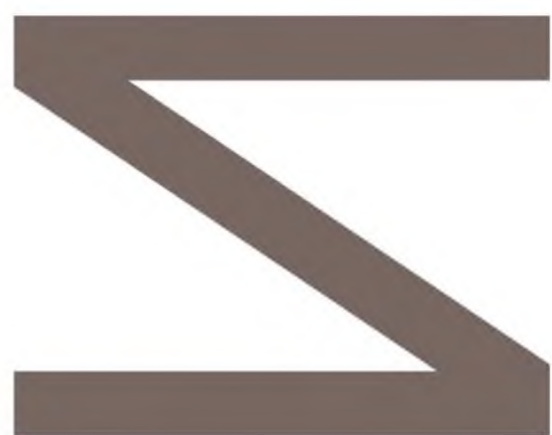
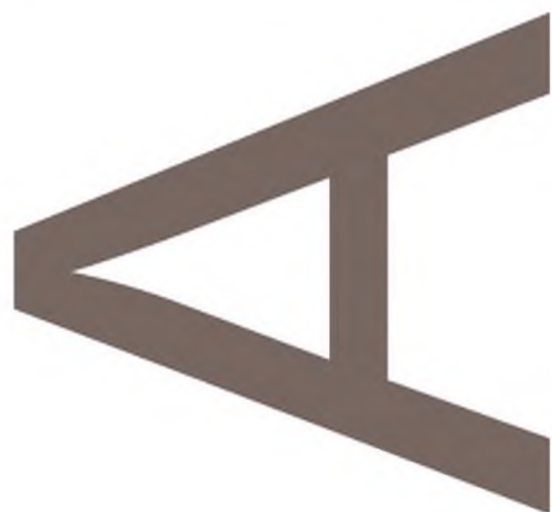


ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ИМЕНИ П. Н. ЛЕБЕДЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



2015

ОЯФА

**Отделение ядерной физики и
астрофизики**

Основные направления научной работы ОЯФА

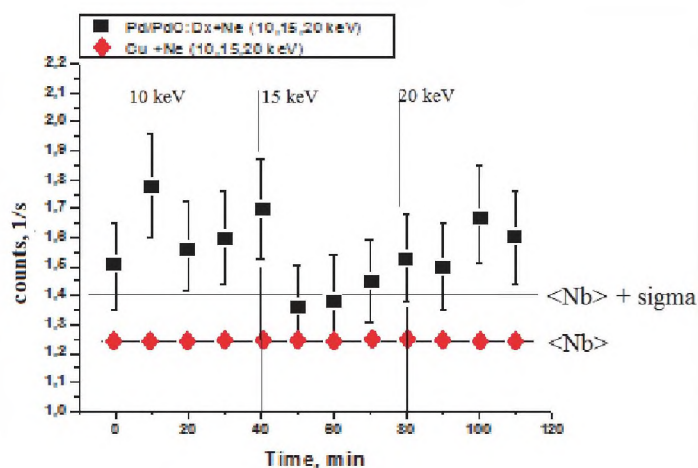
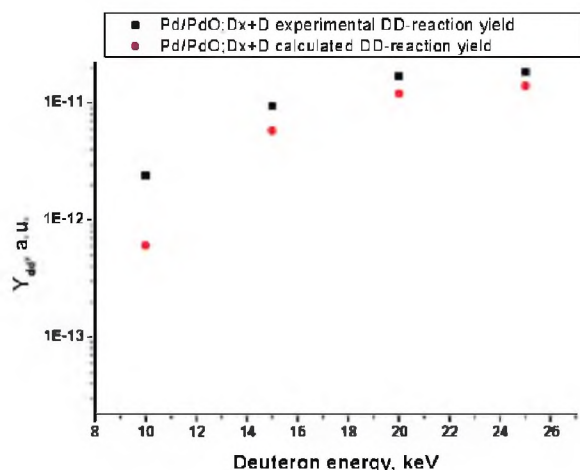
Физика фундаментальных взаимодействий,
ядерная и нейтринная физика, физика
элементарных частиц, космических лучей и
атмосферных процессов, гамма-астрономия,
темная материя

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Отделение ядерной физики и астрофизики ФИАН

На уникальной установке ГЕЛИС ОЯФА ФИАН проведен цикл экспериментов по изучению экзотермической ядерной реакции D+D в кристаллических структурах при низких энергиях.

