47}Ti(n,p)^{47}Sc. Как ни странно, но известные данные по таким реакциям не имеют необходимой точности. И поэтому должен быть выполнен целый цикл измерений сечений простых реакций, крайне важных для последующей деятельности. Отмечу, что наша экспериментальная программа поддержана Европейским сообществом.

Несколько заключительных замечаний по нашей установке. Созданная установка может работать с различными внешними источниками, позволяет получать весьма интересные данные, например, по пространственной кинетике подкритических систем для различных внешних источников, делать оценки ядерных данных и тестировать различные модели, применяемые для расчета подкритических систем, в том числе нуклон-мезонных каскадов. Особый интерес представляют работы, связанные с изучением динамики подобных систем. Я бы очень хотел и мы были бы очень рады, если бы этот цикл измерений, исследований по кинетике и измерению скорости трансмутации был бы проведен на нуклотроне и на фазотроне ОИЯИ совместно с физиками Объединенного института ядерных исследований. Хочу подчеркнуть, что выполняемые нами исследования и работы, связанные с обеспечением безопасности подобных установок, а также разработка различных методик, которые сделаны в Минске, могут быть использованы для дальнейших работ в ОИЯИ. Включая проведение очень интересных исследований в рамках программы SAD.

В заключение хочу сказать, что при проведении подобных исследований, как уже говорил профессор Барышевский, надо бы объединить и финансовые усилия. Это позволило бы сделать установки действительно на хорошем уровне, а также провести необходимые исследования на хорошем протонном пучке. Я еще хотел бы сказать, что, наверное, нам очень повезло, что наша установка является уникальной. Подобная установка работает в Исследовательском центре в Кадараше во Франции, но там в исследованиях используются быстрые нейтроны. Таким образом, эти две установки взаимно дополняют друг друга и, возможно, будут профинансированы в рамках европейской программы. В исследованиях на этой установке уже выразили желание работать наши партнеры — специалисты из Франции (Cadarache), Швеции (Royal Institute of Technology), Испании (SEMAT), Германии (Карлсруэ), Польши (совместные работы под руководством профессора Тычановского) и Италии (ENEWAR).

Я хотел бы выразить свою очень большую признательность профессорам А. Н. Сисакяну, Н. А. Русаковичу, И. В. Пузынину, А. И. Малахову и всем коллегам, с которыми мне посчастливилось работать в ОИЯИ.

Спасибо за внимание.

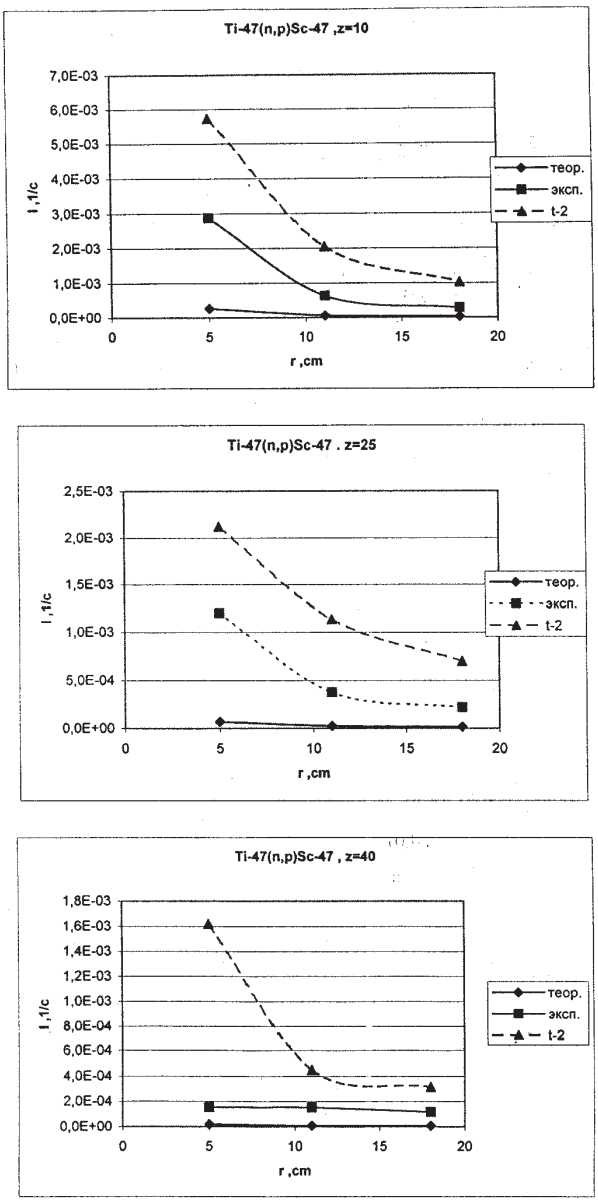


Рис. 6. Данные для активационных интегралов для реакции ^{47}Ti(n,p)^{47}Sc

ОБ ИТОГАХ СОТРУДНИЧЕСТВА ИФ НАН БЕЛОРУССИИ С ОИЯИ

А. А. Богуш

Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ, Минск

Отчет о полученных в Лаборатории физики высоких энергий ИФ НАНБ результатах научно-исследовательских работ, выполняемых в соответствии с координационными планами НИР в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) и в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) с участием учреждений и организаций Республики Белоруссии в 2001 г.

Исполнители от ЛФВЭ ИФ НАНБ: зав. лаб., докт. физ.-мат. наук, чл.-кор. НАНБ А. А. Богуш; гл. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук Ю. А. Курочкин, вед. науч. сотр., докт. физ.-мат. наук: М. И. Левчук, Ю. А. Кульчицкий; вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук: И. С. Сацункевич, А. З. Газизов, В. С. Румянцев, В. С. Отчик, В. В. Гилевский; ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук: А. М. Федоровых, С. М. Сикач, М. М. Сергеенко; науч. сотр., канд. физ.-мат. наук В. М. Редьков, мл. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук В. В. Грицев, науч. сотр. В. Т. Стосуй; мл. науч. сотр.: М. В. Кузьмин, В. В. Махнач, Н. Г. Токаревская; инж. I кат. Т. П. Шалдина, стаж.-иссл. А. А. Малик.

Важнейшие результаты НИР 2001 г.

В развитие ковариантного подхода Федорова дана явно релятивистски-ковариантная алгебраическая формулировка уравнений и лагранжиана для взаимодействующих частицы со спином 1/2 и калибровочного поля (поля Янга–Миллса) в терминах операций определенной ранее релятивистской векторной алгебры (РВА), дополненной алгеброй матриц и векторов в N-мерном пространстве внутренней (динамической) симметрии.

Разработан новый подход к решению квантово-механической задачи Кеплера в пространствах постоянной кривизны, основанный на использовании алгебры двойных чисел. Показано, что в классической задаче Кеплера использование двойных чисел дает возможность сформулировать симметрию относительно двумерных преобразований Лоренца для инфинитного движения.

Построена теория частиц со спином 0, 1/2 и 1, взаимодействующих с электромагнитным и гравитационным полями, на основе описания этих частиц с помо-

щью релятивистских волновых уравнений, заданных в пространствах расширенных наборов представлений группы Лоренца, при одновременном использовании принципа калибровочной инвариантности и известного рецепта Тетроде–Вейля–Фока–Иваненко. Показано, что в рамках такого подхода, наряду с электромагнитным взаимодействием Паули, имеет место дополнительное взаимодействие частицы с гравитационным полем за счет кривизны пространства-времени.

Изучены нарушения стандартной модели электрослабых взаимодействий за счет возможных *P*- и *CP*-нарушающих взаимодействий, обусловленных наличием у калибровочных бозонов анапольных и электрических дипольных моментов. Найдены новые ограничения на анапольные моменты заряженных лептонов по данным группы L3 (ЦЕРН, Женева).

Детально исследован процесс инклюзивного фоторождения пионов на дейтроне в области первого резонанса. Выполнены расчеты наблюдаемых характеристик процесса, основанные на использовании усовершенствованного диаграммного подхода. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными по полному и дифференциальному сечениям. После обработки результатов последних экспериментальных измерений, полученных при изучении дейтронного комптон-эффекта, определены новые, более точные значения для величин электрической и магнитной поляризуемостей нейтрона.

Показано, что измеренные физические характеристики калориметрического комплекса ATLAS отвечают тем высоким требованиям, которые необходимы для реализации экспериментальных программ по физике высоких энергий на большом адронном коллайдере.

Совместно со специалистами ОИЯИ и минского завода МЗОР разработана специальная технология высокоточной обработки крупногабаритных изделий из меди марки М1. На этой основе на МЗОР организовано производство пластин для поглотителя жидкоаргонного калориметра детектора ATLAS. Изготовлено и отправлено в ОИЯИ 75 пластин.

Материалы и результаты выполненных НИР отражены в 32 опубликованных и 20 направленных в печать работах, а также в 22 научных докладах (см. приложения).

Основные результаты научных исследований (Аннотации)

1. По теме ОИЯИ 01-3-1028-99/2003 «Поля и частицы». Руководители Д. И. Казаков, А. Т. Филиппов

1.1. Решение проблем и задач теории элементарных частиц и их взаимодействий, а также физики сложных квантовых систем на основе развития и использования эффективных математических методов и средств (2001–2005 гг.).

Исследование квантово-полевых моделей на основе использования расширенных алгебр чисел. Развитие теории элементарных частиц и сложных физических систем на основе использования неевклидовой геометрии. Дальнейшая разработка и новые приложения операций релятивистской векторной алгебры (2001 г).

Обоснование. Пространства с различной геометрией широко используются при описании сложных квантово-релятивистских систем. Разработанные в ИФ НАНБ в рамках ковариантного подхода Ф. И. Федорова новые алгебраические, групповые и геометрические методы позволяют ставить и решать такие задачи, которые затруднительно рассматривать при использовании иных подходов и методов. Постановка конкретных задач вытекает из современных потребностей развития теории и эксперимента в физике полей и частиц (в том числе и в ОИЯИ).

Результаты исследований:

В развитие ковариантного подхода Федорова дана явно релятивистски-ковариантная алгебраическая формулировка уравнений и лагранжиана для взаимодействующих частицы со спином 1/2 и калибровочного поля (поля Янга–Миллса) в терминах операций определенной ранее релятивистской векторной алгебры, дополненной алгеброй матриц и векторов в N-мерном пространстве внутренней (динамической) симметрии. Алгебраическим способом найдено частное решение уравнения для безмассовой частицы со спином 1/2 во внешнем неабелевом калибровочном поле с постоянным и однородным потенциалом при произвольной размерности пространства внутренней симметрии. (А. М. Федоровых, [1.1].)

С помощью кватернионного аналога векторной параметризации группы Лоренца изучены вращательные симметрии кватернионных реализаций фрактальных множеств для итерационной формулы Жулиа-Фату (А. А. Богуш, А. З. Газизов, Ю. А. Курочкин, В. Т. Стосуй, [1.10]).

Разработан новый подход к решению квантово-механической задачи Кеплера в пространствах постоянной кривизны, основанный на использовании алгебры двойных чисел. Показано, что состояния с одинаковыми энергиями непрерывного спектра для отталкивающего и притягивающего потенциалов в квантово-механической задаче Кеплера могут быть объединены в супердублет. В классической задаче Кеплера использование двойных чисел дает возможность сформулировать симметрию относительно двумерных преобразований Лоренца для инфинитного движения и установить его соответствие релятивистскому гиперболическому (равноускоренному) движению частицы, обусловленному ее взаимодействием, например, с постоянным электрическим или гравитационным полем. (А. А. Богуш, Ю. А. Курочкин, [1.2].)

Установлено, что гамильтониан квантово-механической задачи, описывающей движение точки в трехмерном пространстве постоянной кривизны — на трехмер-

ной сфере, используемый при построении квантово-механической модели квазичастиц, электронов, дырок и их связанных состояний — экситонов, запертых в квантово-размерной точке, допускает интерпретацию в терминах зависимости эффективной массы от координат (В. В. Грицев, Ю. А. Курочкин, [1.13, 1.14].)

Для гравитационной волны, излучаемой заряженной частицей, движущейся в поле плоской электромагнитной волны круговой поляризации, найдено выражение, определяющее зависимость гравитационной силы, действующей на пробную частицу, от интенсивности электромагнитной волны. Проведено разделение переменных в уравнении Дирака в статическом пространстве Эйнштейна для случая, когда метрика сферы задана в эллиптических координатах. (В. С. Отчик, [1.6, 2.1].)

Построена теория частиц со спином 0, 1/2 и 1, взаимодействующих с электромагнитным и гравитационным полями, на основе описания этих частиц с помощью релятивистских волновых уравнений, заданных в пространствах расширенных наборов представлений группы Лоренца. При этом переход от свободных к взаимодействующим полям осуществляется на основе одновременного использования принципа калибровочной инвариантности и известного рецепта Тетроде–Вейля–Фока–Иваненко. В частности, показано, что в рамках такого подхода, наряду с дополнительным электромагнитным взаимодействием, обусловленным наличием у частицы со спином 1/2 аномального магнитного момента, имеет место дополнительное взаимодействие этой частицы с гравитационным полем, обусловленное кривизной пространства-времени. (А. А. Богуш, В. М. Редьков, Н. Г. Токаревская, ЛФВЭ ИФ НАНБ; В. В. Кисель, БГПУ, [1.3–1.5, 1.11, 1.12, 2.2, 2.3, 2.5, 2.6].)

Выполнен анализ решения уравнения Шредингера в классическом пределе. Показано, что требования непрерывности и конечности общего решения, записанного с помощью производящей функции Гамильтона, приводят к квантованию классического действия и асимптоте точного решения. С помощью предложенного классического решения получены точные собственные значения энергии для знаменитого (известного как не решаемое точно обычными методами) корнелльского потенциала. Выполнен анализ нулевого ВКБ-приближения в квантовой механике; получены простые формулы связи для волновой функции и условие квантования. Показано, что нулевое приближение соответствует главному члену асимптотического ряда в теории дифференциальных уравнений второго порядка и воспроизводит асимптоту точного решения. С помощью предложенного подхода получены точные собственные значения для известных точно решаемых задач в квантовой механике. (М. Н. Сергеенко, [1.15, 1.16, 2.7, 2.8].)

По материалам исследований, выполненных в рамках данной темы, опубликовано 13 и направлено в печать семь работ, прочитано три научных доклада. Кроме того, подготовлены и доложены материалы обзорного характера (см. [1.30–1.32, 2.12, 2.20]).

1.2. Усовершенствование теоретических и феноменологических средств описания, расчета и анализа процессов электрослабого взаимодействия элементарных частиц; разработка новых предложений для включения в экспериментальные программы исследований (2001–2005 гг.).

Исследование возможных расширений стандартной модели электрослабых взаимодействий и ожидаемых их экспериментальных проявлений (2001 г.).

Обоснование. В физике электрослабых взаимодействий актуальными остаются исследования, направленные на поиск возможных отклонений от стандартной модели. В частности, представляют интерес вопросы, относящиеся к поиску и выявлению возможных эффектов, обусловленных анапольным взаимодействием и *CP*-нарушениями. Новые экспериментальные возможности для исследований открываются в связи с созданием $\gamma\gamma$-коллайдеров.

Результаты исследований:

Изучены возможности рождения $n'S_0$-состояний связанных $(\mu^+\mu^-)_b$- и $(\tau^+\tau^-)_b$-атомов в $\gamma\gamma$-столкновениях. Оценены все вероятности различных каналов распада таких систем. Получены выражения для полных сечений рождения и распада этих состояний в реалистических условиях энергетических разбросов пучков γ-квантов. (А. А. Малик, И. С. Сацункевич, [1.7, 1.17, 2.10].)

Предложены способы извлечения сведений о *P*- и *CP*-квантовых числах бозонов Хиггса в $e\bar{e}$- и *pp*-столкновениях. Наиболее подходящая процедура протестирована на данных LEP-2 по поиску бозона Хиггса. (В. В. Гилевский, И. С. Сацункевич.)

Изучены нарушения стандартной модели электрослабых взаимодействий за счет возможных *P*- и *CP*-нарушающих взаимодействий, обусловленных наличием анапольных и электрических дипольных моментов у калибровочных бозонов. Найдены новые ограничения на анапольные моменты заряженных лептонов по данным группы L3 (ЦЕРН, Женева). (В. В. Махнач, И. С. Сацункевич и др., [1.18, 1.19, 2.14, 2.15].)

Проведен детальный анализ возможного *CP*-нарушения в лептонном секторе по изучению поляризации μ^--мезона в распаде $\eta \to \mu^+\mu^-$ (И. С. Сацункевич, В. В. Гилевский, совместно с Н. В. Максименко, ГГУ).

Рассчитан процесс двухфотонного излучения в поле интенсивной лазерной волны. Этот процесс важен для изучения реакций, идущих на γe-, $\gamma\gamma$-коллайдерах. Разработан аппарат, позволяющий рассчитывать дифференциальные сечения поляризованных частиц и поляризационные характеристики в произвольном спиновом базисе через диагональные амплитуды реакций. (С. М. Сикач, [1.8, 1.20, 2.4, 2.11].)

Опубликовано пять и направлено в печать пять статей, сделано три доклада.

2. По теме 01-3-1029-99/2003 «Теория атомного ядра и других конечных систем». Руководители В. В. Буров, В. В. Воронов

Теоретическое и экспериментальное исследование процессов взаимодействия фотонов с дейтронами с целью определения характеристик электромагнитной структуры нуклонов (2001–2005 гг.).

