

## Основные результаты работы по Проекту в 2014 году

### 1. Актуальность проблемы, основные цели Проекта

Ускорительный комплекс ФИАН «Пахра» – действующая уникальная установка, предоставляющая возможность проведения экспериментов в области ядерной физики и ядерных технологий с использованием внутреннего и выведенного электронных и тормозных фотонных пучков с энергиями от 7 до 850 МэВ, а также пучка синхротронного излучения в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. Основной целью Проекта является поддержка экспериментальных работ, выполняемых с использованием пучков и инфраструктуры ускорителя «Пахра», а также работ по фундаментальной ядерной физике промежуточных энергий, инициированных сотрудниками отдела и выполняемых на других ускорителях.

В настоящее время в число таких работ входят:

- прецизионные измерения сечений реакций фоторождения  $\pi$  и  $\eta$  мезонов, в том числе с поляризованными пучками и мишенями, исследование барионных резонансов,
- исследование рождения и мод распада экзотических короткоживущих ядерных состояний – эта-мезонных ядер, исследование взаимодействия  $\eta$ -мезонов с ядерным веществом,
- исследование особенностей переходного излучения релятивистских банчей электронов и их использование для диагностики пучков,
- исследование поликристаллических веществ с использованием рентгеновского поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов (ПТИ),
- исследование особенностей развития электромагнитных ливней в кристаллических материалах.

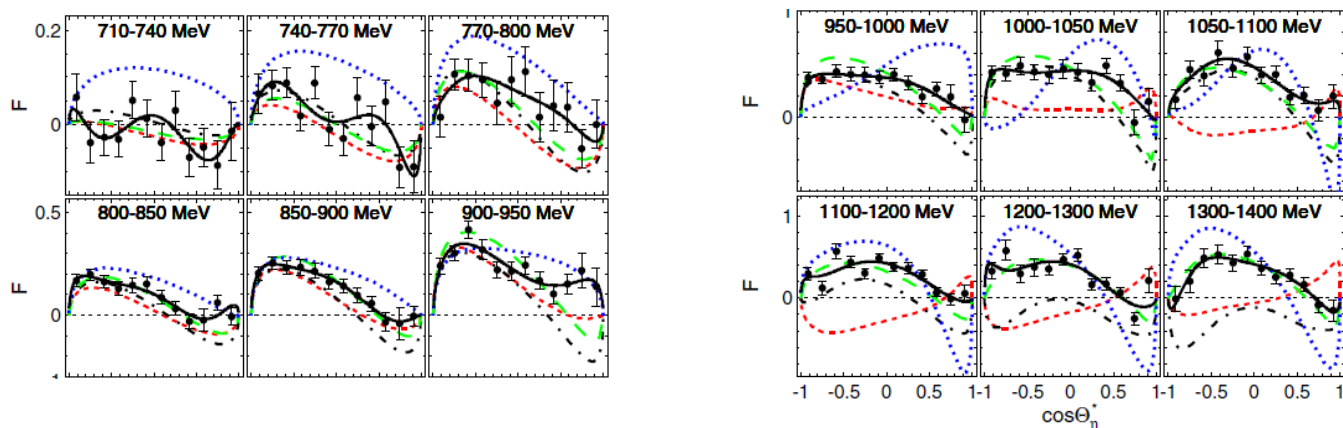
Проект нацелен также на поддержку теоретических исследований фотоядерных процессов (в том числе по теории поляризуемостей нуклонов и пионов и по проблеме дибарионных резонансов), разработок по физике и технике ускорителей (в частности, по проблеме оптического охлаждения пучков).