Экспериментально обнаружено значительное увеличение выхода продуктов DD-реакций (нейтронов и протонов) из гетероструктур Pd/PdO:D_x и Ti/TiO₂:D_x по сравнению с расчетным значением.



Зависимость выходов DD-реакции из мишени Pd/PdO:D_x от энергии пучка D⁺ (слева); ■ – измеренный выход DD-реакции, ● – выход DD-реакции, рассчитанный для данной энергии. Счет нейтронного детектора He-3 (справа) при облучении мишени пучком ионов Ne⁺ (10, 15, 20 кэВ). Мишень – Pd/PdO:D_x, пучок – Ne⁺ (10, 15, 20 кэВ). Средний фон (♦) измерен с мишенью Cu

A.V. Bagulya, O. D. Dalkarov, M. A. Negodaev, A. S. Rusetskii, and A. P. Chubenko, Study of DD-Reaction Yields from the Pd/PdO:D_x and the Ti/TiO₂:D_x Heterostructure at Low Energies using the HELIS Setup, Phys. Scr. 90 (2015) 074051 (5pp)

A.V. Bagulya, O.D. Dalkarov, M.A. Negodaev, A.S. Rusetskii, A.P. Chubenko, V.G. Ralchenko, A.P. Bolshakov, Channeling effect in polycrystalline deuterium-saturated CVD diamond target bombarded by deuterium ion beam, NIM B 355 (2015) 340-343

А.В. Багуля, О.Д.Далькаров, М.А.Негодаев, А.С.Русецкий, В.Г.Ральченко, ГЕНЕРАТОР БЫСТРЫХ МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ, заявка на патент № 2014113629 от 08.04.2014 — получено положительное решение (2015).

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ФОРМУЛИРОВКА КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Отделение ядерной физики и астрофизики ФИАН

В 2015 году закончено построение новой формулировки квантовой механики, в которой квантовые состояния задаются вероятностью. Новая вероятностная формулировка квантовой механики впервые позволила использовать для описания квантового состояния настоящие вероятности, такие же как и задающие состояние в классической статистической физике.

Создание данного подхода завершило многолетние попытки построения квантово-меха-

нического формализма наиболее близкого к классическому формализму, начатые еще в 1932 году введением функции Вигнера, продолженные в 1940 году введением функции Хусими и в 1963 году функции Глаубера-Сударшана, которые являются квазивероятностями. Используя соотношения неопределенностей в новой формулировке квантовой механики, удалось указать возможности объяснения необычных реакций, включая химические и ядерные реакции.

V. N. Chernega, O.V. Man'ko, V. I. Man'ko, "Minkovskii-type inequality for arbitrary density matrix of composite and noncomposite systems", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 17-23 (2015)

E. O. Kiktenko, A. K. Fedorov, O.V. Man'ko and V. I. Man'ko, "Tomographic discord for a system of two coupled nanoelectrical circuits", Phys. Scripta, Vol. 90, p. 055101 (2015) 7

E. O. Kiktenko, A. K. Fedorov, O.V. Man'ko and V. I. Man'ko, "Multilevel superconducting Circuits as two-qubit systems: Operations, state preparatuion, and entropic inequalities", Phys. Rev. A, Vol. 91, p. 0423212 (2015)

Vladimir I. Man'ko, Lyubov' A. Markovich, "Separability and entanglement of a spin-1 particle", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 110-118 (2015)

Vladimir N. Chernega, Olga V. Man'ko, Vladimir I. Man'ko, "Gross-Pitaevskii equation for the density matrix in the position representation", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 135-138 (2015)

Ivan V. Dudinets, Vladimir I. Man'ko, "The replica Method and entropy for a mixture of two-mode even and odd Schrodinger cat states", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 251-257 (2015)

Margarita A. Man'ko, Vladimir I. Man'ko, "Hidden quantum correlations in single qudit systems", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 301-311 (2015)