Разработка дополнительных предложений для экспериментов по определению поляризуемостей нуклонов в процессах электромагнитного взаимодействия с участием дейтрона (2001 г.).

Обоснование. В ИФ НАНБ (совместно с сотрудниками ФИ РАН) в последние годы успешно проводятся теоретические исследования, направленные на построение физических моделей и создание соответствующих компьютерных программ, обеспечивающих адекватное описание процессов взаимодействия гамма-квантов с дейтронами. Они послужили теоретической основой для постановки и проведения соответствующих экспериментов (в частности, совместно с сотрудниками II Физического института Геттингенского университета), последующей обработки и физической интерпретации получаемых результатов о величине электрической и магнитной поляризуемостей нуклонов. Запланированные на 2001 г. исследования являются логическим продолжением и естественным развитием этих работ.

Результаты исследований:

Детально исследован процесс инклюзивного фоторождения пионов на дейтроне в области первого резонанса. Выполнены расчеты наблюдаемых характеристик процесса, основанные на использовании усовершенствованного диаграммного подхода. Получено хорошее согласие с экспериментальными данными по полному и дифференциальному сечениям. После обработки результатов последних экспериментальных измерений, полученных при изучении дейтронного комптон-эффекта, определены новые, более точные значения для величин электрической и магнитной поляризуемостей нейтрона. (М. И. Левчук и др., [1.22, 2.9].)

В рамках диаграммно-кваркового подхода построены эффективные лагранжианы взаимодействия электромагнитного поля с адронами при учете их поляризуемостей, в том числе спиновых (О. М. Дерюжкова, Н. В. Максименко, А. Н. Сердюков, ГГУ; Л. Г. Мороз, [1.9]).

Проведено исследование влияния нелинейных эффектов в процессе обратного комптоновского рассеяния циркулярно поляризованных лазерных фотонов на пучке ультрарелятивистских продольно-поляризованных электронов — базовом процессе для будущих $\gamma\gamma$ (фотонных) коллайдеров. Учтено, что для увеличения вероятности $e\gamma$-конверсии требуется такая большая плотность лазерных фотонов, которая обеспечивала бы взаимодействие электрона одновременно с несколькими фотонами (нелинейный комптон-эффект). Получены данные о спектрах энергии, спиральностях конечных фотонов и электронов, а также о распределениях $\gamma\gamma$-све-

тимостей с полными спиральностями, равными 0 или 2. Показано, что очень высокая интенсивность лазерной волны приводит к расширению энергетических спектров (светимостей) и их сдвигу в сторону низких энергий (инвариантных масс). В итоге установлены новые возможности для оптимизации области конверсии на фотонных коллайдерах и для более детального исследования протекающих в них физических процессов. (М. И. Левчук, М. В. Галынский (ЛСВ ИФ НАНБ), Э. А. Кураев (ОИЯИ), В. Тельнов (НИИЯФ МГУ), [1.21, 1.22, 2.13]).

Опубликовано четыре и направлено в печать две работы; прочитано два доклада.

3. По теме 02-0-1007-94/2005 «ATLAS. pp-эксперимент общего назначения на LHC». Руководитель Н. А. Русакович

Разработка, создание и испытания центральной части адронного калориметра TILECAL ATLAS (2001–2005 гг.).

Участие в усовершенствовании конструкции адронного калориметра TILECAL. Проведение новых тестовых испытаний; калибровка, моделирование и определение характеристик калориметра TILECAL. Исследование некоторых особенностей физических процессов, протекающих в адронном калориметре. Разработка предложений для включения в программы исследований на LHC в условиях детектора ATLAS (2001 г.).

Обоснование. В 1994 г. группа сотрудников ЛФВЭ ИФ НАНБ была официально включена в состав международной научной коллаборации ATLAS (TILECAL sub-collaboration) по созданию детектора ATLAS для LHC в ЦЕРН (Женева). Конкретная тематика исследований в отчетном году была определена Проблемно-тематическим планом НИР и международного сотрудничества ОИЯИ на 2001 г. Предполагалось, прежде всего, продолжение полномасштабного исследования характеристик прототипов комбинированного (электромагнитного и адронного) калориметра, а также адронного калориметра в отдельности на основе тестовых испытаний в пучках легких частиц на SPS ЦЕРН.

Результаты исследований:

Выполнена реконструкция энергии частиц для прототипа комбинированного (адронного и электромагнитного) калориметра в детекторе ATLAS с помощью предложенного нового непараметрического метода (e/h-метода), который позволил провести такую реконструкцию на первом триггерном уровне. Использованы экспериментальные данные последних тестовых испытаний калориметра в пучках пионов с энергией 10–300 ГэВ на ускорителе SPS ЦЕРН. Введено обобщение параметризации продольного профиля адронных ливней на основе учета данных о нескомпенсированностях калориметра и алгоритма построения кривых, описывающих продольный профиль этих ливней в случае комбинированного (адронного и

электромагнитного) калориметра. (Ю. А. Кульчицкий, М. В. Кузьмин и др., [1.23, 1.24, 2.16].)

Проведены измерения спектров потерь энергии для мюонов с энергией 180 ГэВ в условиях адронного калориметра ATLAS в пучке H8 ускорителя SPS ЦЕРН. Обеспечено хорошее согласование полученных экспериментальных данных с теоретическими предсказаниями. На той же установке измерены и теоретически описаны спектры энергий и эффективные сечения фотоядерных взаимодействий мюонов в железе в условиях адронного калориметра ATLAS. Установлено очень хорошее согласие с результатами теоретических расчетов. (А. А. Богуш, Ю. А. Кульчицкий, М. В. Кузьмин и др., [1.26, 2.17].)

Определены отношения e/h для нулевого модуля адронного калориметра ATLAS при пяти значениях псевдобыстроты в области энергий 10–300 ГэВ на основе обработки экспериментальных данных, полученных в процессе тестовых испытаний калориметра в июле 1999 г. Установлена независимость этих отношений от значений псевдобыстроты. Проведена калибровка ячеек адронного калориметра на основе обработки данных, полученных при тестовых испытаниях калориметра в августе 2000 г. Проведено сравнение полученных результатов с калибровочными данными CIS. (Ю. А. Кульчицкий, М. В. Кузьмин и др., [1.26, 1.27].)

Итоги исследований, приведших к выводу о том, что физические характеристики калориметрического комплекса ATLAS отвечают тем высоким требованиям, которые необходимы для реализации экспериментальных программ по физике высоких энергий на большом адронном коллайдере, отражены в докторской диссертации основного исполнителя этих работ от Белоруссии Ю. А. Кульчицкого [1.28].

Совместно со специалистами ОИЯИ и минского завода МЗОР разработана специальная технология высокоточной обработки крупногабаритных изделий из меди марки М1. На этой основе на МЗОР организовано производство пластин для поглотителя жидкоаргонного калориметра детектора ATLAS. Изготовлено и отправлено в ОИЯИ 75 пластин. (В. С. Румянцев и др.)

В рамках подготовки предложений для включения в будущие экспериментальные программы на LHC проведен анализ существующих литературных данных, относящихся к экспериментальной практике детектирования и измерения pp-столкновений с очень высокой множественностью. Исследованы, в частности, возможности определения корреляционных функций для таких событий. (Ю. А. Кульчицкий [2.18].)

Предложен новый механизм жесткого рассеяния адронов при высоких энергиях. Поперечные импульсы адронов генерируются в результате последовательных многопомеронных обменов, в которых померон моделируется как обмен двумя глюонами. Веса диаграмм множественных померонных обменов вычисляются с помощью эйконального приближения. Вычислены сечения рассеяния по попереч-

ным импульсам для ряда реакций при энергиях LHC. (М. Н. Сергеенко, [1.29, 2.19].)

По материалам выполненных в рамках данной темы исследований опубликовано семь и принято к печати пять работ, прочитано 12 научных докладов.

Приложение 1

Статьи, опубликованные сотрудниками ЛФВЭ в 2001 г.

№ п/п	Авторы	Название работы	Где опубликована работа
1.1	А. М. Федоровых	Уравнение для спинорного и калибровочного полей в формализме релятивистской векторной алгебры	В сб.: Ковариантные методы в теоретической физике. Физика элементарных частиц и теория относительности. Минск: ИФ НАНБ, 2001. С. 162–167
1.2	А. А. Богуш, Ю. А. Курочкин	Двойные числа и состояния непрерывного спектра в задаче Кеплера	Там же. С. 51–54
1.3	В. В. Кисель, В. М. Редьков	Уравнение Шамали–Капри и дополнительное взаимодействие векторной частицы с гравитационным полем	Там же. С. 107–112
1.4	Н. Г. Токаревская, В. М. Редьков	О тензоре энергии-импульса векторной частицы в гравитационном поле	Там же. С. 143–148
1.5	Н. Г. Токаревская, В. М. Редьков	Формализм Даффина–Кеммера и конформная инвариантность	Там же. С. 149–154
1.6	В. С. Отчик	Разделение переменных в уравнении Дирака в эллиптических координатах на сфере	Там же. С. 130–133
1.7	А. А. Малик, И. С. Сацункевич	Об условиях рождения нового атома	Там же. С. 113–117
1.8	С. М. Сикач	О расчете реакций поляризованных частиц	Там же. С. 134–136
1.9	О. М. Дерюжкова, Н. В. Максименко, Л. Г. Мороз, А. Н. Сердюков	Эффективные лагранжианы взаимодействия электромагнитного поля с адронами в диаграммных кварковых моделях	Там же. С. 71–76
1.10	A. A. Bogush, A. Z. Gazizov,	On symmetry properties of quaternionic analogs of Julia sets	nlin.CD/0105060

№ п/п	Авторы	Название работы	Где опубликована работа
	Yu. A. Kurochkin, V. T. Stosui		
1.11	В. В. Кисель, Н. Г. Токаревская, В. М. Редьков	О теории векторных частиц с расширенным набором представлений группы Лоренца в плоском и римановом пространствах	Препринт № 730. Минск: ИФ НАНБ, 2001. 25 с.
1.12	А. А. Богуш, В. В. Кисель, Н. Г. Токаревская, В. М. Редьков	О теории скалярной частицы в пространствах с расширенным набором представлений группы Лоренца	Весці НАНБ. С. ф.-м. н. 2001. №3. С. 65–71
1.13	V. V. Gritsev, Yu. A. Kurochkin	Model of excitations in quantum dots based on quantum mechanics in spaces of constant curvature	Phys. Rev. 2001. V. B64. P. 035308
1.14	В. В. Грицев	Нелинейные алгебры симметрий в квантовых системах	Автореферат дис.... канд. физ.-мат. наук. Минск: ИФ НАНБ, 2001. 19 с.
1.15	M. N. Sergeenko	Solution of the wave equation in the classical limit	Preprint UICHEP-TH/01-4. Chicago, 2001
1.16	M. N. Sergeenko	The zero-th WKB approximation in quantum mechanics	Preprint UICHEP-TH/01-5. Chicago, 2001
1.17	А. А. Малик, И. С. Сацункевич	О возможности рождения $(\mu^+\mu^-)_b$-атома	Весці НАНБ. С. ф.-м. н. 2001. №3. С. 78–82
1.18	В. В. Махнач	Ограничения для анапольного взаимодействия заряженных фермионов с энергией 66 ГэВ	Весці НАНБ. С.ф.-м. н. 2001. №4. С. 68–72
1.19	G. G. Boyarkina, O. M. Boyarkin, V. V. Macknach	Anomalous magnetic moment of muons in the extensions of the standard model	Proc. 10th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (Moscow, August, 2001)
1.20	M. I. Levchuk, A. I. L'vov	Deuteron Compton scattering and electromagnetic polarizabilities of the neutron	Nucl. Phys. 2001. V. A684. P. 490–492
1.21	M. V. Galynsky, E. A. Kuraev, M. I. Levchuk, V. I. Telnov	Nonlinear effects in back Compton scattering at photon colliders	NIM. 2001. V. A472. P. 267–279
1.22	B. Badelek,..., M. Galynski, M. Levchuk et al. (TESLA study group)	TESLA: the superconducting electron positron linear collider with an integrated X-ray laser laboratory. Technical design report. Part 6. Appendices: The photon collider at TESLA	DESY 2001-011. ECFA 2001-209; TESLA Report 2001-2; TESLA-FEL. 2001-05. March 2001. P. 1–98

№ п/п	Авторы	Название работы	Где опубликована работа
1.23	Yu. A. Kulchitsky	Hadron energy reconstruction for the ATLAS barrel combined calorimeter using nonparametrical method (Report)	Proc. of IX Int. Conf. on Calorimetry in Particle Physics (Anney-2000)
1.24	Yu. A. Kulchitsky, V. B. Vinogradov	On the parametrization of the longitudinal hadronic shower in combined calorimetry	NIM. 2000. V. A455. P. 499–501
1.25	P. Amaral, ..., A. A. Bogush, Yu. A. Kulchitsky, M. V. Kuzmin et al. (ATLAS TILECAL collaboration)	Precise measurement of the energy loss spectrum of 180 GeV muons in the iron absorber of the TILECAL module 0	Eur. Phys. Journ. 2001. V. C20. P. 487–495
1.26	Yu. A. Kulchitsky et al.	The *e*/*h* ratio of the ATLAS barrel tile calorimeter	ATLAS Note. ATL-TILECAL-2001-001. Geneva: CERN, 2001. 17 p.; LANL e-print Archive hep-ex/0104046
1.27	Yu. A. Kulchitsky et al.	Electron calibration for the TILECAL module cells	ATLAS Note. ATL-TILECAL-2001-002. Geneva: CERN, 2001. 6 p.
1.28	Ю. А. Кульчицкий	Дифференциальные сечения реакций $\pi^+ A \to K^0_S + X$, $K + A \to K^0$, $K^{*0}(892)^0 + X$ при 11,2 ГэВ и методы измерения характеристик калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС	Автореф. дис.... докт. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 2001. 28 с.
1.29	M. N. Sergeenko	Hard scattering of hadrons in the nonperturbative approach of QCD	Preprint UICHEP-TH/01-3, Chicago, 2001
1.30	А. А. Богуш	Об основных итогах исследований по физике элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий в Беларуси за 1996–2000 гг. (К 90-летию со дня рождения академика Ф. И. Федорова)	В сб.: Ковариантные методы в теоретической физике. Физика элементарных частиц и теория относительности. Минск: ИФ НАНБ, 2001. С. 5–16
1.31	А. А. Богуш	Об основных направлениях и итогах выполнения государственной программы фундаментальных исследований Республики Беларусь «Кварк» (1996–2000 гг.)	Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2001. С. 63–77
1.32	А. А. Богуш	Теория элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий	Наука Беларуси в XX столетии. Минск: Белорусская наука, 2001. С. 260–273

Статьи, направленные в печать сотрудниками ЛФВЭ в 2001 г.

№ п/п	Авторы	Название работы	Куда направлена работа
2.1	V. S. Otchik, P. L. Shkolnikov	On the gravitational radiation emitted by a charged particle in the field of an electromagnetic wave	Proc. X Ann. Sem. «Nonlinear Phenomena in Complex Systems» (Minsk-2001). Minsk.: IP NASB
2.2	A. A. Bogush, V. V. Kisel, V. M. Red'kov, N. G. Tokarevskaya	Yang–Mills equations based on extended 15-component description of spin 1 massless field	Ibid.
2.3	V. M. Red'kov	Monopole BPS-solutions of the Yang–Mills equations in space of Euclide–Riemann and Lobachevsky	Ibid.
2.4	S. M. Sikach	Nonlinear and spin effects in two-photon annihilation of a fermion pair in an intensive laser wave	Ibid.
2.5	В. В. Кисель, Н. Г. Токаревская, В. М. Редьков	Теория Петраша для частицы со спином 1/2 в искривленном пространстве-времени	Препринт. Минск.: ИФ НАНБ
2.6	А. А. Богуш, В. В. Кисель, Н. Г. Токаревская, В. М. Редьков	Теория Петраша для частицы со спином 1/2 в искривленном пространстве-времени	Весці НАНБ. С. ф.-м. н. 2002. № 1
2.7	M. N. Sergeenko	Solution of the wave equation in the classical limit	Phys. Rev. D
2.8	M. N. Sergeenko	The zero-th WKB approximation in quantum mechanics	Phys. Rev. D
2.9	M. I. Levchuk	Inclusive reaction $D(\gamma\pi)NN$ in the first resonance region	Proc. Int. School-Seminar «The Actual Problems of Particle Physics» (August 7–16, 2001, Gomel). Dubna: JINR
2.10	I. S. Satsunkevich	Production and properties of new atoms	Ibid.
2.11	S. M. Sikach	About the general method of calculation reactions of spin particles and its applications	Ibid.