### 2. Важнейшие результаты, полученные в 2014 году

1. На микротроне МАМИ-С в Майнце и детекторе Crystal-Ball/TAPS впервые получены данные по beam-target asymmetry  $F$  реакции фоторождения эта-мезонов на протонах с циркулярно поляризованными фотонами и поперечной поляризацией протонов при энергии до  $W=1.9$  ГэВ. Существующие парциальные анализы реакции не описывают эти данные (сплошные кривые на прилагаемом рисунке – полиномиальный фит). Одновременное прецизионное измерение target-asymmetry  $T$  не подтверждает существование в этой энергетической области узких резонансных структур. Ссылки:

V.L. Kashevarov. Eur. Phys. J. Web of Conferences 73, 040004 (2014).

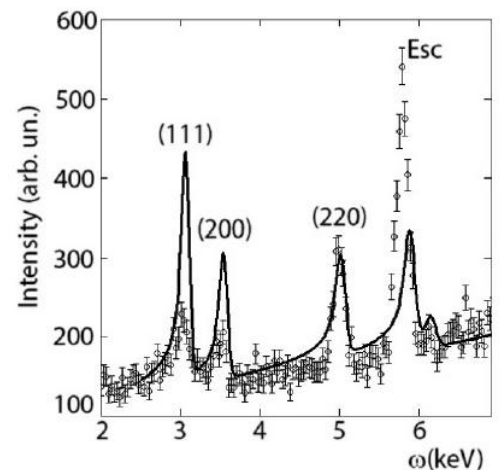
C.S.Akondi et al. Phys.Rev.Lett. 113, 102001 (2014).



2. На микротроне-инжекторе ускорителя «Пахра» проведены исследования спектров и угловых распределений рентгеновского поляризованного тормозного излучения (ПТИ), производимого релятивистскими электронами в поликристаллических фольгах Al, Ni, Cu, Mo, W. Проведено сравнение данных с теоретическими предсказаниями и показана особая чувствительность ПТИ в геометрии обратного рассеяния к текстуре и размерам зерен материала. Полученные результаты подтверждают возможности использования ПТИ для диагностики поликристаллических материалов.

На рисунке показан спектр ПТИ в геометрии обратного рассеяния от поликристаллической фольги Ni со средним размером зерна 300 нм.

Ссылка: V.I. Alekseev et al. Nucl. Inst. Meth. B 342 (2015) 47-51.



### 3. Другие результаты работы по Проекту в 2014 году

1. На микротроне МАМИ-С в Майнце и детекторе Crystal-Ball/TAPS изучались процессы фоторождения  $\pi^0$  и  $\eta$  мезонов на протонах и дейтронах, в том числе с поляризованными фотонами и поляризованной мишенью. Используя дейтериевую мишень, получены новые прецизионные данные о квазисвободном фоторождении эта-мезонов на протоне и нейтроне. Данные подтверждают наличие ранее наблюдавшегося в других экспериментах узкого пика в нейтронном сечении с внутренней шириной около 30 МэВ при энергии  $W = 1670$  МэВ. Подобный пик отсутствует в сечении на протоне.

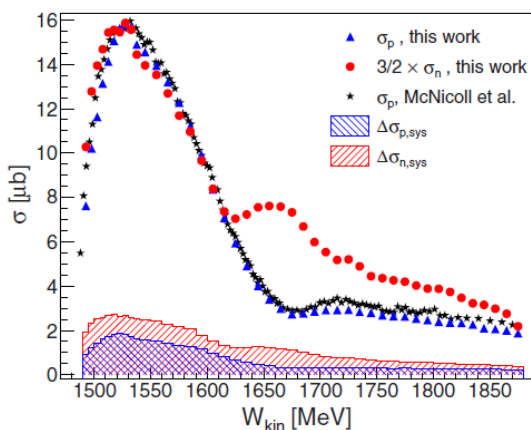


FIG. 16. (Color online) Total cross sections as a function of the final-state invariant mass  $W_{\text{kin}} = m(\eta N)$ . Blue triangles are proton data. Red circles are neutron data scaled by 3/2. Black stars are free-proton data from MAMI-C [13]. Hatched areas are total systematic uncertainties of proton (blue) and neutron (red) data.