Vladimir I. Man'ko, L. A. Markovich, "Steering and correlations for a single qudit state on the example of spin $j=3/2$ ", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 343-349 (2015)

Ashot S. Avanesov, Vladimir I. Man'ko, "Unitary Transform and Subadditivity Condition for Composite and Noncomposite Systems", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp.430-439 (2015)

Evgenii Glushkov, Anastasiia Glushkova, Vladimir I. Man'ko, "Testing Entropic Inequalities for Superconducting Qudits", J. Russ. Laser Res. Vol. 36, pp. 448-457 (2015)

Vladimir N. Chernega, Olga V. Man'ko, Vladimir I. Man'ko, "Deformed entropy and information relations for composite and noncomposite systems", Foundation of Physics, v.45,pp.783-798 (2015)

НА УРОВНЕ 5.1σ ОБНАРУЖЕНЫ ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО В КАНАЛЕ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ **ФИАН, ИЯИ РАН, НИИЯФ МГУ, ОИЯИ**

В сентябре 2015 года коллаборацией OPERA объявлено об открытии осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Работа выполнена с использованием гибридного детектора OPERA, расположенного в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), использующего пучок мюонных нейтрино из ЦЕРНа и состоящего из электронных сенсоров, мюонных спектрометров и ядерных эмульсий, прослоенных пластинами свинца. Пространственное разрешение эмульсий (~ 1 мкм) позволило идентифицировать часть взаимодействий ν_τ в канале заряженного слабого тока. Поиск этих событий основан на наблюдении признаков распада короткоживущей частицы. Основным источником фона являются события от ν_μ с рождением очарованных адронов, которые также содержат трек короткоживущей частицы и, тем самым, похожи по топологии распада на взаимодействия ν_τ . Экспозиция эксперимента OPERA проводилась в 2008–2012 гг. Наблюдение 4-х кандидатов на взаимодействие ν_τ в

эмульсионном детекторе было показано ранее на части экспериментального материала. В работе [1] приводятся результаты анализа 5408 событий (что на 15% больше выборки, использованной при наблюдении 4-х кандидатов). Разработанное в ФИАН программное обеспечение, позволившее увеличить скорость сканирования с 20 до 80 см²/час оказалось настолько удачным, что уже используется и в европейских лабораториях, в частности, в Неаполе.

Участниками коллаборации OPERA была проведена и новая оценка фона. В результате, статистическая значимость, соответствующая гипотезе только фона, составила 5.1σ . Характеристики всех 5 событий-кандидатов не противоречат ожидаемым для взаимодействий ν_τ . Тем самым, в эксперименте OPERA совершено открытие осцилляций нейтрино в канале $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Этот главный результат эксперимента OPERA включен в физическое обоснование Нобелевской премии по физике 2015 года.

Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment. Phys. Rev.Lett. v.115, 121802 (1-7) 2015, (ArXiv e-prints. n. arXiv1507014170, pp. 1-7, 2015) (The OPERA Collaboration).

Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam. Journal of High Energy Physics. vol. 2015, n. 6, 2015. (ArXiv ePrint n.arXiv:1503.01876, pp. 1-8, 2015) (The OPERA Collaboration)

Technical proposal. A facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS (ArXiv e-prints. n.arXiv150404956S, pp. 1-256, 2015) (The SHiP Collaboration).