№ п/п	Авторы	Название работы	Куда направлена работа
2.12	A. A. Bogush	Fedorov's covariant approach and development of particle physics in Belarus (1990–2000)	Ibid.
2.13	M. V. Galynsky, M. I. Levchuk	Nonlinear effects in backward compton scattering and their influence on the luminosity of gamma-gamma collisions	Proc. of IX Intern. Workshop and School «Nonlinear Dynamics & Complex Systems» (September 17–20, Minsk-2001)
2.14	G. G. Boyarkina, O. M. Boyarkin, V. V. Macknach	The $(g-2)_{\mu}$ Crisis and the Higgs bosons physics	Phys. Rev. D
2.15	Г. Г. Бояркина, О. М. Бояркин, В. В. Махнач.	Аномальный магнитный момент мюона в лево-правой модели	Ядерная физика
2.16	S. Akhmadaliev, ..., A. A. Bogush, Yu. A. Kulchitsky, M. V. Kuzmin et al.	Hadron energy reconstruction for the ATLAS calorimetry in the framework of the non-parametrical method	NIM
2.17	P. Amaral, ..., A. A. Bogush, Yu. A. Kulchitsky, M. V. Kuzmin et al.	Measurment of the photonuclear interactions of 180 GeV muons with the TILECAL module 0 and prototypes	Eur. Phys. Journ. C
2.18	Yu. A. Kulchitsky et al.	Calculation of correlators for very high multiplicity events with ATLAS at LHC	Proc. II Int. Workshop «Very High Multiplicity Physics» (April 7–9, 2001). Dubna: JINR
2.19	M. N. Sergeenko	Hard scattering of hadrons in the nonperturbative approach of QCD	Phys. Rev. Lett.
2.20	А. А. Богуш	О сотрудничестве ИФ НАНБ (г. Минск)–ГГУ (г. Гомель) в области электродинамики адронов и физики высоких энергий: история и итоги (К 75-летию со дня рождения академика Б. В. Бокутя)	Препринт. № 734. Минск.: ИФ НАНБ

Научные конференции с участием сотрудников ЛФВЭ в 2001 г.

№ п/п	Авторы	Название доклада	Название конференции
А. Конференции и другие научные мероприятия, проведенные за пределами РБ			
3.1	Yu. A. Kulchitsky	Calculation of correlators for very high multiplicity events at LHC	The II Intern. Workshop «Very High Multiplicity Physics» (Russia, Dubna, JINR, April 7–9, 2001)
3.2	Yu. A. Kulchitsky	Study of electrons in the August 2001 TILECAL test beam	Intern. Conf. of the ATLAS Collaboration (CERN, Geneva, Switzerland, 15.10–17.10.2001)
3.3	Yu. A. Kulchitsky	Multiple correlators and pile-up with ATLAS	Idem
3.4	Yu. A. Kulchitsky	Study of correlators for VHM events with ATLAS	Intern. ATLAS Collaboration Physics Workshop (Sweden, Lund University, 14.09.2001)
3.5	Yu. A. Kulchitsky	Differential cross section of inclusive K^0 and $K^0(892)^*$ mesons production in hadron-nuclear collisions and methods for measurement of the ATLAS calorimetry performance	Academic Council D 720.001.03. (Russia, Dubna, JINR, 29.06. 2001)
3.6	M. V. Kuzmin	Measurement of the e/h constant for production modules	Intern. Conf. of the ATLAS Collaboration (CERN, Geneva, Switzerland, 11.05–12.05.2001)
3.7	Yu. A. Kulchitsky	Stability of the pC/GeV constant (1999–2000 Test beams)	Idem
3.8	Yu. A. Kulchitsky	Differential cross section of inclusive K^0 and $K^0(892)^*$ mesons production in hadron-nuclear collisions and methods for measurement of the ATLAS calorimetry performance	Seminar of the Multi-Particle Hadron Processes Department (Russia, Dubna, JINR, 19.04–24.04.2001)
3.9	Yu. A. Kulchitsky	Hadron-nuclear interaction and ATLAS hadronic calorimetry	Idem
3.10	Yu. A. Kulchitsky, J. Manjavidze	Rough measurement of very high multiplicity events	Intern. Conf. of the ATLAS Collaboration (CERN, Geneva, Switzerland, 19.02–21.02.2001)

№ п/п	Авторы	Название доклада	Название конференции
3.11	M. V. Kuzmin	Response of module-12 on electrons and CIS (August 2000 test beam)	Idem
3.12	Yu. A. Kulchitsky	The $e/h = 1.36 \pm 0.01$ for module-0 (June 1999 test beam)	Idem
		Б. Конференции и другие научные мероприятия, организованные в РБ при участии исполнителей программы	
3.13	A. A. Bogush	Fedorov's covariant approach and development of particle physics in Belarus (1990–2000)	The VI Intern. School-Seminar «The Actual Problems of Particle Physics» (Belarus, Gomel, August 7–16, 2001)
3.14	I. S. Satsunkevich	Production and properties of new atoms	Idem
3.15	M. I. Levchuk	Inclusive reaction $D(\gamma\pi)NN$ in the first resonance region	Idem
3.16	S. M. Sikach	About the general method of calculation reactions of spin particles and its applications	Idem
3.17	A. A. Bogush, V. V. Kisel, V. M. Red'kov, N. G. Tokarevskaya	Yang–Mills equations based on extended 15-component description of spin 1 massless field	The X Ann. Sem. «Nonlinear Phenomena in Complex Systems» (Minsk-2001)
3.18	V. S. Otchik, P. L. Shkolnikov	On the gravitational radiation emitted by a charged particle in the field of an electromagnetic wave	Idem
3.19	S. M. Sikach	Nonlinear and spin effects in two-photon annihilation of a fermion pair in an intensive laser wave	Idem
3.20	M. V. Galynsky, M. I. Levchuk	Nonlinear effects in backward compton scattering and their influence on the luminosity of gamma-gamma collisions	The IX Intern. Workshop and School «Nonlinear Dynamics & Complex Systems» (September 17–20, Minsk-2001)
3.21	А. А. Богуш	О сотрудничестве ИФ НАНБ (г. Минск) – ГГУ (г. Гомель) в области электродинамики адронов и физики высоких энергий: история и итоги (К 75-летию со дня рождения академика Б. В. Бокутя)	Междунар. науч. конф. «Проблемы взаимодействия с веществом» (К 75-летию со дня рождения Б. В. Бокутя) (Белоруссия, Гомель, 30 октября – 1 ноября 2001 г.)

Продолжение приложения 3

№ п/п	Авторы	Название доклада	Название конференции
3.22	А. А. Богуш	Ковариантный подход Федорова в физике фундаментальных взаимодействий	Общ. собр. Отд. физики, математики и информатики НАН Белоруссии, Правления Белорусского физического общества, ученых советов физического факультета БГУ и ИФ НАНБ, посвященное 90-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Минск, 19 июня 2001 г.)

ОБ ИТОГАХ СОТРУДНИЧЕСТВА ИФ НАНБ С ЛЯП ОИЯИ

А. А. Богуш, Л. М. Томильчик

Институт физики им. Б. И. Степанова НАНБ, Минск

Введение

В Белоруссии под руководством Федора Ивановича Федорова (1911–1994) в послевоенные годы развернулись систематические исследования в области физики элементарных частиц и их взаимодействий. Успешное развитие этих работ привело к пониманию необходимости выхода белорусских физиков на современный эксперимент по физике высоких энергий. Направление наших молодых ученых в Объединенный институт ядерных исследований в подмосковном городе Дубне оказалось самым простым и естественным решением данной проблемы.

Важнейшим стимулом для установления многолетнего сотрудничества физиков Белоруссии с учеными и специалистами из ОИЯИ стало проведение в 1971 г. первой в республике Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий (Гомель-71). Кстати, в дальнейшем у нас прошло еще шесть таких школ ОИЯИ (Гомель-73, 77; Минск-79, Гомель-97, 99, 2001).

В 1973 г. группа молодых ученых из Института физики АН БССР (В. С. Румянцев, Н. А. Русакович, А. С. Курилин, Ю. А. Кульчицкий), а также из Гомельского государственного университета (А. М. Дворник, М. Н. Сергеенко) была направлена (по инициативе Л. Г. Мороза) на долгосрочную научную стажировку в Лабораторию ядерных проблем (ЛЯП) ОИЯИ. Позже к ним присоединились сотрудники лаборатории ядерной спектроскопии ИФ АН БССР (Е. Ф. Зязюля, Н. А. Кучинский, П. Г. Евтухович).

После соответствующей подготовки в ЛЯП ОИЯИ указанные выше белорусские физики приняли непосредственное участие в реализации ряда экспериментальных программ. Первая из них была посвящена изучению закономерностей множественного рождения частиц (в группе Ю. А. Будагова), вторая — поиску редких распадов частиц и атомных ядер (в группе С. М. Коренченко). В конечном итоге все они по результатам выполненных в Дубне экспериментальных работ защитили кандидатские диссертации. Н. А. Русакович, А. М. Дворник и Ю. А. Кульчицкий стали впоследствии докторами наук.

В 1976 г. на базе ИФ АН БССР и ГГУ был образован (при действенной помощи и активной поддержке директора ЛЯП ОИЯИ В. П. Джелепова и руководителя работ в Дубне Ю. А. Будагова, президента АН БССР Н. А. Борисевича и ректора

ГГУ Б. В. Бокутя) Центр по обработке фильмовой информации (ЦОФИ). Председателем совета ЦОФИ являлся Ф. И. Федоров, ученым секретарем — Л. Г. Мороз. Экспериментальные материалы для обработки поступали в ЦОФИ из ЛЯП ОИЯИ в виде фотопленок, снятых в пузырьковых камерах на дубненском синхрофазотроне.

В рамках ЦОФИ силами небольших групп минских и гомельских физиков и инженеров, прошедших, как правило, соответствующую подготовку в ЛЯП ОИЯИ, были разработаны и введены в действие оригинальные просмотрово-измерительные системы ПУОС-ГК-4-Минск-32 и ПУОС-КАМАК-СМ-4 (см. [1]), создано и отлажено необходимое программно-математическое обеспечение. Таким образом была реализована в Белоруссии известная идея о «физике высоких энергий на расстоянии».

В 1978 г. в ИФ АН БССР была открыта первая в республике лаборатория физики высоких энергий (ЛФВЭ). Первоначально в ее состав входила и гомельская группа ЦОФИ (на условиях двойного подчинения). Долгое время в ЛФВЭ ИФ АН БССР были сконцентрированы практически все работы по экспериментальной физике элементарных частиц, проводимые в Белоруссии.

Начиная с 1976 г. сотрудники ЛФВЭ ИФ АН БССР и ГГУ активно включились в реализацию всех этапов экспериментальной программы «Гиперон» на серпуховском 76 ГэВ-ном протонном синхротроне: от проектирования, создания и испытаний оригинального спектрометра «Гиперон», разработки необходимого программно-математического обеспечения — до проведения экспериментальных сеансов, обработки и физической интерпретации полученных экспериментальных данных.

В 1989–1993 гг. белорусские физики при содействии ОИЯИ приняли активное участие в проведении работ по созданию многочастичного спектрометра (МЧС) для строящегося в Серпухове ускорительно-накопительного комплекса (УНК), а несколько позже (1991–1993) вошли также в состав международной научной коллаборации CDC, деятельность которой была направлена на создание детекторных систем для строящегося в США сверхпроводящего суперколлайдера SSC. Значительный вклад в организацию и проведение соответствующих исследований в Белоруссии был внесен В. С. Румянцевым (см. [2–5]). К сожалению, как известно, работы по обоим проектам (УНК и SSC) были прекращены, главным образом, из-за отсутствия необходимых для их реализации денежных ассигнований.

В 1990–1994 гг. большая группа белорусских физиков из ИФ АН БССР, НИИ ЯП БГУ и НЦ ФЧВЭ БГУ, а также из ряда других организаций республики была включена, при поддержке и сотрудничестве с ОИЯИ, в две крупнейшие современные международные научные коллаборации по экспериментальной физике высоких энергий: CMS и ATLAS. Как известно, эти коллаборации сформированы в ЦЕРН для проведения крупномасштабных работ по созданию калориметрических комплексов для строящегося в Женеве большого адронного коллайдера (LHC).

Одновременно, в период с 1993 по 2000 г., сотрудники ЛФВЭ ИФ НАНБ, проходившие научную стажировку в ЛЯП ОИЯИ, участвовали в работах по реализации эксперимента WA102, осуществляемого в ЦЕРН на суперпротонном синхротроне SPS с помощью спектрометра OMEGA и направленного на поиск экзотических мезонных состояний.

Таким образом, сотрудники ИФ НАНБ приняли участие в реализации семи крупных международных экспериментальных проектов и программ в области физики высоких энергий, выполняемых коллективом ЛЯП ОИЯИ.

Ниже будут приведены лишь некоторые основные научные результаты, полученные белорусскими физиками совместно с дубненскими учеными и специалистами в процессе их многолетнего (1973–2001) научного сотрудничества (см. [6]), в том числе отдельно — по проекту ATLAS.

1. Краткие сведения о некоторых итогах сотрудничества белорусских физиков с учеными ЛЯП ОИЯИ в области экспериментальной физики частиц

Как уже отмечалось выше, все началось с участия сотрудников ИФ АН БССР (в первую очередь В. С. Румянцева) в обработке (в том числе в рамках ЦОФИ) экспериментальных данных, относящихся к изучению процессов множественного рождения частиц при энергии 5 ГэВ. Эти данные были получены в ЛЯП ОИЯИ с помощью 200-литровой пропановой пузырьковой камеры на дубненском синхрофазотроне. Были измерены эффективные сечения для процессов инклюзивного рождения частиц в пион-протонных и пион-ядерных столкновениях. Установлено существенное расширение области энергии реакций, для которых выполняются условия масштабной инвариантности (скейлинг). Выведено новое соотношение, связывающее сечение рождения нестабильных частиц с сечениями их двухчастичных распадов. Исследованы возможные состояния дипротонного резонанса. (См. [7–9].)

Важные физические результаты были получены в процессе реализации программы экспериментов на серпуховском ускорителе с помощью спектрометра «Гиперон». Эти работы проводились нашими физиками (Н. А. Русакович, А. С. Курилин, Ю. А. Кульчицкий, В. С. Румянцев, М. Н. Сергеенко) совместно с учеными и специалистами из Дубны и Серпухова, а также Баку, Братиславы, Гомеля, Еревана, Кошице, Кракова, Самарканда, Софии, Тбилиси. В итоге, в частности, с рекордной точностью были измерены эффективные сечения реакций инклюзивного рождения K-мезонов и Σ-гиперонов в πp-, πA- и KA-столкновениях при энергии 12 ГэВ в новой кинематической области. Было установлено и объяснено различие в поведении функций фрагментации валентного и морского s-кварков, изучена A-зависимость сечений от кинематических переменных. При этом была существенно модифицирована и эффективно использована модель кварк-глюон-

ных струн. Многие из полученных результатов остаются до сих пор единственными для своей области в мировой исследовательской практике. (См. [10–15].)

Значительный вклад был внесен сотрудниками ИФ НАНБ (Ф. Е. Зязюля, Н. А. Кучинский, П. Г. Евтухович) в изучение редких распадов мюонов и пионов, а также атомных ядер с помощью магнитного спектрометра ARES в отделе академика Б. Понтекорво (группа С. М. Коренченко). (См. [16].)

Позже в рамках сотрудничества физиков из ЛФВЭ ИФ НАНБ (Ю. А. Кульчицкий, В. С. Румянцев) с экспериментаторами из ЦЕРН и ОИЯИ было установлено существование нового нестабильного скалярного мезона (1450 МэВ), проведено исследование других адронных состояний, в частности, изучены возможные кандидаты в глюболы. Эти эксперименты были выполнены в ЦЕРН в пучках протонов с энергией 450 ГэВ на SPS с помощью спектрометра OMEGA. (См., например, [17, 18].)

Многие из экспериментальных результатов, полученных при участии белорусских физиков, вошли в мировой банк данных по физике частиц (см. «Review of Particle Properties»).

2. Об участии сотрудников Института физики НАН Белоруссии в реализации проекта ATLAS в ЦЕРН

а) О калориметрической системе детектора ATLAS на LHC. Начиная с 1994 г. на протяжении семи лет сотрудники ЛФВЭ ИФ НАНБ в тесном контакте с учеными и специалистами из ЛЯП ОИЯИ принимают непосредственное участие в деятельности коллаборации ATLAS.

Усилия наших физиков были нацелены, прежде всего, на разработку, сооружение и испытания адронного бочкообразного калориметра TILECAL.

На первых порах были выполнены определенные работы инженерно-технического и технологического характера, связанные с созданием нулевого модуля адронного калориметра. В частности, были организованы и проведены сравнительные испытания различных вариантов технологии лазерной резки стали с целью поиска такой технологии, которая обеспечила бы требуемую точность резки в $\pm$ 100 мкм на базе 1000 мм. В итоге была разработана и реализована (1996 г.) технология сборки нулевого модуля адронного железосцинтилляционного калориметра с продольной бочкообразной конфигурацией. (См., например, [19–21].)

Силами белорусских и дубненских физиков была проведена большая организационная работа по размещению заказов и налаживанию массового производства (штамповки) металлических плит-прокладок для TILECAL на Минском тракторном заводе. Всего переработано около 320 тонн металла. Налажена транспортировка изготовленных прокладок для дальнейшей их обработки, калибровки и сборки из Минска в Дубну, Серпухов (Россия), Прагу (Чехия), Пизу (Италия), и,

наконец, обеспечена доставка 18 (из общего числа 65) 21-тонных готовых модулей из Дубны в ЦЕРН.

Совместно со специалистами ОИЯИ и минского завода МЗОР разработана специальная технология высокоточной обработки крупногабаритных изделий из меди марки М1. На этой основе на МЗОР организовано производство пластин для поглотителя жидкоаргонного электромагнитного калориметра в детекторе ATLAS. Изготовлено и отправлено в ОИЯИ 75 пластин.