Впервые получены прецизионные данные об угловой зависимости сечения фоторождения  $\pi^0$  мезонов на нейтроне, связанном в дейтроне. Найдены большие отклонения от предсказаний парциально-волновых анализов, основанных на данных для других изотопических каналов.

2. В рамках подготовки эксперимента ФИАН-ОИЯИ по изучению рождения дейтронным пучком Нуклотрона в Дубне на внутренней мишени эта-мезонных ядер с последующим их распадом с испусканием коррелированных  $\pi N$  и  $NN$  пар был изготовлен и протестирован прототип модуля сцинтилляционного нейтронного детектора, который предназначен для время-пролетной спектрометрии вылетающих нейтронов с энергиями 50-350 МэВ. Тестирования, временные калибровки и определение временного разрешения проводились с использованием гамма-пучка синхротрона «Пахра», а также на космических лучах. Определены оптимальные параметры конструкции (длины и толщины сцинтилляторов, типы ФЭУ), обеспечивающие требуемое в задаче временное разрешение детектора порядка 100 псек.

В конце 2014 г. в кольцо Нуклотрона был опущен и размещен магнит СП-46, предоставленный ФИАН и предназначенный для спектрометрии пионов и протонов. Это позволяет приступить в следующем году к изготовлению и монтажу магнитно-спектрометрического плеча установки.

3. На микротроне-инжекторе ускорителя «Пахра» проведено экспериментальное исследование рассеяния электронов с энергией 7.4 МэВ, пересекающих фольгу под скользящими углами к ее поверхности. Обнаружено, что пересечение электронного пучка фольги не только приводит к увеличению поперечных размеров пучка, но и изменяет направление его движения.

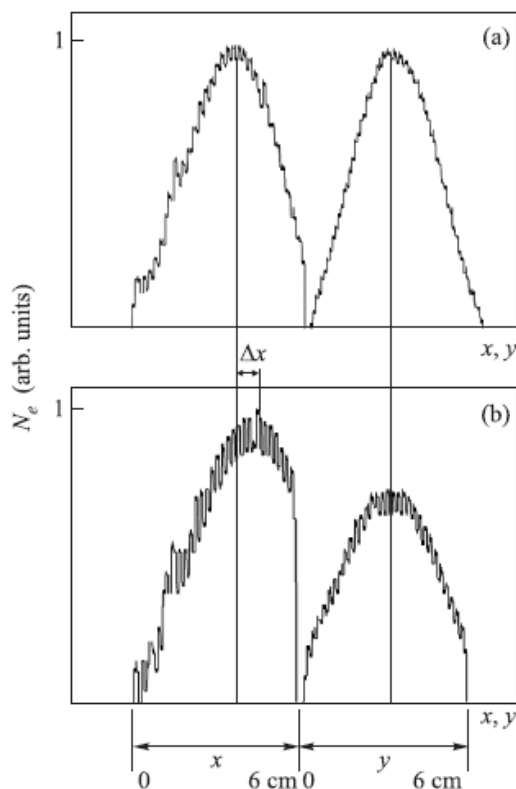
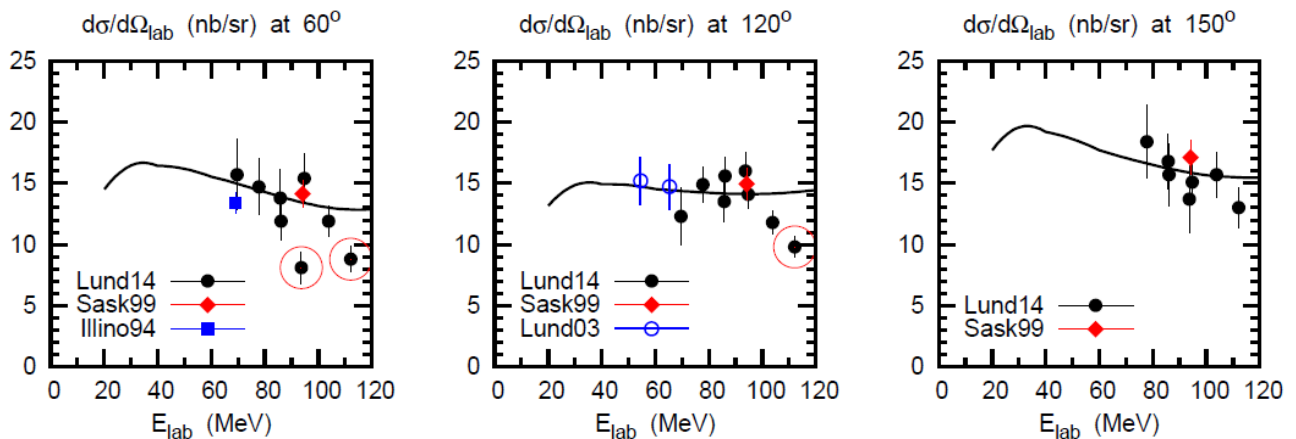