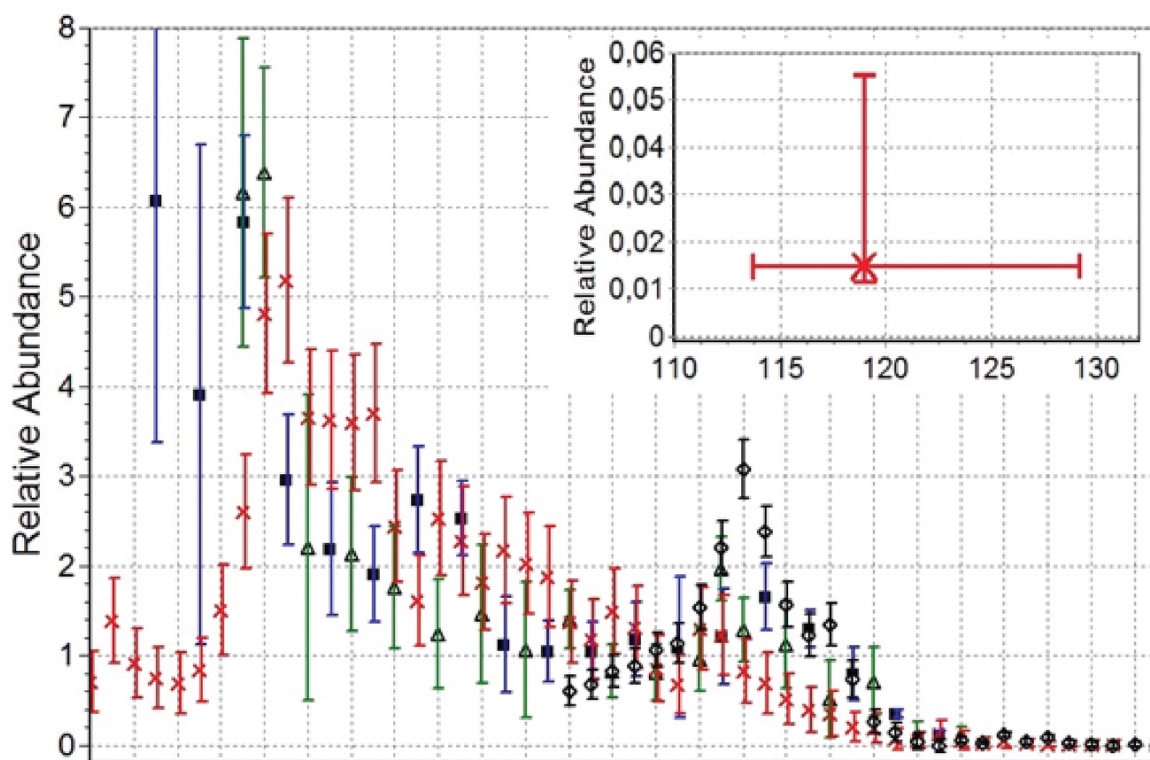
http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/press.html; http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced-physicsprize2015.pdf

ЗАРЯДОВЫЙ СПЕКТР ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Целью выполняемого группой авторов ФИАН-ГЕОХИ на комплексе ПАВИКОМ проекта являются исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер в космических лучах путем поиска и измерения треков ядер в кристаллах оливинов из палласитов. Вопрос о существовании сверхтяжелых ядер имеет важнейшее значение для понимания свойств ядерной материи. Авторами получен значительный объем экспериментальных данных о сверхтяжелых ядрах природного происхождения. Общая статистика – 11642 сверхтяжелых ядра галактических космических лучей – позволяет оценить этот банк данных как самый большой из всех современных: в 442 исследованных кристаллах метеоритного оливина (264 кристалла из метеорита

Marjalahti и 178 кристаллов из метеорита Eagle Station, размер каждого кристалла около 2 мм³) обнаружены и определены параметры 11642 треков ядер с $Z > 20$ (в том числе, 10283 трека ядер с $Z \geq 50$, 1233 трека ядер с $Z \geq 70$ и 9 треков ядер с $Z \geq 88$). В составе зарегистрированных событий идентифицировано 384 трека, заряд которых оценивается как $Z \geq 75$, т.е. соответствующие ядра могут относиться к долгоживущим сверхтяжелым элементам.

Результаты работы по проекту являются весомым вкладом в мировую статистику экспериментов по поиску сверхтяжелых ядер. Полученные результаты позволяют говорить о существовании и распространенности трансфермиевых элементов в природе.