Наиболее значительные результаты были получены в процессе проведения натурных тестовых испытаний калориметров в пучках частиц с энергией 10–450 ГэВ на действующем в ЦЕРН суперпротонном синхротроне SPS. Эти испытания (начавшиеся в 1994 г.) были направлены на определение энергетического разрешения калориметров в пучках адронов и лептонов, на проверку свойств линейности, нескомпенсированности, на детальное изучение протекающих в калориметре процессов и образующихся здесь адронных ливней.

Основная цель этих исследований сводилась к установлению соответствия параметров и характеристик калориметрического комплекса в детекторе ATLAS тем физическим требованиям, которые необходимы для реализации на большом адронном коллайдере планируемых экспериментальных программ по физике высоких энергий.

б) Определение и исследование основных характеристик адронного калориметра TILECAL. Определены основные характеристики адронного калориметра TILECAL детектора ATLAS на основе проведения тестовых испытаний модуля этого калориметра при его облучении пучками электронов и пионов с энергией от 10 до 300 ГэВ на ускорителе SPS в ЦЕРН (см. [20–26]).

В частности, было исследовано ранее неизвестное влияние на энергетическое разрешение и линейность адронного калориметра продольной и поперечной утечек адронного ливня за его пределы. Обнаружен новый эффект улучшения энергетического разрешения калориметра при боковой утечке адронного ливня. Получена рекордная (0,7 %) для TILECAL линейность вдоль продольной оси [22].

Разработан и применен метод реконструкции энергии электронов, учитывающий структуру калориметра. Он позволил провести калибровку энергетической шкалы калориметра, измерить его энергетическое разрешение для электронов. С большой точностью была определена величина нескомпенсированности, отражающей различие в отклике калориметра на электромагнитную и адронную составляющие адронного ливня. (См. [23, 24].)

Были проведены детальные исследования пространственного развития адронного ливня в адронном калориметре. Разработан и применен новый метод описания этого процесса. В итоге получены ранее неизвестные теоретические и экспериментальные данные о плотности энергии адронного ливня в зависимости от его радиуса как для всего калориметра, так и в зависимости от продольных ко-

ординат. Впервые определено продольное развитие электромагнитной и адронной составляющих адронного ливня по отдельности. (См. [25, 26].)

в) Некоторые итоги натурных испытаний комбинированного калориметра ATLAS. Проведено несколько сеансов натурных тестовых испытаний комбинированного калориметра, состоящего из электромагнитного калориметра и адронного черепичного калориметра TILECAL, являющихся прототипами бочкообразной калориметрической системы ATLAS, в пучках пионов и электронов с энергиями 10–300 ГэВ. Тем самым реализована обширная программа по исследованию основных характеристик этого комбинированного калориметра (см., например, [27–30]).

В частности, были разработаны и использованы: беспарамет- рический метод определения энергии адронов в комбинированном калориметре детектора ATLAS, названный *e*/*h*-методом [28], и метод описания продольной плотности энергии адронного ливня в этом калориметре [29], основанные на учете нескомпенсированности его адронной и электромагнитной частей. В рамках *e*/*h*-метода получена рекордная (± 1 %) линейность относительно среднего значения псевдобыстроты (0,995 ± 0,003) в интервале энергий 20–300 ГэВ. В полтора раза точнее, чем полученное ранее, измерено угловое разрешение комбинированного калориметра. Полученные с помощью указанных методов результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Экспериментально измерена величина нескомпенсированности электромагнитного калориметра в комбинированном калориметре, существенно уточняющая результаты моделирования [30].

Важнейшим итогом этих исследований стало установление того факта, что калориметрический комплекс ATLAS соответствует требованиям будущих экспериментов на LHC, прежде всего по его энергетическому разрешению и линейности (см. [15]).

По материалам совместных исследований, выполненных сотрудниками ЛФВЭ ИФ НАНБ в рамках коллаборации ATLAS, опубликовано свыше 70 работ в самых престижных научных изданиях, прочитано около 60 докладов на различных международных конференциях и рабочих совещаниях коллаборации. В частности, результаты исследований по определению характеристик адронного калориметра TILECAL отражены в специальном обзорном техническом проекте [21], научным редактором физической части которого был Ю. А. Кульчицкий, а также в его докторской диссертации [15].

Некоторые другие работы выполнены белорусскими физиками из ИФ НАНБ (П. Г. Евтухович) в рамках субколлаборации по мюонной системе ATLAS. Они, в частности, относятся: к развитию методов измерения негерметичности дрейфовых трубок (MDT, Monitoren Drift Tubes), к проектированию и конструированию стендов для автоматической подготовки газовых смесей и для измерения параме-

тров дрейфовых трубок, а также к участию в создании компонентов мюонных камер на гранитной плите и стенда для испытаний этих камер.

Физиками-теоретиками ЛФВЭ ИФ НАНБ (В. В. Гилевским и И. С. Сацункевичем) разработаны конкретные предложения для включения в физическую программу экспериментов на LHC с помощью установки ATLAS, направленные на поиск проявлений новых эффектов в физике электрослабых взаимодействий, связанных с предположением о существовании анапольного взаимодействия (см., например, [31]).

Таким образом, вклад белорусских физиков в реализацию проекта ATLAS представляется весьма значительным (см. [32]). Этот вклад, как известно, общепризнан в коллаборации ATLAS и в ЦЕРН в целом.

Заключение

Все сказанное выше убедительно свидетельствует о том, что многолетнее стабильное взаимодействие белорусских физиков с многонациональным коллективом ученых и специалистов ЛЯП ОИЯИ оказалось действительно весьма эффективным и плодотворным.

Это стало возможным, в первую очередь, благодаря постоянной и действенной поддержке бывшего и нынешнего директоров ОИЯИ Николая Николаевича Боголюбова и Владимира Георгиевича Кадышевского, директора ЛЯП ОИЯИ Венедикта Петровича Джелепова и сменившего его на этом посту нашего белорусского физика Николая Артемьевича Русаковича.

Сотрудники ЛФВЭ и ЛЯС ИФ НАН Белоруссии (в том числе и бывшие) высоко оценивают выпавшую на их долю счастливую возможность работать в Дубне в знаменитой Лаборатории ядерных проблем. Они с особой теплотой вспоминают всех тех, у кого им пришлось учиться, с кем довелось делить тяготы трудовых будней и радости совместных научных свершений: Ю. А. Будагова, В. Б. Флягина, А. Г. Володько, В. Б. Виноградова, Ю. Ф. Ломакина и многих, многих других. Спасибо!

Список литературы

1. *Богуш А. А., Войтюк А. А., Мороз Л. Г., Румянцев В.С., Скоморохов А. Г., Шалдина Т. П. (Минск); Дворник А. М., Лавшук Н. П., Максименко Н. В., Сахно Н. П. (Гомель).* Полуавтоматическая установка для обработки снимков с трековых детекторов, работающая в линию с ЭВМ СМ-4 // Препринт № 450. Минск: ИФ АН БССР, 1987. 19 с.
2. *Zaitsev A. M. et al. (MPS collaboration).* Status of the Multiparticle Spectrometer (MPS) Facility // Proc. of Intern. Workshop «Physics on UNK». Serpuchov: IHEP, 1989. P. 27.

3. *Rumyantsev V. S.* Dependence of hadron calorimeter energy resolution an the properties of the wave-length shift // NIM. 1992. V. A318. P. 509.

4. *Trilling C., ..., Bogush A. A., ..., Kulchitsky Yu. A., ..., Rumyantsev V. S. et al. (Solenoidal Detector collaboration).* SDC Technical Design Report // Berceley Lawrence Laboratory SDC-92-201. SSCL-SR-1215. Berceley, USA, 1992.

5. *Cox G., ..., Rumyantsev V. S. et al.* The superfixed target beauty facility at the SSC // Nucl. Phys. B. 1992. V. 27. P. 352.

6. *Богуш А. А.* О сотрудничестве ИФ АНБ (Минск) — ЛЯП ОИЯИ (Дубна) в области экспериментальной физики высоких энергий // 40 лет Объединенному институту ядерных исследований. Дубна: ОИЯИ, 1996. С. 56.

7. *Будагов Ю. А., Джелепов В. П., Дубински Ю., Румянцев В. С., Флягин В. Б., Шандор В.* Множественное рождение нейтральных частиц в пион-протонных и протон-протонных столкновениях // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1980. Т. 11. С. 687.

8. *Румянцев В. С.* Исследование инклюзивных $\pi^- p \to \pi^0/\gamma + X$ и полуинклюзивных $\pi^- p \to \pi^0/\gamma + n_{\text{ch}} + X$ реакций при 5 ГэВ/с. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1980.

9. *Дворник А. М.* Исследования процессов образования мезонных резонансов в некогерентных пион-углеродных столкновениях. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 1988.

10. *Антюхов В. А. и др.* Спектрометр ГИПЕРОН — установка для исследования процессов образования и распадов частиц высоких энергий на 76 ГэВ-протонном синхротроне // Препринт ОИЯИ Р13-84-56. Дубна: ОИЯИ, 1984. 16 с.; Приборы и техника эксперимента. 1985. № 5. С. 35.

11. *Курилин А. С.* Измерение дифференциальных сечений реакций $\pi^+ \to K^+\Sigma^+$, $\Sigma^+(1385)$ при 12 ГэВ методом недостающей массы и его математическое обеспечение. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1988.

12. *Кульчицкий Ю. А.* Экспериментальное исследование адронизации лидирующего *s*-кварка в процессах инклюзивного образования нейтральных каонов и $K^{*0}(892)$-мезонов на ядрах. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1990.

13. *Сергеенко М. Н.* Исследование процессов адронизации мезонов при высоких энергиях с помощью модели кварк-глюонных струн. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск: ИФ АНБ, 1992.

14. *Русакович Н. А.* Эффекты кварковой структуры адронов при их взаимодействии с пучками частиц и ядрами. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 1993.

15. *Кульчицкий Ю. А.* Дифференциальные сечения реакций $\pi^+ A \to K_s^0 + X$, $K^+ A \to K^0$, $K^*(892)^0 + X$ при 11,2 ГэВ и методы измерения характеристик калориметрического комплекса эксперимента АТЛАС. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 2001.
16. *Baranov V. A., Chernyavski N. N., Evtukhovich P. G., ..., Zyazyula F. E. et al.* ARES — a spectrometer for the investigation of rare particle decays and rare nuclear processes // NIM. 1994. V. A346. P. 496; Search for the decay $\mu^+ \to e^+ e^+ e^-$ // Sov. J. Nucl. Phys. 1991. V. 17. P. S57; Search for the decay $\pi^+ \to e^+ e^+ e^- \nu$ // Sov. J. Nucl. Phys. 1991.V. 55. P. 1644.
17. *Barberis D., ..., Kulchitsky Yu. A. et al.* Observation of a narrow scalar meson at 1450 MeV in the reaction $pp \to p4\pi p$ at 450 GeV/c using the CERN OMEGA spectrometer // Phys. Lett. 1994. V. B324. P. 509.
18. *Barberis D., ..., Rumyantsev V. S. et al.* A kinematical selection of glueball candidates in central production // Phys. Lett. 1997. V. B397. P. 339.
19. *Kulchitsky Yu. A. et al.* Absorber plates precision on laser cutting for ATLAS hadron barrel calorimeter 0-module. ATLAS Intern. Note. TILECAL-No-74. Geneva: CERN, 1996.
20. *Budagov J. A., Kulchitsky Yu. A. et al.* ATLAS barrel hadron calorimeter module design // ATLAS Internal Note. TILECAL-No-36. Geneva: CERN, 1995. 32 p.; JINR, E13-96-20, Dubna. 1995. 18 p.
21. *Berger E., ..., Kulchitsky Yu. A. et al.* (*ATLAS TILECAL collaboration*). ATLAS Tile Calorimeter Technical Design Report. CERN/ LHCC/96-42. ATLAS-TDR-3. Geneva: CERN, 1996.
22. *Budagov J. A., Kulchitsky Yu. A. et al.* Experimental study of the effect of hadron shower leakage on the energy response and resolution of ATLAS hadron barrel prototype calorimeter. JINR, E1-96-180, Dubna, 1996. 25 p.
23. *Budagov J. A., Kulchitsky Yu. A., Nessi M., Bogush A. A., Arkadov V. V. , Karapetian G. V.* Electron response and e/h ratio of ATLAS barrel hadron prototype calorimeter. ATLAS Note. TILECAL-No-72. Geneva: CERN, 1996.
24. *Kulchitsky Yu. A.,Vinogradov V. B.* Non-compensation of the ATLAS barrel tile module-0 calorimeter. JINR, E1-99-12. Dubna, 1999. 32 p.
25. *Amaral P., ..., Kulchitsky Yu. A., Kuzmin V. M. et al.* Hadronic shower development in iron-scintillator tile calorimetry // NIM. 2000. V. A443. P. 51.
26. *Kulchitsky Yu. A., Vinogradov V. B.* Analytical representations of the longitudinal hadronic shower development // NIM. 1998. V. A413. P. 484.
27. *Akhmadaliev S., ..., Kulchitsky Yu. A. et al.* Results from a new combined test of an electromagnetic liquid argon calorimeter with hadronic scintillating tile calorimeter // NIM. 2000. V. A449. P. 461.

28. *Akhmadaliev S., ..., Kulchitsky Yu. A. et al.* Hadron energy reconstruction for the ATLAS calorimetry in the framework of the non-parametrical method // NIM. 2001 (in press).
29. *Kulchitsky Yu. A., Vinogradov V. B.* On the parametrization of the longitudinal hadronic shower profiles in combined calorimetry // NIM. 2000. V. A455. P. 499.
30. *Kulchitsky Yu. A.* On the e/h ratio of the electromagnetic calorimeter // Particles and Nuclei, Letters. 2000. V. 3. P. 28.
31. *Gilevsky V. V., Satsunkevich I. S.* On new possible high energy interactions between fermions and bosons or between bosons, constraints on them from present experiments and from future ATLAS data. ATLAS Note. ATL-PHYS-96-092. Geneva: CERN, 1996.
32. *Bogush A. A., Kulchitsky Yu. A., Rumyantsev V. S., Shumeiko N. M.* On contributions of Belarusian physicists in experimental particle physics // Proc. of IX Ann. Sem. «Nonlinear Phenomena in Complex Systems». Minsk, May 16–19, 2000. Minsk: IP NASB, 2000. P. 43.



Дубна, 16 января.
Встреча дирекции и руководителей
подразделений ОИЯИ с делегацией Белоруссии



91-я сессия Ученого совета ОИЯИ.
Заседание круглого стола «Белоруссия в ОИЯИ»

Директора лабораторий ОИЯИ: А. В. Белушкин (ЛНФ),
А. Т. Филиппов (ЛТФ), М. Г. Иткис (ЛЯР), В. Д. Кекелидзе (ЛФЧ),
А. И. Малахов (ЛВЭ), И. В. Пузынин (ЛИТ) и Е. А. Красавин (ОРРИ)

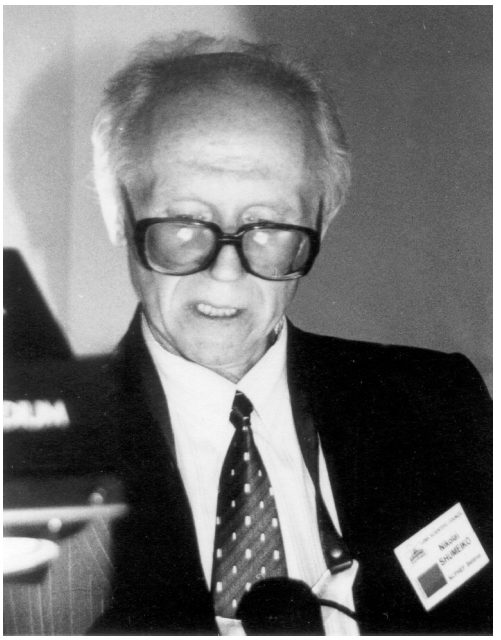




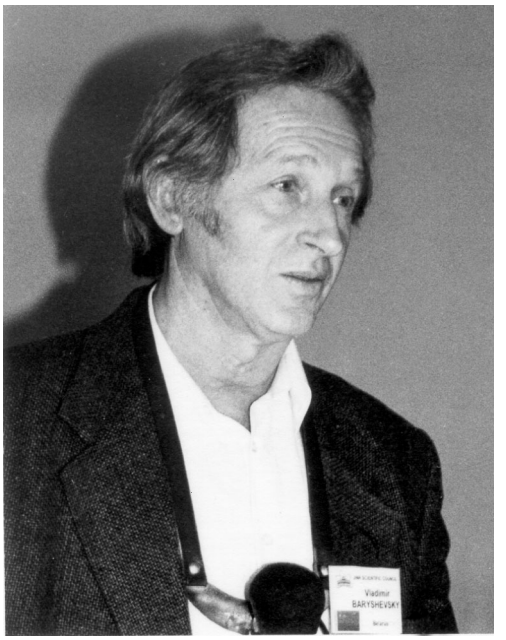
Участники круглого стола Б. В. Гринев (Украина),
член-корреспондент РАН И. Н. Мешков, академик В. Г. Кадышевский (ОИЯИ),
зам. госсекретаря Совета Министров Союза России и Белоруссии С. В. Калашников,
профессор А. Н. Сисакян, В. М. Жабицкий (ОИЯИ)

Делегация Республики Белоруссии
на заседании круглого стола





Профессор Н. М. Шумейко
(Национальный центр физики частиц
и высоких энергий, Минск)