Рис. 2. Горизонтальное ( $x$ ) и вертикальное ( $y$ ) распределения электронов. (а) – частицы движутся в свободном пространстве. (б) – Частицы пересекают алюминиевую фольгу толщиной 120 мкм под углом  $\alpha = 10^\circ$  к ее поверхности

4. Изучался отклик спектрометра, регистрирующего *аномальные* электромагнитные ливни, возникающие при взаимодействии электронов высоких энергий с ориентированным кристаллом перед спектрометром, отличается от отклика спектрометра регистрирующего *стандартные* ливни. Отличия распространяются практически на все параметры развития ливня. В частности, обнаружено, что *критическая энергия*, определяющая начало затухания ливня в спектрометре, при развитии *аномального* ливня, в отличие от постоянной ее величины при развитии стандартного ливня, зависит не только от вещества, но и от энергии электронов, ориентации, температуры и толщины кристалла. Радиусы Мольера, определяющие поперечное развитие ливней, в ориентированных кристаллах вольфрама (W), вольфрамата ( $PWO_4$ ) и граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ), отличаются от соответствующих радиусов при развитии *стандартных* ливней в аморфных веществах.

5. Проведен теоретический анализ новых данных Лунда по упругому рассеянию фотонов на дейтронах с целью определения электрической и магнитной поляризуемостей нейтрона. Трудность анализа состоит в корректном учете эффектов взаимодействия нуклонов, включая мезонные обменные токи и ненуклонные степени свободы. Использовалась теоретическая модель, ранее развитая в сотрудничестве ФИАН-Минск и основанная на Боннском NN потенциале. Полученные из анализа поляризуемости нейтрона оказались близкими к поляризуемостям протона. Вместе с тем наш результат,  $\alpha_n - \beta_n = (12.5 \pm 3.7) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$ , заметно отличается от результата анализа, выполненного с использованием модных, но менее точных подходов с рамках эффективных теорий поля.



Дифференциальное сечение упругого  $\gamma d$  рассеяния при  
 $\alpha_n - \beta_n = 12.5 \pm 3.7$ ,  $\alpha_n + \beta_n = 15.2 \pm 0.5$  (Baldin sum rule)  
 $\alpha_p - \beta_p = 11.1 \pm 1.2$ ,  $\alpha_p + \beta_p = 14.0 \pm 0.5$  (from  $\gamma p$  scattering data).

#### 4. Публикации:

C.S.Akondi et al. Measurement of the transverse target and beam-target asymmetries in  $\eta$  meson photoproduction at MAMI. Phys.Rev.Lett. 113, 102001 (2014).

D.Werthmüller et al. Quasifree photoproduction of  $\eta$  mesons off protons and neutrons. Phys.Rev. C90, 015205 (2014).

M.Dieterle et al. Photoproduction of  $\pi^0$ -mesons off neutrons in the nucleon resonance region. Phys.Rev.Lett. 112, 142001 (2014).