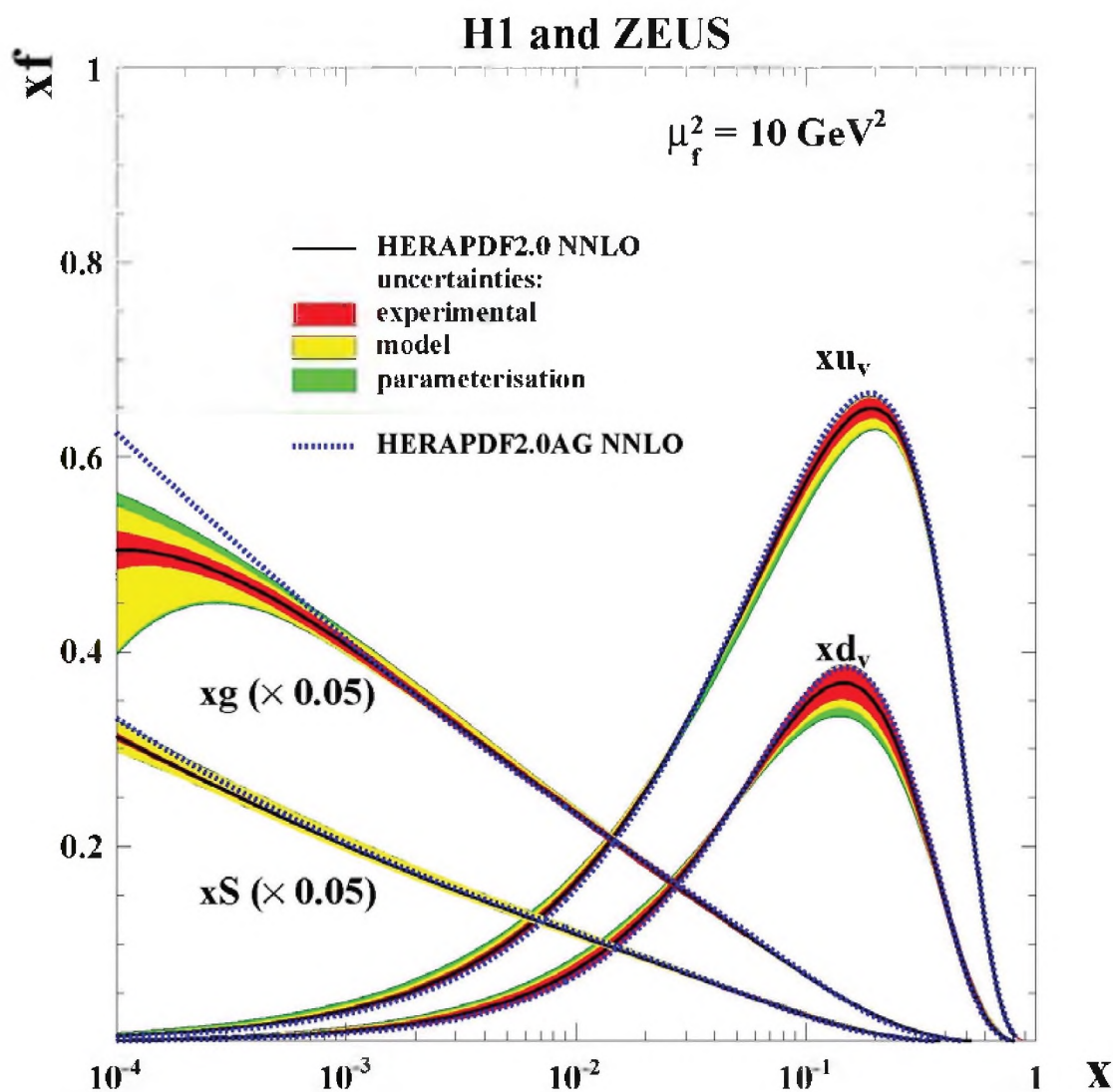
Относительная распространенность тяжелых ядер ГКЛ, зарегистрированных авторами ФИАН-ГЕОХИ (кресты) в сравнении с результатами других экспериментов: HEAO-3 (квадраты) [W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner et al., *Astrophys. J.*, 346, 997, (1989)] ARIEL-6 (треугольники) [O'Sullivan, A. Thompson, C. Domingo et al., *Nucl. Track and Rad. Meas.*, 15, 673, (1988)] и UHCRE (круги) [J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan et al., *Astrophys. J.* 747(40), 14, (2012)]

НАИБОЛЕЕ ТОЧНАЯ КАРТИНА ПРОТОНА: КОМБИНИРОВАННЫЙ (H1 + ZEUS) АНАЛИЗ ДАННЫХ HERA ПО ГЛУБОКО-НЕУПРУГОМУ ep -РАССЕЯНИЮ

Выполнен совместный анализ результатов, полученных коллаборациями H1 и ZEUS, по глубоко-неупругому ep -рассеянию при энергии электронов /позитронов 27.5 ГэВ и энергиях протонного пучка 920, 820, 575 и 460 ГэВ. С использованием расчетов по КХД получены но-

вые, наиболее точные функции распределения кварков и глюонов в протоне – так называемый набор HERAPDF2.0 и некоторые его варианты.