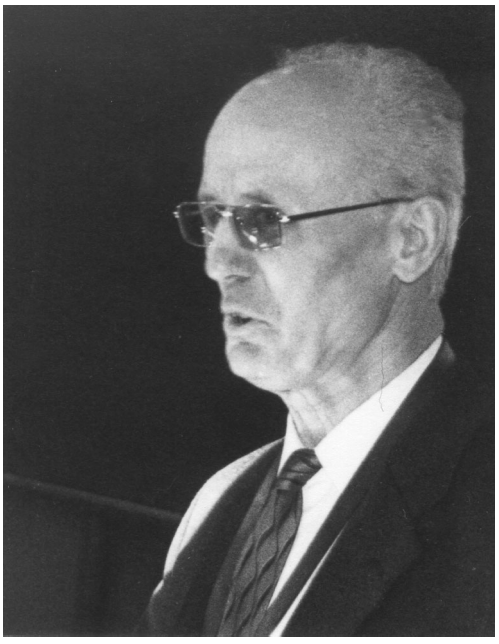
Профессор В. Г. Барышевский
(Институт ядерных проблем Белорусского
государственного университета, Минск)

С. Е. Чигринов, профессор А. Д. Егоров, С. В. Гапоненко (Белоруссия)





В. И. Недилько (Комитет по науке при Совете Министров Республики Белоруссии, Минск)



Профессор Н. В. Максименко (Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины)

В. И. Овчинников, профессора А. А. Панков, В. И. Прокошин (Белоруссия)





В. И. Овчинников, С. А. Максименко (Белоруссия),
А. В. Белушкин (ОИЯИ)

В. А. Сенченко (ОИЯИ), С. В. Калашников, Т. Г. Гуцева,
С. Е. Чигринов, Ф. Е. Зязюля (Белоруссия)

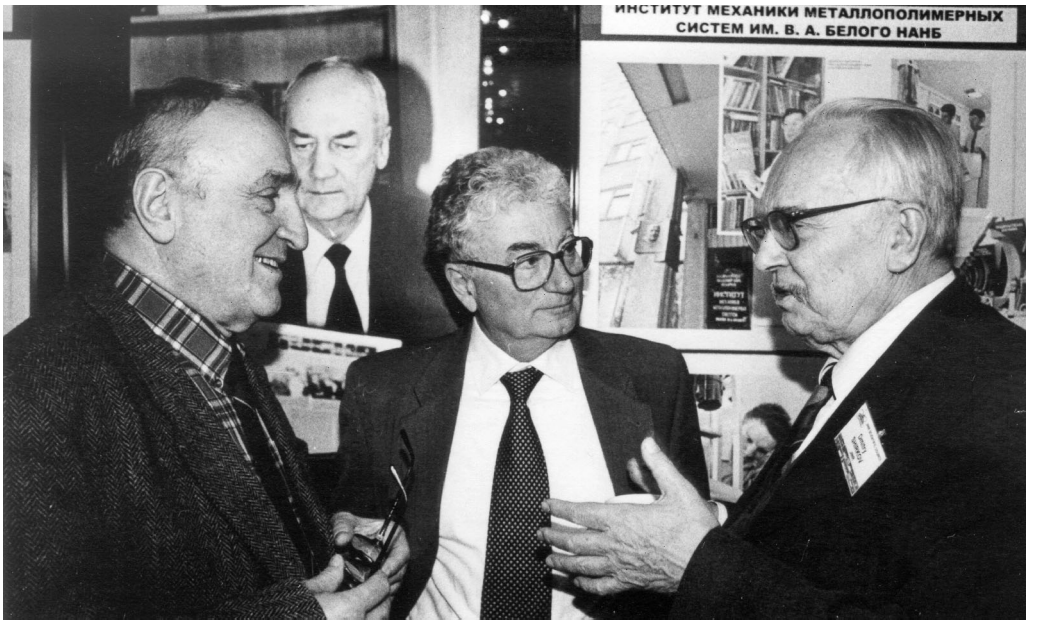




Торжественное открытие фотовыставки «Белоруссия в ОИЯИ»

Ю. А. Туманов (ОИЯИ)





Академик А. Н. Тавхелидзе (Грузия), член-корреспондент РАН Ю. Ц. Оганесян, академик Д. В. Ширков (ОИЯИ)

Профессор С. В. Щербаков (Белоруссия)
и В. М. Жабицкий (ОИЯИ)





Профессора Н. В. Максименко, Л. М. Томильчик (Белоруссия)
и Ю. А. Будагов (ОИЯИ)

М. М. Кривомаз (Белоруссия),
профессора И. А. Голутвин и А. Н. Сисакян (ОИЯИ)





Выставка новых технических разработок
научных центров Белоруссии

ОИЯИ–ГГУ: ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА

Н. В. Максименко

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

Развитие физики высоких энергий в Гомельском госуниверситете в значительной степени определялось сотрудничеством с ОИЯИ [1].

Многие научные направления по теоретической и экспериментальной физике высоких энергий были начаты в ОИЯИ и затем продолжены в Гомельском госуниверситете в тесном контакте с учеными ОИЯИ.

Исторически это выглядело так. На основе Гомельского пединститута в 1969 г. открывается государственный университет. Первый ректор открывшегося университета В. А. Белый за короткие сроки развернул интенсивное строительство учебных корпусов и начал решать кадровую проблему. Однако в 1973 г. он уходит в Академию наук в Минск, а на его место ректором университета переводится из Института физики Б. В. Бокуть. Именно он определил одно из основных направлений развития университета — решение кадровой проблемы за счет экстренной подготовки молодых перспективных ученых.

Случилось так, что в период перехода от пединститутской к университетской системе образования по инициативе ОИЯИ и ИФ НАН Белоруссии в 1971 г. была проведена Гомельская международная школа молодых ученых по физике высоких энергий. Научные контакты, установленные на этой школе с сотрудниками ОИЯИ, непосредственно и послужили началом решения коренной кадровой проблемы и параллельного открытия и развития новых научных направлений по физике высоких энергий в университете.

Начиная с 1973 г. для подготовки высококвалифицированных специалистов в области физики высоких энергий из Гомельского университета в филиал НИИЯФ МГУ в Дубне были переведены студенты: И. Л. Соловцов, В. Г. Тепляков, В. Н. Капшай и В. К. Волчков. А немного позже на стажировку в ОИЯИ направляются выпускники Гомельского госуниверситета А. Д. Линкевич и Г. Ю. Тюменков.

В. К. Волчков начал обучение в филиале НИИЯФ МГУ по экспериментальной физике высоких энергий, В. Г. Тепляков под руководством С. В. Голоскокова занялся изучением высокоэнергетического рассеяния адронов в квазипотенциальном подходе. Над остальными посланниками из Гомельского госуниверситета, которые начали специализироваться по теоретической физике, научное кураторство осуществлялось Н. Б. Скачковым [4, 7, 8, 13].

Таким образом, в Гомельском госуниверситете наряду с теоретическими направлениями научной школы академика А. И. Федорова начали развиваться теоретические исследования научной школы академика Н. Н. Боголюбова.

Работы по решению ковариантных двухчастичных одновременных уравнений с квазипотенциалами, начатые в ОИЯИ [4, 8, 5], были продолжены в университете [5, 6, 14]. Так, были развиты методы двухвременной функции Грина для построения и исследования явного вида операторов квазипотенциала, получено ковариантное обобщение процедуры построения оператора квазипотенциала на случай системы N спинорных частиц во втором порядке теории возмущений [5]. Найдены точные решения одномерной релятивистской задачи о связанных состояниях для суперпозиции $N\delta$-потенциалов, проведены численные решения интегральных одномерных и парциальных трехмерных квазипотенциальных уравнений с гладкими в конфигурационном представлении релятивистскими потенциалами однобозонного обмена и их суперпозициями [6]. В рамках квазипотенциального подхода исследованы процессы псевдоскалярных мезонов [14].

Развитие исследований, связанных с экспериментальной физикой высоких энергий в Гомельском госуниверситете, непосредственно связано с инициативой Л. Г. Мороза и профессора Ю. А. Будагова направить на научную стажировку в ОИЯИ группу белорусских физиков, среди которых первоначально из Гомеля были направлены Н. В. Максименко и А. В. Дворник.

По возвращении в Гомель Н. В. Максименко начал работу по организации научных исследований по физике высоких энергий в Гомельском университете. А. М. Дворник в коллективе Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ включился в обработку и интерпретацию данных, полученных с метровой пропановой пузырьковой камеры (руководители программ Ю. А. Будагов, Ю. Ф. Ломакин, В. Б. Флягин, под общим руководством директора ЛЯП ОИЯИ В. П. Джелепова) [2].

В 1974 г. заключены долгосрочные договоры о научно-техническом сотрудничестве Института физики АН БССР и Гомельского госуниверситета с Лабораторией ядерных проблем ОИЯИ.

В 1976 г. на базе Гомельского госуниверситета и ИФ АН БССР при активной помощи ОИЯИ постановлением Президиума АН БССР и коллегии Минвуза БССР открыто межведомственное объединение — Центр по обработке ядерной фильмовой информации (ЦОФИ). Экспериментальные материалы для обработки поступали в ЦОФИ из ЛЯП ОИЯИ.

Силами сотрудников ЦОФИ были созданы инженерно-технические системы и их программно-математическое обеспечение, которые необходимы для обработки ускорительной информации и получения новых физических результатов в условиях Белоруссии, т. е. была реализована так называемая ускорительная «физика на расстоянии».

На основе системы обработки фильмовой информации и системы отбора событий неупругих взаимодействий π-мезонов с ядрами мишени углерода получены

инклюзивные дифференциальные сечения образования ρ^0-мезонов по быстроте и квадрату переданного импульса, обнаружены отклонения импульсных спектров протонов, вылетающих в заднюю полусферу, от гладкой экспоненциальной зависимости, оценена величина полного сечения взаимодействия ρ^0-мезонов с ядрами.

Для получения этих результатов отбор и измерение событий проводились с помощью системы обработки фильмовой информации, созданной в Гомельском госуниверситете и ИФ АН БССР [2, 3].

Деятельность ЦОФИ положила начало участию физиков из Гомеля (А. М. Дворник, В. И. Юрков, И. П. Либа и др.) в совместных с сотрудниками ЛЯП ОИЯИ исследованиях по программам «Гиперон» и МЧС (ГНЦ ИФВЭ, Протвино) [9, 10].

В 1977 г. по инициативе ОИЯИ в Гомеле проводилась очередная Международная школа молодых ученых по физике высоких энергий и релятивистской ядерной физике. В работе оргкомитета этой школы было задействовано четверо ученых из университета. Сотрудники университета выступили с научными докладами. На этот раз слушателями и активными помощниками являлись студенты университета, специализирующиеся по теоретической физике.

Международные школы, проведенные в Гомеле, и создание ЦОФИ, программа деятельности которого непосредственно связана с самым широким использованием ЭВМ, не могли не сказаться на учебном процессе физического факультета Гомельского госуниверситета.

Силами сотрудников ЦОФИ были организованы специальный физический практикум и практические занятия по применению ЭВМ для решения физических задач. Студенты-старшекурсники, выполняя учебные задания, вовлекались в теоретические и экспериментальные исследования по физике высоких энергий. У студентов физического факультета ГГУ появился и целенаправленно развивался интерес и опыт решения теоретических и экспериментальных задач на ЭВМ.

Такая ориентация в специализации физиков-теоретиков резко повысила спрос на молодых специалистов — выпускников ГГУ. На кафедре теоретической физики наряду со специализацией «Теоретическая физика» была открыта специализация «Компьютерное моделирование физических процессов».

На базе Гомельской научно-исследовательской группы ЦОФИ создан отдел физики фундаментальных взаимодействий при кафедре теоретической физики как научное подразделение действующей на факультете проблемной лаборатории. Сотрудники этого отдела возглавили образованную на хоздоговорных началах специализированную лабораторию «Алгоритм».

С 1986 г. на физическом факультете начал работу факультет повышения квалификации работников предприятий, производственная деятельность которых связана с ЭВМ. На этом факультете среди ведущих преподавателей были сотрудники отдела физики фундаментальных взаимодействий. В последние годы на базе этого

факультета вырос Институт повышения квалификации при Гомельском госуниверситете. Сейчас на физическом факультете работает совет по защите кандидатских диссертаций по специальности «Теоретическая физика».

Сотрудничество ГГУ с ОИЯИ продолжает развиваться и сейчас в соответствии с Координационным планом научно-исследовательских работ, выполняемых в ОИЯИ.

В настоящее время В. Ф. Конопляников и С. Г. Шульга на контрактной основе за счет средств Белоруссии работают в Лаборатории физики частиц и Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

На основе теоретических закономерностей пространственных и энергетических распределений прямых фотонов, лептонов и адронов, рожденных в *pp*-столкновениях при энергии 14 ТэВ, и с учетом характера энерговыделения этих частиц в установке получены предсказания для перспектив и условий калибровки HCAL с помощью одноструйных событий с прямыми фотонами [11,12]. С. Г. Шульга проводит работы по анализу результатов beaw-теста, выполненного в августе 1998 г. на прототипе части адронного калориметра CMS.

В последние годы в университете проводится работа по совершенствованию учебной программы подготовки молодых физиков, которые могли бы принять участие в теоретических и экспериментальных исследованиях в современных проектах по физике высоких энергий в ОИЯИ и в Гомельском университете.

Таким образом, одним из важных итогов сотрудничества ГГУ с ОИЯИ является создание и последующее эффективное развитие научного потенциала по физике высоких энергий в Гомельском госуниверситете, который в свою очередь способствует значительному повышению уровня физико-математической подготовки специалистов для Гомельского региона.

Список литературы

1. *Богуш А. А.* О сотрудничестве ИФ НАНБ (г. Минск) — ГГУ (г. Гомель) в области электродинамики адронов и физики высоких энергий: история и итоги (К 75-летию со дня рождения академика Б. В. Бокутя). Препринт № 734. Минск: ИФ НАНБ, 2001. 17 с.
2. *Дворник А. М.* Исследование процессов образования мезонных резонансов в некогерентных пион-углеродных столкновениях. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МИФИ, 1988.
3. *Богуш А. А., Войтюк А. А., Мороз Л. Г., Румянцев В. С., Скоморохов А. Г., Шалдина Т. П. (Минск); Дворник А. М., Лавщук Н. П., Максименко Н. В., Сахно Н. П. (Гомель)*. Полуавтоматическая установка для обработки снимков с трековых детекторов, работающих в линию с ЭВМ СМ-4. Препринт № 450. Минск: ИФ АН БССР, 1987. 19 с.

4. *Капшай В. Н.* Решение квазипотенциальных уравнений и структурные функции двухчастичных систем. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Дубна, 1982.

5. *Дей Е. А.* Применение метода двухвременных функций Грина для исследования релятивистских составных систем в квантовой теории поля. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск: БГУ, 1993.

6. *Алферова Т. А.* Функции Грина и волновые функции двухчастичных систем в релятивистском конфигурационном представлении. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Минск: ИФ НАН Белоруссии, 2000.

7. *Дей Е. А., Капшай В. Н., Скачков Н. Б.* Точные решения класса квазипотенциальных уравнений для суперпозиции квазипотенциалов однобозонного обмена // ТМФ. 1990. Т. 82, № 2. С. 188–198.

8. *Саврин В. И., Скачков Н. Б., Тюменков Г. Ю.* Ковариантное трехмерное уравнение для волновой функции π-мезона в составной модели спинорных кварков // ТМФ. 1983. Т. 54, № 2. С. 173–182.

9. *Антюхов В. А., Будагов Ю.А., Максименко Н. В., Богуш А. А., Кульчицкий Ю. А., Курилин А. С., Мороз Л. Г. и др.* (Содружество ГИПЕРОН: Дубна – Серпухов – Баку – Братислава – Гомель – Ереван – Кошице – Краков – Минск – Самарканд – София – Тбилиси). Спектрометр ГИПЕРОН // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 5. С. 42.

10. *Zaitsev A. M., Budagov Yu. A., Bogush A. A., Dvornik A. M., Kultchitsky Yu. A., Kurilin A. S., Rumyantsev V. S., Maksimenko W. V., Moroz L. G. et al.* (MPS collaboration). Status of the Multiparticle Spectrometer (MPS) Facility. // Proc. of Intern. Workshop «Physics on UNK». Serpuchov: IHEP, 1989. P.27.

11. *Skachkov N. B., Konoplyanikov V. F., Bandourin D. V.* γ-direct +1 jet events for HCAL calibration. Third Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. CMS-Document, 1997-168. CERN, December 16–17, 1997. P. 139–153.

12. *Bandourin D. V., Konoplyanikov V. F., Skachkov N. B*. Jet Energy Scale Setting with «γ + jet» events at LHC Energies. Generalities, Selection Rules. JINR Preprint E2-2000-251. Dubna, 2000.

13. *Skachkov N. B., Solovtsov I. L.* Meson form factors and calibration three-dimensional formulation of composed quark model for mesons. JINR Preprint E2-11727. Dubna, 1978.

14. *Капшай В. Н., Тюменков Г. Ю.* К описанию распадов $\pi^0 \to 2\gamma$ и $\pi^+ \to \mu^+\nu$ в квазипотенциальном подходе // Доклады АН БССР. 1989. Т. 33, № 6. С. 518–520.