P.Aguar-Bartolome et al. A new determination of the  $\eta$  transition form factor in the Dalitz decay  $\eta \rightarrow e^+e^-\gamma$  with the Crystal Ball/TAPS detectors at the Mainz Microtron. Phys.Rev. C 89, 044608 (2014).

B.M.K.Nefkens et al. A new measurement of the rare decay  $\eta \rightarrow \pi^0\gamma\gamma$  with the Crystal Ball/TAPS detectors at the Mainz Microtron. Phys.Rev. C90, 025206 (2014).

A.Nikolaev et al. Determination of the  $\eta$  mass with the Crystal Ball at MAMI-B. Eur. Phys. J. A50, 58 (2014).

V.L. Kashevarov. Target and beam-target asymmetry measurements at MAMI. Eur. Phys. J. Web of Conferences 73, 040004 (2014).

V.L. Kashevarov. Experimental study of  $\gamma p \rightarrow \eta p$  reaction at MAMI. Submitted to Eur. Phys. J. Web of Conferences.

H.W. Griesshammer, A.I. L'vov, J.A. McGovern, V.Pascalutsa, B. Pasquini, D.R. Phillips. Theory Viewpoint on Extracting Nucleon Polarisabilities in Low-Energy Compton Scattering. E-print arXiv: 1409.1512.

С.В. Афанасьев, В.А. Басков, А.И. Львов, А.В. Кольцов, Л.Н. Павлюченко, В.В. Полянский, Е.В. Ржанов, С.С. Сидорин. Исследование прототипа нейтронного детектора на космическом излучении. Препринт ФИАН № 22, Москва, 2014, 16 с.

В.А. Басков. Энергетическая зависимость отклика электромагнитного спектрометра с конвертером из ориентированного кристалла. Краткие сообщения по физике ФИАН, №3 (2014) 32-38.

В.А. Басков. Оценки поперечного развития аномальных электромагнитных ливней. Краткие сообщения по физике ФИАН, №4 (2014) 21-24.

В.А. Басков, Б.Б. Говорков, В.В. Полянский. Калибровка на космическом излучении свинцово-сцинтилляционного монитора с внутренним триггером. Краткие сообщения по физике ФИАН, №5 (2014) 37-42.

В.А. Басков. Регистрация электронов высокой энергии спектрометром направленного действия. Письма в ЖЭТФ, том 99, выпуск 12 (2014) 785-788.

В.А. Басков. Критическая энергия аномальных электромагнитных ливней.  
Краткие сообщения по физике ФИАН, №8 (2014) 27-33.

В.А. Басков. Влияние ориентированного кристаллического конвертора на отклик электромагнитного спектрометра. Ядерная физика и инжиниринг (2014) (в печати).

В.А. Басков. Радиационная длина ориентированного кристалла.  
Краткие сообщения по физике ФИАН (2014) (в печати).

В.А. Басков. Влияние температуры кристалла на параметры электромагнитного ливня.  
Краткие сообщения по физике ФИАН (2014) (в печати).

A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov, A.N. Oleinik, I.A. Kishchin, A.Yu. Aleynikov.  
Transition radiation of fast electrons as a broadband vacuum-ultraviolet radiation source // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, V. 8, No. 4, 2014, P. 682.

V.I. Alekseev, A.N. Eliseev, A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov, V.V. Polyanski, V.I. Sergienko, P.N. Zhukova. Research of the polarization bremsstrahlung of relativistic electrons in polycrystalline targets. Nucl. Inst. Meth. B 342 (2015) 47-51.

V.I. Alekseev, A.N. Eliseev, A.S. Kubankin, R.M. Nazhmudinov, V.V. Polyanski, V.I. Sergienko. The angular dependence of the polarization bremsstrahlung of relativistic electrons in polycrystalline tungsten. Направлена в журнал Nucl. Inst. Meth.