ОБ УЧАСТИИ УП МЗОР В СОЗДАНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПРОЕКТОВ НА СТРОЯЩЕМСЯ СУПЕРКОЛЛАЙДЕРЕ В ЦЕРН

М. М. Кривомаз

Унитарное предприятие «Машиностроительный завод им. Октябрьской революции», Минск

Сотрудничество УП МЗОР по проектам CMS, ATLAS с партнерами: ОИЯИ (Дубна), НИКИЭТ (Москва), НЦ ФЧВЭ (Минск).

Проект CMS

1. Объекты участия УП МЗОР в проекте CMS

Участие УП МЗОР в создании установки CMS заключается в изготовлении механических структур составных частей торцевого адронного калориметра:

— прототип калориметра;
— поглотитель калориметра (латунная часть);
— задний фланец поглотителя калориметра с интерфейсной системой, включающей интерфейсный вал, средний диск, рамы;
— комплект монтажных устройств (для заднего фланца, интерфейсного вала, среднего диска, секторов латунных).

2. История развития сотрудничества УП МЗОР с партнерами в рамках проекта CMS

В 1998 г. заключен договор между УП МЗОР и НЦ ФЧВЭ на изготовление прототипа калориметра. Договор заключен на конкурсной основе по итогам тендера, проведенного НЦ ФЧВЭ среди предприятий Республики Белоруссии.

Заключению договора предшествовало в 1997 г. общее ознакомление с объектом производства, изучение технических требований и требований качества, предъявляемых к изделию, оценка возможностей изготовления и подготовка технико-коммерческого предложения.

В соответствии с договором организована и выполнена техническая подготовка производства и прототип калориметра изготовлен в 1998 г. с проведением кон-

трольной сборки. При изготовлении прототипа были использованы станки с ЧПУ производства УП МЗОР, оснащенные универсальной поворотной головкой. Результаты изготовления были положительно оценены после сборки в ЦЕРН. Вместе с тем установка мегатайлов в ЦЕРН показала, что ряд латунных элементов прототипа, изготовленных в полном соответствии с требованиями технического задания, требуют пригонки при сборке. Это обстоятельство было принято во внимание впоследствии при выработке общего направления задания технических требований в конструкторской документации (КД) — выполнения последующей сборки без пригоночных работ. Эти требования устанавливались при проектировании изделий и при разработке технологии производства механических структур калориметра.

По результатам изготовления прототипа в марте 1999 г. заключен рамочный договор между УП МЗОР и НЦ ФЧВЭ на изготовление торцевого адронного калориметра. В рамках упомянутого договора проведена дальнейшая работа, включающая выполняемые параллельно проектирование силами НИКИЭТ, технологический контроль, техническую подготовку производства и изготовление калориметра силами УП МЗОР. В настоящее время изготовление торцевого адронного калориметра НЕ-1 находится в стадии завершения.

3. Основные этапы работ, выполненные УП МЗОР по каждой из составных частей торцевого адронного калориметра в сотрудничестве с партнерами по проекту CMS

3.1. Технологический контроль КД и выработка совместно с НИКИЭТ конструктивных и технологических решений, создающих предпосылки для обеспечения в производстве технических требований к изделиям.

3.2. Разработка и реализация организационных решений, направленных на создание эффективных условий организации производства. Эти решения предусматривали, в частности:

- создание участка механической обработки из четырех станков с ЧПУ мод. МСГП6101МФ4, МСГ1200Ф4 и первого станка мод. 6М616Ф4. Участок предназначен для обработки латунных секторов и крупногабаритных деталей заднего фланца, среднего диска, интерфейсного вала. Впоследствии на основании расчетов длительности производственных циклов и ожидаемых сроков поставки заготовок крупногабаритных деталей принято решение о закупке второго станка мод. 6М616Ф4;
- организацию сборочного стенда с изготовлением монтажного комплекта из трех станин и имитатора заднего фланца, выполненного из чугуна (отливка УП МЗОР).

3.3. Техническая подготовка производства, в т. ч.:

- разработка технологии механической обработки и сборки;
- модернизация станка мод. 6М616Ф4 для обеспечения возможности механической обработки интерфейсного вала;
- проектирование и изготовление специальной технологической оснастки, в т. ч. приспособлений и мерительного инструмента;
- закупка стандартного режущего инструмента, в т. ч. инструмента для обработки латуни ЛК75-05, аустенитных нержавеющих сталей, алюминиевых сплавов (торцевые, торцово-цилиндрические, концевые фрезы, фрезы резьбонарезные с твердосплавными гребенками, метчики и др.).

3.4. Обеспечение материалами, в т. ч. заготовками для крупногабаритных деталей.

Поставку материалов обеспечили НИКИЭТ, НЦ ФЧВЭ, УП МЗОР согласно закреплению:

- НИКИЭТ — материалы и заготовки из латуни ЛК75-05;
- НЦ ФЧВЭ — материалы и заготовки из аустенитных нержавеющих сталей, алюминиевых сплавов, стали-10;
- УП МЗОР — остальные материалы в соответствии с разделительными ведомостями между НЦ ФЧВЭ и УП МЗОР.

3.5. Обеспечение качества.

В рамках действующей в УП МЗОР «Системы обеспечения качества» реализованы необходимые мероприятия по качеству, обеспечивающие:

— документирование данных о качестве;
— идентификацию изготавливаемой продукции;
— контроль над обработкой;
— выполнение требований к хранению и упаковке продукции;
— проверку (технический контроль) и испытания продукции.

3.6. Изготовление продукции.

Изготовление продукции на каждом этапе начиналось, как правило, с момента получения КД со штампом «Годен в производство» и материалов (заготовок) для производства.

В ходе производства продолжалось уточнение технических требований к изделиям как по инициативе изготовителя, так и по инициативе разработчика КД — НИКИЭТ. В частности, изменения касались технических требований к клиновому пазу секторов, требований сборочного чертежа поглотителя и изменения конструкции поглотителя в сборе (введены резьбовые отверстия по внешнему контуру), изменения конструкции интерфейсного вала и др.

4. Планируемые сроки изготовления составных частей HE-1 и проведения контрольных сборок

Наименование этапа	Срок
Контрольная сборка заднего фланца с тремя слоями латунных секторов и рамками CMS.HE.GE.M 100-01-07	20.01.2002
Изготовление интерфейсного вала	20.02.2002
Изготовление среднего диска	20.02.2002
Контрольная сборка интерфейсного вала со средним диском	05.03.2002
Изготовление конического кольца	12.02.2002
Отгрузка всего комплекта в ЦЕРН	20.03.2002

Проект ATLAS

1. Объекты участия УП МЗОР в проекте ATLAS

Участие УП МЗОР в создании установки ATLAS заключается в изготовлении научно-технической продукции — элементов жидкоаргонного калориметра и других элементов установки ATLAS в сотрудничестве с ОИЯИ:

— комплекты плит из меди для жидкоаргонного калориметра установки ATLAS;

— комплекты деталей спейсеров из алюминиевых сплавов для установки ATLAS;

— изделие «Фингер» в количестве 260 шт.

2. Состояние работ по проекту ATLAS

Начало сотрудничества с ОИЯИ по изготовлению элементов установки ATLAS относится к середине 2000 г., когда были заключены договоры на изготовление опытных комплектов плит из меди и спейсеров из алюминиевых сплавов (профильный материал).

По результатам изготовления опытных комплектов сотрудничество с ОИЯИ продолжено, заключены соответствующие договоры. Изготовление плит из меди и алюминиевых спейсеров ведется в сроки, согласно заключенным договорам, по мере получения заготовок.

Договор с ОИЯИ на изготовление изделий «Фингер» в количестве 260 шт. заключен в феврале 2001 г. В настоящее время изготовление изделий «Фингер» находится в стадии завершения.

Изготовлению элементов установки ATLAS, как и составных частей установки CMS, предшествовали необходимые этапы технической подготовки производства, разработка и реализация организационных мероприятий, мероприятий по обеспечению качества в рамках действующей «Системы обеспечения качества» и др.

РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ю. М. Плескачевский, В. В. Смирнов, С. В. Щербаков, В. П. Селькин

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, Гомель

Введение

В Республике Белоруссии радиационные технологии применительно к процессам получения и модифицирования полимерных материалов, а также исследования и разработки в области радиационного материаловедения полимерных композитов осуществляются в ряде научных центров и на некоторых промышленных предприятиях.

В Институте физико-химических проблем Белорусского государственного университета (Минск), Институте радиационных физико-химических проблем НАНБ (пос. Сосны), Институте механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАНБ (Гомель) изучают различные аспекты поведения полимерных материалов и изделий из них в поле ионизирующих излучений. При этом оценивается эффект воздействия радиационных излучений как на комплекс технологических, так и на совокупность эксплуатационных характеристик различных полимерных материалов, представляющих собой порошки, аэрозоли, пленки, блоки и т. п. В качестве источника излучений используется, в основном, изотоп ^{60}Co (гамма-установки типа УГУ-200, УГУ-420, РХМ-γ-20 и др.).

В промышленных масштабах радиационные технологии находят применение в г. Мозыре (Гомельская обл.) в процессах радиационного модифицирования полимерной изоляции кабельных изделий с помощью электронных ускорителей. Здесь же на протяжении ряда лет в системе твердотельной технологической дозиметрии эффективно используется созданный в Белоруссии полимерный пленочный дозиметр.

На РУП «Несвижский завод медицинских препаратов» (Минская обл.) функционирует мощная радиационная гамма-установка, которая используется для модифицирования полимеров и стерилизации медицинских изделий.

На Гомельском пластмассовом заводе планируется к вводу электронный ускоритель для стерилизации медицинских шприцев, изготовленных из полимерных материалов на этом же предприятии.

В настоящей работе представлены некоторые результаты научных исследований и практических разработок в области полимерного радиационного материаловедения, выполненных в последнее время в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Белоруссии (Гомель).

Работы по изучению и прогнозу поведения полимерных материалов и изделий из них в поле ионизирующих излучений в названном институте были начаты в 1969 г. с вводом в эксплуатацию радиационно-химической установки РХМ-γ-20 (заводской № 1) и получили существенный импульс для дальнейшего развития после проведения в Гомеле в 1973 г. Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий, организованной Объединенным институтом ядерных исследований совместно с Институтом физики АН БССР, ЦК ВЛКСМ при содействии Института механики металлополимерных систем АН БССР и Гомельского государственного университета.

Радиационно-модифицированные полимерные композиты

Эффективным направлением современного полимерного материаловедения является создание композитов широкого назначения на основе смесей и сплавов различных по природе полимеров.

Исследованы бинарные полимерные системы, определяемые как смеси полимеров, полученные механическим смешением компонентов в расплаве [1]. Основу исследуемых систем составляет сшивающийся частично кристаллизующийся полиэтилен высокой плотности, а в качестве модифицирующих добавок использовались кристаллизующийся термопластичный полибутилентерефталат (ПБТ), дивинилстирольный термоэластопласт (ТЭП) ДСТ-30 и этиленпропиленовый тройной сополимер СКЭПТ-40. Все добавки при воздействии ионизирующих излучений сшиваются.

Зависимости относительного удлинения от дозы облучения для смесей ПЭНД–ДСТ-30 носят экстремальный характер с максимумом в области доз 0,05–0,2 МГр. Следует отметить, что данный показатель исходных компонентов при облучении уменьшается. Показано, что с ростом содержания ТЭП максимальные значения увеличиваются и смещаются в область больших доз. Сравнение экстремальных значений относительного удлинения для композиций с соответствующими значениями базовых полимеров показывает значительное превышение значений исследуемого параметра над аддитивными показателями для композиций. По-видимому, в нашем случае наблюдается синергический эффект при совместном влиянии эластичного наполнителя и ионизирующего излучения. Зависимости модуля упругости в сравнении с облученными исходным ПЭНД и композитами на их основе повышаются на 3–4 порядка при дозах 0,2–0,3 МГр. Ударная вязкость в аналогичных системах при концентрациях 20–30 мас. % достигает величины 18 кДж/м^2 [2].

Методом ЭПР с применением парамагнитного зонда исследованы композиции ПЭНД–СКЭПТ-30. Выявлено, что показатели разрушающего напряжения от дозы облучения находятся в прямой зависимости от подвижности макромолекул и содержания эластомера в композициях. Относительное удлинение при разрыве в области доз до 0,2 МГр с увеличением содержания СКЭПТ в интервале до 20 мас. % увеличивается более чем в 300 раз.

Особенности получения композиций на основе кристаллизующихся термодинамически несовместимых термопластов заключаются в формировании частично «объединенных» аморфных и кристаллических фаз материала. В процессе совмещения ПЭНД и ПБТ при определенных параметрах (3,2 мас. % и дозе 0,5 МГр) наблюдается значительное увеличение ударной вязкости смесей. Исследуемый показатель в подобных смесях возрастает в сравнении с исходным полиэтиленом на 16 кДж/м^2. Полученный результат связан с формированием некой общей кристаллической фазы, фрагменты которой совмещаются на надмолекулярном уровне.

Полученные материалы могут применяться в изделиях машиностроительного назначения: брызговики автомобилей, узлы трения машин, защитные элементы, уплотнители и др.

Трение облученных полимеров

Применение полимерных материалов в узлах трения базируется на обширных научных исследованиях и реальных практических результатах. Полимеры, по сравнению с металлами, обладают более низким коэффициентом трения, зачастую меньшим износом, повышенной эластичностью, имеют меньшую стоимость и более технологичны в производстве изделий [3]. Способность полимеров работать в водной и коррозионно-активной среде является важным преимуществом перед металлами. Воздействие ионизирующих излучений в значительной степени способствует улучшению их триботехнических показателей.

При облучении полимеров в инертной среде (вакуум, вода) [4] структура поверхностных слоев и объема материала сохраняет свою однородность, при которой наблюдается формирование сшитой структуры с постоянной плотностью сшивания по всему объему аморфной фазы. Проведенные исследования показали, что влияние предварительного облучения ПЭВП проявляется в экстремальном изменении интенсивности изнашивания и коэффициента трения с достижением минимальных значений исследованных характеристик в области дозы облучения порядка 1,0 МГр (рис. 1). Снижение интенсивности изнашивания ПЭВП более чем на два порядка (в 100 и более раз) связано с образованием сшитой структуры полимера, что подтверждается зависимостями гель-фракции и времени корреляции вращения парамагнитного зонда от дозы облучения.

Облучение полимера в среде, содержащей кислород (например воздух) [5], приводит к частичной деструкции поверхностных и сшиванию глубинных слоев.

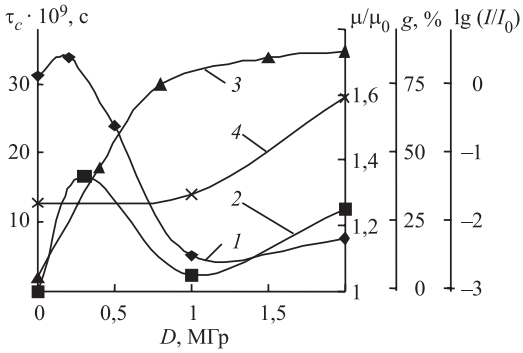


Рис. 1. Влияние дозы облучения на интенсивность изнашивания (*1*), коэффициент трения (*2*), содержание гель-фракции (*3*), время корреляции вращения парамагнитного зонда (*4*)

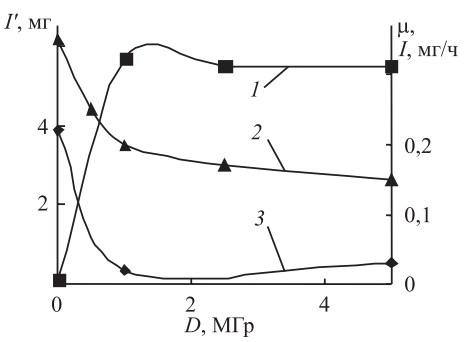


Рис. 2. Влияние дозы облучения (на воздухе) на массовый износ за первый час трения (*1*), коэффициент трения (*2*), скорость изнашивания в стационарном режиме (*3*)

Таким образом, структура поверхности сшивающихся полимеров формируется под влиянием одновременно протекающих процессов сшивания и деструкции. На рис. 2 показано, как на начальном этапе трения ПЭВП наблюдается интенсивное истирание деструктированных слоев, что в последующем способствует снижению скорости изнашивания, коэффициента трения и массового изнашивания. По мере истирания образцов и перехода зоны трения в глубинные слои полимера, содержащие сшитую структуру, наблюдается стабилизация всех показателей, которая достигается при дозе облучения порядка 1,0 МГр.

Изучены фрикционные показатели металлических пар трения при смазке маслами с добавкой дисперсного радиационно-модифицированного ПЭ (ДРМП) низкого давления с фракционным составом до 300 мкм (рис. 3).