А.В.Кольцов, А.В.Серов. Экспериментальное исследование рассеяния электронов с энергией 7.4 МэВ, пересекающих фольгу под углом  $10\div 45$  градусов к ее поверхности. Письма в ЖЭТФ, 2014, т.99, в.1, с.3-6.

В.В.Полянский, А.В.Кольцов, А.В.Серов. Особенности рассеяния протонов и релятивистских электронов, пересекающих тонкую плоскую мишень под малым углом к ее поверхности. ЖЭТФ, 2014, т.146, в. 2(8), с. 240 - 246.

A.V. Koltsov, I.A. Mamonov, A.V. Serov. Experimental study of the scattering of 7.4 MeV electrons intersecting a foil at an angle of  $5-60^\circ$  to its surface. Труды RuPAC-2014, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2014/papers/thpsc36.pdf>

V.G.Kurakin. Complex Shunt Impedance and Beam-RF Cavity Interaction. Proceedings of 24th Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2014, Obninsk, October 6 – 10, 2014, Russia <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2014/papers/tupsa18.pdf>

E.G. Bessonov, A.A. Mikhailichenko. Optical stochastic cooling method in application to beams of charged particles. E-print arXiv <http://arxiv.org/abs/1407.1551>

Е.Г. Бессонов. «Об одном пути к преобразованиям Лоренца». Направлено в УФН.

**- доклады на конференциях и школах**

PWA Collaboration Meeting “PWA with Complete Experiments”, Mainz, Germany, 12--14 February 2014.

V.L. Kashevarov. Analysis of the polarization data in  $\gamma p \rightarrow \pi^0 p$  reaction.

International Conference “Dark Matter, Hadron Physics and Fusion Physics”, (DHF--2014), Messina, Italy, 24--26 September 2014.

V.L. Kashevarov. “Experimental study of  $\gamma p \rightarrow \eta p$  reaction at MAMI.

24<sup>th</sup> International A2 Collaboratin Meeting, Mainz, Germany, 13-15 March 2014.

V.L. Kashevarov. Analysis of T, F, and E data for  $\gamma p \rightarrow \eta p$ .

25<sup>th</sup> International A2 Collaboration Meeting, Dubna, 7 - 10 September 2014.

1) L.V. Fil'kov. Dipole pion polarizabilities.

2) A.I. L'vov. Studying Compton Scattering and Polarizabilities: Theory viewpoint.

International Symposium “The 70-th Anniversary of the Discovery of Phase Stability Principle”, JINR, Dubna, 10-15 November 2014.

1) A.I. L'vov. Studies of low-energy Compton scattering and nucleon polarizabilities in the Veksler laboratory @ LPI and beyond (theoretical viewpoint).

2) E.G.Bessonov. The evolution of the phase space density of particle beams in external fields.

3) V.G.Kurakin. On the concept of a complex shunt impedance in electrodynamics of accelerating cavities.

Международная сессия-конференция Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН, 17 - 21 ноября, 2014, Москва.

1) А.И. Львов, М.И. Левчук. Определение поляризуемостей нейтрона из данных по комптоновскому рассеянию на дейтроне.

2) В.А. Басков. Регистрация электронов высоких энергий спектрометром направленного действия.

3) А.В. Серов, И.А. Мамонов, А.В. Кольцов. Экспериментальное исследование рассеяния релятивистских электронов, пересекающих тонкую плоскую мишень под малым углом к ее поверхности.

4) В.Г.Куракин. О концепции комплексного шунтового импеданса в электродинамике ускоряющих резонаторов.

Конференция «Научная сессия МИФИ-2014», 27 января – 01 февраля 2014 года, НИЯУ МИФИ, Москва.

В.А. Басков. Режекция частиц спектрометром направленного действия.

XLIV Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами, Москва, МГУ, 27-29 мая 2014 г.