С ростом дозы облучения присадки происходит монотонное снижение коэффициента трения в 2,0–2,5 раза, которое проявляется наиболее интенсивно при дозах 0,8–0,9 МГр. Радиационно-окислительная деструкция присадки приводит к снижению сдвиговых напряжений в объеме дисперсных частиц полимера по сравнению с исходным ПЭ. Следствием этого является уменьшение коэффициента трения при некотором возрастании

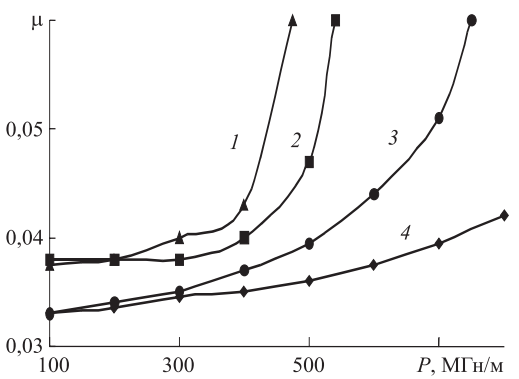


Рис. 3. Нагрузочные зависимости коэффициента трения пары сталь–бронза при смазке индустриальным маслом (*1*), содержащим исходный ПЭНД (*2*) и облученный дозами 0,5 (*3*) и 1,0 (*4*) МГр ДРМП

скорости изнашивания с увеличением поглощений дозы. Таким образом, отмеченная выше корреляция зависимости фрикционных параметров от дозы обусловлена характером радиационно-окислительной деструкции материала присадки.

Адгезия облученного полиэтилена к металлам

Исследовано влияние гамма-облучения полиэтилена высокого давления на его адгезионную способность к стали. Прочность адгезионных соединений оценивали методом нормального отрыва. Исследуемые полимеры в исходном виде представляли собой порошки фракционного состава 250 мкм и менее, облучение которых производили в атмосфере воздуха при 410–515 К изотопом ^{60}Co при дозах 0,001–0,1 МГр. После облучения порошки полимеров подвергали отжигу при 373 К в течение 0,9 кс.

С увеличением дозы предварительного облучения полимера наблюдается последовательное смещение максимума адгезии в область более низких температур формирования и некоторое уменьшение его абсолютного значения, т. е. увеличение дозы в данном случае эквивалентно повышению температуры формирования соединения.

Увеличение дозы до 0,01–0,04 МГр приводит к незначительному падению максимально достижимых значений прочности соединений, в то время как соответствующая максимумам температура резко падает [6].

Облучение дисперсного ПЭВД в атмосфере воздуха небольшими дозами является эффективным технологическим приемом, позволяющим получать высокопрочные соединения при значительно более низких температурах нагрева.

Полимерные пленочные дозиметры

Неотъемлемой частью всех этапов разработки и осуществления промышленных радиационно-химических процессов является технологическая дозиметрия. Одним из основных инструментов решения этой задачи являются системы дозиметрического контроля, использующие твердотельные дозиметры ионизирующего излучения, в частности, на основе полимеров [7–9].

Разработан полимерный дозиметр [10] на основе радиационно-сшитого и деформированного полиолефина, обладающего эффектом «памяти формы» [11]. Дозиметр представляет собой полиолефиновую пленку, изготовленную с минимальной степенью ориентации макромолекул, которая подвергается предварительному облучению эталонной дозой ионизирующего излучения и последующему строго заданному деформированию (растяжению) при температуре, превышающей точку плавления кристаллической фазы полимера. Данные операции приводят к образованию в материале дозиметра ориентированной трехмерной структуры, которая обуславливает его способность проявлять эффект «памяти».

Методика проведения дозиметрического контроля включает облучение дозиметра измеряемым излучением и его последующий нагрев при температуре выше точки плавления кристаллической фазы полиолефина. По величине термической усадки материала дозиметра при нагреве судят о поглощенной дозе излучения. В качестве дозиметрического отклика используют величину A:

$$A = L_{DT} - L_{OT}/L,$$

где L_{DT} и L_{OT} — контрольный размер, например длина, соответственно облученного и необлученного измеряемой дозой образцов дозиметра после термоусадки, а L — контрольный размер до усадки.

В настоящее время нами накоплен более чем десятилетний опыт использования разработанного дозиметра в промышленных радиационных процессах производства кабельных, термоусаживаемых и ряда других изделий на предприятиях России, Белоруссии и Молдавии. Наибольшее распространение получил дозиметр на основе полиэтилена высокого давления ДПЭ-50/2000.

Дозиметр аттестован как рабочее средство измерения поглощенной дозы ионизирующего электронного излучения с энергией электронов от 0,3 до 10 МэВ в диапазоне доз от 50 до 500 кГр с суммарной погрешностью измерения ± 12 % при доверительной вероятности 0,95. Случайная составляющая погрешности ± 5 %. Зависимость отклика дозиметра от поглощенной дозы в указанном диапазоне представлена на рис. 4.

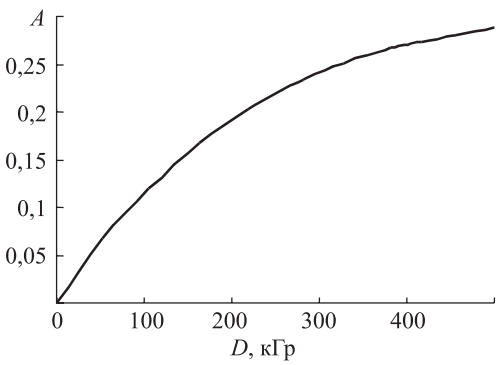


Рис. 4. Зависимость отклика дозиметра ДПЭ-50/2000 от поглощенной дозы электронного излучения

Дозиметр представляет собой длинномерную ленту толщиной около 150 мкм и шириной 4 мм. Используют его отрезками длиной от 150 до 300 мм. Выбор рабочей длины зависит от конкретных условий применения.

Наибольшее применение дозиметр ДПЭ-50/2000 нашел в технологии радиационно-химического модифицирования изоляции кабелей, проводов и в производстве термоусаживающихся трубок различного назначения. Другой сферой применения явился дозиметрический контроль технологического процесса получения кровельных материалов на основе радиационно-вулканизирующихся эластомеров. При этом были проведены сравнительные испытания ДПЭ-50/2000 с дозиметром ТАЦ-40 на основе непластифицированной триацетатцеллюлозной пленки [12]. Разброс показаний по поглощенной дозе при рабочих режимах радиационной обработки кровельного материала (разовая доза порядка 100 кГр) составил не более 6 %.

Дозиметр ДПЭ-50/2000 прошел межведомственную метрологическую аттестацию и благодаря отмеченным достоинствам стал реальным инструментом дозиметрического контроля в промышленных радиационных процессах. Общее количество использованных в странах СНГ дозиметров достигло нескольких десятков тысяч.

Список литературы

1. *Плескачевский Ю. М., Смирнов В. В., Макаренко В. М.* Введение в радиационное материаловедение полимерных композитов. Минск: Навука и тэхніка, 1991. — 191 с.
2. *Смирнов В. В.* Межфазное взаимодействие в смесях на основе ПЭВП, содержащего эластичную добавку с переменными значениями модуля упругости // Материалы, технологии, инструменты. 1997. № 3. С. 26–29.
3. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
4. *Плескачевский Ю. М., Смирнов В. В., Копылов С. В., Дубова Е. Б.* Исследование фрикционного взаимодействия облученного полиэтилена // Трение и износ. 1981. Т. 2 (6). С. 1034–1039.
5. *Смирнов В. В.* Исследование фрикционных характеристик облученного на воздухе полиэтилена // Трение и износ. 1986. Т. 7 (4). С. 729–732.
6. *McLaughlin W. L., Doyd A. W., Chadwick K. H., McDonald J. C. and Miller A*. Dosimetry for Radiation Processing. Taylor and Fransis, London–New York–Philadelphia, 1989.
7. *Пикаев А. К.* Современное состояние радиационной технологии // Успехи химии. 1995. Т. 64 (6). С. 609–640.
8. *Пикаев А. К.* Новые разработки в радиационной технологии в России // Радиационная химия. 1999. Т. 33 (1). С. 3–11.
9. *Генералова В. В., Гурский М. Н.* Дозиметрия в радиационной технологии. М.: Изд-во стандартов, 1981.
10. *Selkin V., Pleskachevsky Yu., Smirnov V., Gochaliev G., Rubin B.* A Polyolefin Dosimeter System // Radiat. Phys. Chem. 1990. V. 35 (4–6). P. 750–753.
11. *Charlesby A.* Atomic Radiation and Polymers. Pergamon Press, Oxford–London–New York–Paris, 1960.
12. *Гочалиев Г. З.* Современное состояние дозиметрии радиационно-технологических процессов. М.: НИИТЭХИМ, 1986.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОТРУДНИЧЕСТВА ИФТТП НАНБ И ОИЯИ

В. М. Рыжковский

Институт физики твердого тела и полупроводников НАНБ, Минск

Уважаемые члены Ученого совета!

Уважаемые коллеги!

Я представляю на нашей встрече Институт физики твердого тела и полупроводников Национальной академии наук Белоруссии.

К сожалению, по ряду объективных и субъективных причин сотрудничество ИФТТП НАНБ с ОИЯИ пока находится в начальной стадии, хотя уже и получены первые интересные результаты. Поэтому в этом кратком сообщении речь будет идти больше о перспективах сотрудничества.

Свое выступление я построю таким образом. Сначала кратко представлю наш институт и его тематику — отсюда можно будет усмотреть точки соприкосновения наших взаимных интересов в сотрудничестве, а затем коротко расскажу о первых его результатах.

Институт создан в 1963 г., сегодня в нем работает 280 человек — и по «возрасту», и по численности работающих он является средним в системе НАНБ. Его основное научное направление — исследование межатомных взаимодействий в твердых телах; разработка научных основ создания магнитных, полупроводниковых, сегнетоэлектрических, сверхпроводящих и сверхтвердых материалов.

В составе института 15 научных подразделений. Со значительной степенью условности их можно разбить по тематике и объектам исследования на несколько блоков, что представлено на рисунке.

Одним из ведущих направлений в институте является исследование магнитных материалов (три лаборатории). Лаборатория физики магнитных материалов исследует многокомпонентные интерметаллические системы на основе 3d-элементов, в основном пниктиды и халькогениды. Лаборатория неметаллических ферромагнетиков — оксидные магнитные материалы, в предыдущие годы это были ферриты, в последнее время научные интересы сместились в сторону манганитов, кобальтитов и других перспективных материалов. Это исследование магнитных структур и условий их реализации, определение физических характеристик, установление взаимосвязей между кристаллическими и магнитными структурами, исследование механизмов магнитных фазовых превращений и т. д. Указанное направление представляется одним из самых перспективных в плане нашего дальнейшего сотрудничества при использовании богатейших и во

Научные подразделения
Института физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии



многом уникальных нейтронографических экспериментальных возможностей Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Тем более что ранее наша лаборатория физики магнитных материалов называлась лабораторией нейтронографических исследований и проводила работы на ядерном реакторе в Минске до его закрытия в 1987 г.; нейтронографические методики нам близки, сохранились еще старые кадры специалистов-нейтронографистов.

Значительные перспективы сотрудничества с ОИЯИ мы видим у лаборатории физики твердого тела, которая давно занимается исследованием структуры и динамики решетки кристаллов рентгенографическим методом. Привлечение нейтронографии, в частности метода неупругого рассеяния нейтронов, для изучения динамики решетки, с использованием возможностей ОИЯИ, представляется важ-

ным и интересным. В частности, для исследования так называемых модулированных структур в водорастворимых сегнетоэлектрических кристаллах типа $A^{II}BX_4$, которыми сейчас активно занимаются в лаборатории.

Тематика лаборатории физики полупроводников, начинавшей свою деятельность с исследования классических полупроводников $A^{III}B^{V}$, сейчас сместилась в новые перспективные области — новые полупроводниковые лазерные материалы ZnSe:Cr; соединения $A^{I}B^{III}C^{VI}_2$ и твердые растворы на их основе, используемые в преобразователях солнечной энергии. Здесь тоже можно найти общие интересы сотрудничества.

Несомненной является заинтересованность в сотрудничестве с ОИЯИ лаборатории радиационных воздействий, которая занимается изучением радиационных дефектов в полупроводниках (Si, GaAs), исследованием радиационной стойкости полупроводниковых приборов и структур, использованием излучений в технологических процессах. Закрытие реактора в Белоруссии серьезно сузило экспериментальные возможности лаборатории, исключив такой важный источник излучения, как нейтронное.

И уж совсем осталась «у разбитого корыта» после закрытия ядерного реактора лаборатория активационного анализа, имевшая хорошую репутацию в СССР (основатель — член-корреспондент Е. М. Лобанов). Нынешняя тематика лаборатории очень интересная — изучение вещественного состава искусственных алмазов, полученных спонтанной кристаллизацией; выяснение роли примесей металлов в оптимизации процесса синтеза, увеличении выхода кристаллов и улучшении их качества. Однако практическая реализация исследований идет очень трудно из-за отсутствия экспериментальных возможностей (эпизодические выезды на реактор в Обнинск не могут в достаточной мере обеспечить потребностей эксперимента).

Характеризуя тематику института в целом, нельзя не отметить разработку сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора. Это направление занимает приоритетные позиции в тематике института, так как оно имеет выраженную практическую направленность, что требуют сегодня от науки экономика и государственные власти республики. В этих работах очень важной является фундаментальная составляющая — исследования процессов кристаллизации, роли примесей и дефектов, совершенствования структуры и других вопросов, определяющих научную основу создания сверхтвердых материалов с требуемыми свойствами. Здесь также могут быть точки соприкосновения наших интересов.

Таковы основные перспективные направления нашего сотрудничества, как мы их видим.

А теперь коротко о первых результатах. В Координационном плане НИР, выполняемых в ОИЯИ с участием организаций и учреждений Республики Белоруссии, от ИФТТП в 2001 г. было две темы.

1) В программе ATLAS тема аппаратурного характера — разработка специализированных миниатюрных датчиков пространственной ориентации и магнитных полей для установок ядерно-физического эксперимента (научный руководитель — доктор физ.-мат. наук В. И. Прокошин). Разработка полупроводниковых датчиков различного назначения на основе эффекта Холла — основная тематика нашего хозрасчетного отдела твердотельной электроники, где он имеет весомые достижения. Некоторые разработки отдела представлены на открытой сегодня в ОИЯИ выставке.

2) Простая по постановке, но, на наш взгляд, весьма изящная по исполнению и результату работа выполнена нами совместно с Лабораторией нейтронной физики ОИЯИ по исследованию магнитной структуры пниктида Mn_2Sb в условиях воздействия высоких давлений (научный руководитель — доктор физ.-мат. наук В. М. Рыжковский). Соединение Mn_2Sb обладает своеобразной блочно-слоевой тетрагональной структурой, обменные магнитные взаимодействия в которой очень чувствительны к изменению межатомных расстояний. Это соединение является чрезвычайно удобным модельным объектом для изучения механизмов магнитных фазовых превращений в связи с изменениями в кристаллической структуре. Химическое сжатие решетки при образовании твердых растворов замещения на основе матрицы Mn_2Sb вызывает спиновую перестройку в виде фазового перехода ферримагнетик–антиферромагнетик. По теории Киттеля, построенной еще в 60-е годы (так называемая «обменно-инверсионная» модель), такая спиновая перестройка происходит за счет изменения знака результирующего обменного взаимодействия при достижении критического значения параметра решетки **c**. Казалось бы, барическое сжатие решетки должно приводить к такому же эффекту. Эксперименты, косвенным образом определявшие магнитное состояние материала (рентгенография, резистометрия), давали противоречивые результаты.

Так происходит ли магнитный фазовый переход ферримагнетик–антиферромагнетик в Mn_2Sb при барическом сжатии решетки? Прямой нейтронографический эксперимент, выполненный на дифрактометре ДН-12 в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, дал однозначный ответ — при воздействии высоких давлений до 53 кбар в пниктиде Mn_2Sb сохраняется исходная ферримагнитная структура. И мы нашли объяснение этому результату: установлено, что линейные коэффициенты сжимаемости в пниктиде марганца значительно различаются по кристаллографическим направлениям, что приводит к анизотропному деформированию решетки с изменением углов межатомных связей и, соответственно, поведения эффективного обменного взаимодействия в кристалле. Полученный результат является очень важным для выяснения механизма магнитного фазового перехода АФ → Ф в материалах структурного типа Cu_2Sb и, в частности, для уточнения условий применимости обменно-инверсионной модели Киттеля для его описания.

На этом позвольте закончить мое краткое выступление информативного характера и выразить надежду на плодотворное развитие сотрудничества ИФТТП НАНБ и ОИЯИ. Здесь были тезисно обозначены только некоторые предложения по возможному сотрудничеству. Думается, что они будут согласованы и тематически конкретизированы на уровне соответствующих научных подразделений наших институтов и найдут практическую реализацию в будущем.

Спасибо за внимание.

СВЕРХГЛУБОКОЕ ПРОНИКАНИЕ СГУСТКА ЧАСТИЦ В МЕТАЛЛЫ

С. М. Ушеренко, В. И. Овчинников, О. А. Дыбов

Научно-исследовательский институт импульсных процессов, Минск

В работе представлен обзор вопросов массопереноса и перераспределения энергии при нестационарном процессе — сверхглубоком проникании потока микроударников в металлические преграды. Показано, что минимальные затраты энергии на формирование канала только в незначительной степени (1,4 %) могут быть компенсированы кинетической энергией единичного микроударника. При введении допущения о динамическом фазовом переходе, заторможенном на стадии потери дальних связей за счет интенсивной деформации, возможно объяснение падения статического сопротивления материала преграды и дополнительного подвода энергии в канальную зону. С этой позиции проведен анализ экспериментальных результатов проникания на глубины 10^2–10^4 размеров ударников. Выполнены оценки скорости схлопывания канала (1178 м/с) и плотности энергии после прохождения ударника ($8{,}24 \cdot 10^{15}$ Дж/м^3).

Приведенные значения параметров процесса сверхглубокого проникания позволяют показать его существенные отличия от кратерообразования при макроударе. Установлено, что для перехода аномального кратерообразования в сверхглубокое проникание необходимо выполнить следующие условия:

— захлопнуть открытую поверхность;

— создать фоновое давление $P_f > \sigma_m$ при $\tau_f > \tau_c$.

Исследования микроструктуры показали, что при бомбардировке потоком частиц порошка в объеме стали возникают специфические зоны, которые выявляются за счет разницы в травимости этих зон и основного материала преграды. В этих зонах находятся канальные структуры, образованные микрочастицами при пробивании металлической преграды. Были зафиксированы каналы, заканчивающиеся кратерными полостями с остатками ударника. Эти микрополости находятся на относительных глубинах 10^2–10^4 калибров. Выброс материала ударника из этих полостей заблокирован. В случае использования в качестве ударников металлов в их остатке обнаруживаются вводимый и матричный материалы. При торможении ударников в металле преграды наблюдались подкалиберные эффекты, когда центральный стержень ударника продолжал пробивание, сбрасывая наружную оболочку. Потеря массы ударников имеет периодический характер, что, по-видимому, свидетельствует о движении ударника с переменной скоростью в условиях наложения переменного поля давлений.

Распределение микроканалов по поперечному сечению преграды неравномерно. Наибольшая плотность канальных образований, как правило, наблюдается в центральной части преграды. Так, в цикле исследований, выполненных при бомбардировке боридами стальных преград, оценка производилась с помощью нейтронно-активационного анализа, показан разброс распределения вводимого бора по объему железной преграды.

На основе рассмотренных особенностей образования канала-кратера при сверхглубоком проникании (СГП) очевидно, что специфика кратерообразования в данном случае заключается в характере перераспределения энергии удара потока (сгустка) с преградой в зоны каналов. Была проведена оценка энергетики процесса сверхглубокого проникания с определенными допущениями занижения возможных значений, по которым в режиме СГП реализуются плотности энергии, равные $2542 \cdot 10^9$ Дж/м^3, с учетом фазовых переходов σ_{SD} $0{,}776 \cdot 10^{14} - 8{,}246 \cdot 10^{15}$ Дж/м^3.

На основании проведенных исследований были определены обязательные условия реализации явления сверхглубокого проникания:

— процесс сверхглубокого проникания может реализоваться только тогда, когда материал канальной зоны может рассматриваться как жидкость, а статическое сопротивление материалу близко к нулю;
— энергия удара сгустка микроударников кумулируется в узкие канальные зоны.

Рассмотрение явления сверхглубокого проникания на основе совокупности известных экспериментальных результатов позволяет сформулировать современное представление о специфике этого процесса. Оно базируется на устойчивой реализации следующего комплекса эффектов, известных ранее как теоретически возможные:

— в канальных зонах в условиях СГП реализуется динамический фазовый переход, заторможенный вследствие интенсивной деформации на стадии потери дальних связей;
— кумуляция энергии осуществляется за счет суперпозиции полей давлений и образования узких областей с уровнем давления, достаточным для фазового перехода;
— процесс сверхглубокого проникания в преграду происходит в зонах незавершенного фазового перехода, со статическим сопротивлением движению ударника, близким к нулю, а динамические потери компенсируются за счет подвода энергии из окружающего канальную область материала преграды;
— устойчивость процесса СГП обеспечивается за счет перераспределения энергии, кумулированной в канальной зоне, на формирование прямой и обратной струй и, соответственно, колебаний стенок канала в период движения ударника в преграде;
— с учетом одновременности существования армирующей системы канальных образований (сотни штук в 1 мм^2 в течение сотен микросекунд) реализуется

автомодельный колебательный процесс в системе «поток ударников–материал преграды» с поглощением и испусканием полей давлений (энергии). При этом материал канальных зон находится в состоянии сверхпластичности.

Очевидно, что рассматриваемый процесс — сверхглубокое проникание — позволяет устойчиво реализовать в микрообъемах условия, ранее считавшиеся маловероятными.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СВЕРХГЛУБОКОГО ПРОНИКАНИЯ ЧАСТИЦ ПОРОШКОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

С. М. Ушеренко, В. И. Овчинников, О. И. Коваль

Научно-исследовательский институт импульсных процессов, Минск

При выполнении работ по динамической обработке материалов с применением энергии взрыва и, в частности, по объемному легированию сталей частицами порошка была зарегистрирована рентгеновская засветка пленочных датчиков, что возможно в результате зарождения и распространения электромагнитного излучения.

Однако проблемы, связанные с регистрацией электромагнитного излучения, определение механизма и источников его происхождения и влияния на процессы ударно-волнового воздействия при динамическом нагружении до настоящего времени остаются неизученными.

Данная работа направлена на исследование электромагнитного излучения, возникающего в условиях сверхглубокого проникания частиц в металлическую преграду, и изучение связанных с этим явлений.

Авторами предлагаются для обсуждения методические и полученные ими экспериментальные данные, представляющие интерес в области фундаментальных исследований, когда соударение двух твердых тел на макроуровне переходит на уровень элементарных частиц и область высоких энергий.

Динамическое нагружение металлических образцов меди, алюминия, железа при различной степени обработки проводили по разработанной схеме (см. рисунок). Гибридная схема ускорителя представляет собой кумулятивный заряд взрывчатки, в выемке которого размещен порошковый состав. Облицовка кумулятивной выемки такого ускорителя служит одновременно контейнером для порошка. При подрыве заряда происходит обжатие металлического контейнера. Импульс давления через стенки облицовки передается порошку. В струю переходит свыше 50 % порошковой смеси. При такой схеме нагружения исключается взаимодействие частиц с продуктами реакции взрыва. Обеспечиваются скорости разгона более 10 м/с. В качестве образцов использовались медь, сталь, алюминий в виде стержней диаметром 15 мм и длиной 120 мм. Для обработки применяли порошки бронзы и смесь порошков SiC + Ni с размером частиц 60–80 мкм.

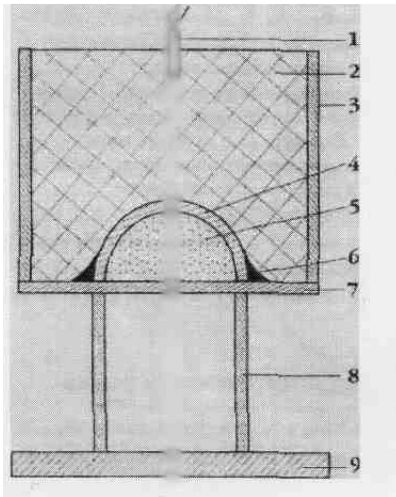


Схема устройства для взрывного легирования: *1* — детонатор; *2* — заряд ВВ; *3* — оболочка; *4* — облицовка; *5* — порошковый состав; *6* — герметик; 7 — основание контейнера; *8* — регулирующая опора; *9* — мишень

Для регистрации электромагнитного излучения в качестве измерительных преобразователей использовали преобразователи Холла, которые были изготовлены из гетероэпитаксиальных пленочных структур арсенида индия на полуизолирующем арсениде галлия. Основной функцией такого рода устройств является преобразование индукции магнитного поля в электрический сигнал. На базе датчиков Холла был разработан специальный прибор РЭМИ-01 (регистрации электромагнитного излучения), который использовали для измерения и визуализации на экране дисплея компьютера трехмерных составляющих вектора индукции магнитного поля в зависимости от времени в режиме in situ, а также для дальнейшей математической обработки полученной информации.

В результате были зарегистрированы спектры электромагнитного излучения с длительностью импульса 5–12 мкс и амплитудой 0,1–0,3 В.

Для регистрации и измерений рентгеновского излучения применяли медицинскую рентгеновскую пленку. Компьютерную обработку полученных результатов осуществляли по программе «Профиль.1.0», которая предназначена для получения линии профиля яркости (профилограммы) на полутоновых серых изображениях и проведения измерений на полученной кривой. Входная информация представляет собой файлы изображений 8-битного BMP-формата с палитрой из 256 полутонов серого. Выходная информация может быть представлена файлами изображений профилограммы в растровом формате BMP и масштабируемом векторном формате WMF, а также ее твердой копией (распечаткой). Результаты измерений сохраняются в текстовых файлах двух форматов: «данные, разделенные запятыми» (файлы с расширением CSV) и «текстовый формат» (файлы с расширением TXT). Пример обработки измерений представлен в таблице.

№	L	R	XP	ID	Width	HlfWid	LPeak	HPeak	Bott	DeltaH
1	166	182	15.13	0.00	1.39	0.70	0.70	84.00	92.00	8.00
2	71	87	6.61	–98.00	1.39	0.70	0.43	81.00	88.00	7.00
3	215	235	20.09	155.00	1.74	0.87	1.39	62.00	88.50	26.50
4	–10	–10	20.09	0.00	0.00	0.00	20.96	0.00	0.00	0.00

Для оценки спектра излучения, фиксируемого рентгеновской пленкой, предварительно делали эталонную засветку такой пленки на рентгеновском аппарате ДРОН-3 при трех режимах: $U = 10$ кВ, $I = 1{,}8$ мА; $U = 23$ кВ, $I = 3{,}5$ мА; $U = 40$ кВ, $I = 20$ мА, где U — ускоряющее напряжение, I — ток. Время засветки — 1 с. При первом режиме засветки пленки не происходит. Оценка интенсивности излучения проводилась по результатам второго эксперимента для $U = 23$ кВ, $I = 3{,}5$ мА.

Мощность рентгеновского излучения J является произведением ускоряющего напряжения на ток $J = UI$ и равна 80,5 В·А. Учитывая то, что время воздействия рентгеновского излучения при экспонировании эталонных образцов пленки порядка одной секунды, а при динамическом нагружении длительность процесса сверхглубокого проникания — микросекунды, можно утверждать, что мощность излучения при сверхглубоком проникании частиц порошка в металлическую преграду на несколько порядков выше. При обработке металлической преграды различными видами порошков установлено, что изменяется интенсивность засветки пленки в зависимости от типа порошков. Максимальная интенсивность имеет место при обработке порошками бронзы, с уменьшением у нержавеющей стали и карбида кремния соответственно. Длина волны λ для различных глубин проникания частиц порошка и в зависимости от его состава имеет интервал значений $\lambda = 0{,}3098$–$0{,}6197$ Å.

Сравнительный анализ интенсивности засветки рентгеновской пленки, микрорентгеноспектральный анализ концентрации по никелю и кремнию локальной зоны образцов меди и стали показали, что области засветки соответствуют пикам концентрации вводимого вещества. На интенсивность засветки оказывают влияние режимы обработки. Трехкратное нагружение вызывает резкое увеличение интенсивности рентгеновского излучения, и степень засветки пленочных датчиков возрастает.

Исследование микроструктуры железа и меди после динамического нагружения показало, что области рентгеновского излучения и его интенсивность, возможно, связаны с зонами сжимаемости и деформации в местах формирования канальных структур.

Таким образом, на основании проведенных экспериментов можно сказать: впервые сделаны практические измерения и предварительные оценки интенсивности электромагнитного излучения при сверхглубоком проникании частиц порошка в металлическую преграду в условиях динамического нагружения.

ПРЕДСТАВИТЕЛИ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ, УНИВЕРСИТЕТОВ И ГОСУДАРСТВЕННЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ БЕЛОРУССИИ — УЧАСТНИКОВ ЗАСЕДАНИЯ КРУГЛОГО СТОЛА «БЕЛОРУССИЯ В ОИЯИ»

Барышевский Владимир Григорьевич	профессор, директор Научно-исследовательского института ядерных проблем БГУ (Минск)
Батраков Константин Германович	Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ (Минск)
Гапоненко Сергей Васильевич	доктор физико-математических наук, директор Института молекулярной и атомной физики НАН Белоруссии (Минск)
Гуцева Тамара Георгиевна	советник по культуре посольства Республики Белоруссии в Российской Федерации (Москва)
Деев Владимир Александрович	атташе посольства Республики Белоруссии в Российской Федерации (Москва)
Егоров Александр Дмитриевич	доктор физико-математических наук, профессор, зав. отделом, Институт математики НАН Белоруссии (Минск)
Зязюля Федор Емельянович	доктор, заведующий лабораторией Национального центра физики частиц и высоких энергий БГУ (Минск)
Калашников Сергей Вячеславович	заместитель государственного секретаря Совета Министров Союзного государства России и Белоруссии
Кривомаз Михаил Михайлович	генеральный директор Унитарного предприятия «Машиностроительный завод им. Октябрьской революции» (Минск)

Максименко Николай Васильевич	профессор, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины
Максименко Сергей Афанасьевич	доктор физико-математических наук, начальник ГУН Белорусского государственного университета (Минск)
Недилько Владимир Иосифович	заместитель председателя Комитета по науке при Совете Министров Республики Белоруссии (Минск)
Овчинников Владимир Ильич	доктор технических наук, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством НАН Белоруссии (Минск)
Панков Александр Альбертович	профессор, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого
Прокошин Валерий Иванович	профессор, заместитель директора Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии (Минск)
Румянцев Виктор Семенович	заведующий лабораторией физики частиц Национального центра физики частиц и высоких энергий БГУ (Минск)
Рыжковский Владимир Михайлович	доктор физико-математических наук, заместитель директора Института физики твердого тела и полупроводников НАН Белоруссии (Минск)
Столярский Виктор Иванович	Научно-исследовательский институт ядерных проблем БГУ (Минск)
Смирнов Виктор Вениаминович	доктор технических наук, Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Белоруссии (Гомель)

Строцкий Владимир Владимирович	Национальный центр физики частиц и высоких энергий БГУ (Минск)
Томильчик Лев Митрофанович	член-корреспондент НАН Белоруссии, Институт физики им. Б. А. Степанова НАН Белоруссии (Минск)
Ушеренко Сергей Миронович	доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института импульсных процессов с опытным производством НАН Белоруссии (Минск)
Федотова Юлия Александровна	ученый секретарь Национального центра физики частиц и высоких энергий БГУ (Минск)
Чигринов Сергей Евгеньевич	генеральный директор Академического научно-технического комплекса «Сосны» НАН Белоруссии (Минск); Институт радиационных физико-химических проблем НАН Белоруссии (Минск)
Шумейко Николай Максимович	профессор, директор Национального центра физики частиц и высоких энергий БГУ (Минск)
Щербаков Сергей Васильевич	профессор, Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Белоруссии (Гомель)

СОДЕРЖАНИЕ

В. Г. Кадышевский
Вступительное слово 3

С. В. Калашников
Приветствие 5

В. И. Недилько
Белоруссия в ОИЯИ 6

Н. М. Шумейко
Сотрудничество НЦ ФЧВЭ БГУ и ОИЯИ 10

В. Г. Барышевский
О возможности экспериментального обнаружения нового физического явления осцилляции и вращения спина дейтронов, пролетающих через неполяризованную мишень, на нуклотроне ОИЯИ 15

В. Г. Барышевский
Объемные лазеры на свободных электронах 18

С. Е. Чигринов
Экспериментальные и теоретические исследования трансмутации долгоживущих осколков деления и младших актинидов в подкритической сборке, управляемой генератором нейтронов 21

А. А. Богуш
Об итогах сотрудничества ИФ НАН Белоруссии с ОИЯИ 27

А. А. Богуш, Л. М. Томильчик
Об итогах сотрудничества ИФ НАНБ с ЛЯП ОИЯИ 43

Н. В. Максименко
ОИЯИ–ГГУ: итоги и перспективы сотрудничества 53

М. М. Кривомаз
Об участии УП МЗОР в создании экспериментальных установок в рамках международных проектов на строящемся суперколлайдере в ЦЕРН 58

Ю. М. Плескачевский, В. В. Смирнов, С. В. Щербаков, В. П. Селькин
Радиационное материаловедение полимерных композитов 62

В. М. Рыжковский
Состояние и перспективы сотрудничества ИФТТП НАНБ и ОИЯИ 69

С. М. Ушеренко, В. И. Овчинников, О. А. Дыбов
Свехглубокое проникание сгустка частиц в металлы 74

С. М. Уширенко, В. И. Овчинников, О. И. Коваль
Исследование возникновения электромагнитного и рентгеновского
излучения в условиях сверхглубокого проникания частиц порошков
при динамическом нагружении твердого тела 77

Представители научных центров, университетов
и государственных учреждений — участников заседания
круглого стола «Белоруссия в ОИЯИ». 80

СОТРУДНИЧЕСТВО ОИЯИ С ИНСТИТУТАМИ, УНИВЕРСИТЕТАМИ И ПРЕДПРИЯТИЯМИ БЕЛОРУССИИ

Материалы круглого стола,
проведенного в ходе работы 91-й сессии
Ученого совета ОИЯИ 17 января 2002 г.

Под общей редакцией *В. Г. Кадышевского, А. Н. Сисакяна*

Составители *В. М. Жабицкий, Т. Я. Жабицкая, Н. И. Сисакян, Б. М. Старченко*

Фото *Ю. А. Туманова, П. Е. Колесова*

2002-123

Редактор *Е. В. Калинникова*
Корректор *Е. В. Сабаева*
Компьютерная верстка *И. Г. Андреевой, О. В. Устиновой*
Обложка *Ю. Г. Мешенкова*

ЛР № 020579 от 23.06.97.
Подписано в печать 27.05.2002.
Формат 70 × 100/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 10,97. Уч.-изд. л. 10,06. Тираж 300 экз. Заказ № 53314.

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