1) И.А. Кишин, А.С.Клюев, А.С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов, В.И. Сергиенко. Источник вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена на основе излучения Вавилова-Черенкова в скользящей геометрии.

- 2) В.И. Алексеев, А.Н. Елисейев, Э.Ф. Иррибарра, И.А. Кишин, А.С. Кубанкин, Р.М. Нажмудинов, И.С. Никулин, В.И. Сергиенко.  
Диагностика поликристаллов на основе поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в геометрии обратного рассеяния.
- 3) В.А. Басков. Критическая энергия аномальных ливней от электронов.

The 6th International Conference - Channeling 2014 Charged & Neutral Particles Channeling Phenomena, October 5-10, 2014 Capri (Naples), Italy.

V.I. Alexeyev, A.N. Eliseyev, E. Irribarra1, I.A. Kischin, A.S. Kubankin, V.V. Polyansky, R.M. Nazhmudinov, V.I. Sergienko. Diagnostics of polycrystals using polarization bremsstrahlung from relativistic electrons in backscattering geometry.

Всероссийская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC-2014, 6-10 октября 2014 г., г. Обнинск.

- 1) A.V. Koltsov, I.A. Mamonov, A.V. Serov. "Experimental study of the scattering of 7.4 - MeV electrons intersecting a foil at an angle of  $5 - 60^\circ$  to its surface.
- 2) V.G. Kurakin. Complex Shunt Impedance and Beam-RF Cavity Interaction.
- 3) V.G. Kurakin. Low Energy Electron Beam Line at Lebedev Physical Institute Accelerator Complex.

Международная конференция IVESC-ICEE-ICSTPEA-BDO-2014, Санкт Петербург, 30 июня – 4 июля 2014 г.

- 1) V.G. Kurakin. Cavity Excitation Equations in Terms of External Parameters.
- 2) V.G. Kurakin. Beam Optics in Self Oscillating Back Compton Generator.

## **5. Поддержка работы за счет грантов РФФИ, госконтрактов, внебюджетных и прочих средств.**

Госконтракт с МИФИ № 552-600/576за от 05.12.2011 г. “Оказание услуг по облучению экспериментальных образцов и изделий и метрологическому обеспечению радиационных экспериментов для РУЦ НИЯУ МИФИ”.

Грант РФФИ № 14-32-50736\_мол-нр. Рук. дфмн Сергиенко В.И. (ФИАН), исп. Кишин И.А. (аспирант БелГУ).

Внебюджетное финансирование со стороны Белгородского госуниверситета в рамках совместной лаборатории ФИАН–БелГУ «Лаборатория радиационных процессов в конденсированных веществах» (рук. член-корр. РАН Н.Н.Сибельдин (ФИАН)).

## **6. Ожидаемые результаты в 2015 году**

Будут измерены с рекордной статистикой сечения фоторождения  $\pi^0$  и  $\eta$  мезонов на протоне, а также поляризационные наблюдаемые, при энергиях ускорителя МАМИ-С. Будут измерены поляризационные наблюдаемые в реакции двойного фоторождения мезонов. Полученные данные будут использованы для определения параметров барионных резонансов.



Планируется продолжить создание установки для исследования образования этамезонных ядер на внутренней мишени нуклотрона ОИЯИ – оснастить магнитное плеча установки координатными камерами и соорудить время-пролетный нейтронный детектор.

На пучках ускорителя «Пахра» будут продолжены исследования атомной структуры веществ методом рентгеновского поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов в геометрии обратного рассеяния с использованием новых рентгеновских детекторов высокого энергетического разрешения.

Будут проведены исследования спектральных характеристик излучения электронных пучков, пересекающих неплоские поверхности.

Планируются совместные (МИФИ-ФИАН) исследования наведенной активности и радиационной стойкости материалов на выведенном из синхротрона «Пахра» электронном пучке и пучке фотонов малых энергий.

Будет исследовано развитие аномальных электромагнитных ливней в кристаллах от гамма-квантов высоких энергий.