Точное знание партонных распределений играет очень важную роль при изучении новой физики на LHC.



Наиболее точные партонные распределения в протоне по данным коллабораций H1 и ZEUS на коллайдере HERA

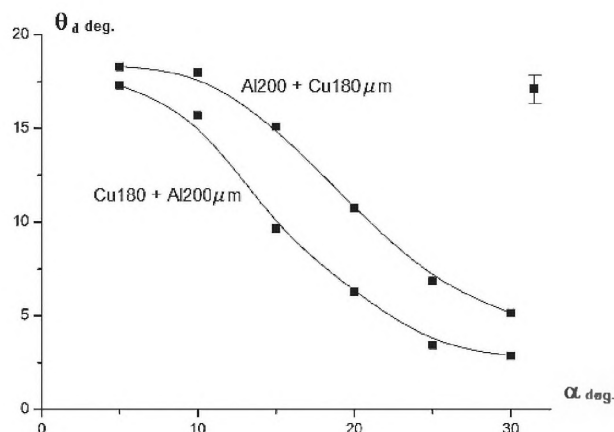
S. Schmidt and M. Wing, DESY H1 and ZEUS spokespersons. "The most precise picture of the proton". CERN Courier, October 2015 issue.

H1 and ZEUS Collaborations (H. Abramowicz et al.). "Combination of Differential D^2 Cross-Section Measurements in Deep-Inelastic ep Scattering at HERA". Preprint DESY-15-037, 2015. 37 pp. arXiv:1503.06042, J. High Energy Physics 1509 (2015) 149

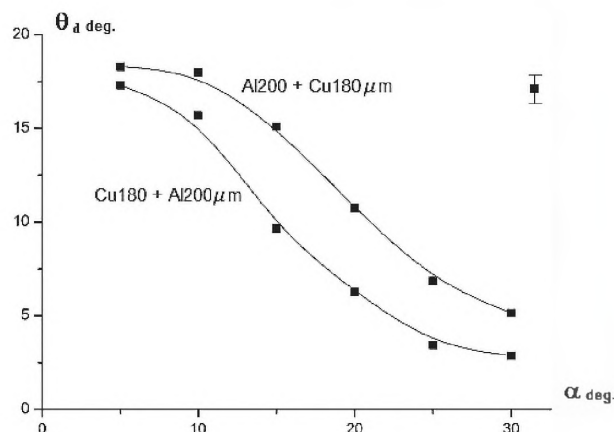
ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ПАДАЮЩИХ НА ТОНКУЮ ПЛОСКУЮ МИШЕНЬ ПОД МАЛЫМ УГЛОМ К ЕЁ ПОВЕРХНОСТИ

Исследовано влияние материала и толщины фольги, а также угла между начальной траекторией пучка и плоскостью мишени на направление движения, пространственное распределение и угловую расходимость пучка, пересекающего фольгу, и пучка, отраженного фольгой. Изучалось влияние порядка следования слоев металла в биметаллических фольгах на углы преломления и отражения пучков.

ка, пересекающего фольгу, и пучка, отраженного фольгой. Изучалось влияние порядка следования слоев металла в биметаллических фольгах на углы преломления и отражения пучков.



Зависимость угла отклонения от угла инжекции для медных фольг различной толщины



Зависимость угла отклонения от угла инжекции для биметаллических фольг из алюминия и свинца. Надписи у кривых показывают порядок следования металлов и их толщину

А.В.Кольцов, И.А.Мамонов, А.В.Серов. «Рассеяние релятивистских электронов на тонкой биметаллической фольге». Письма ЖЭТФ, т.101, в.7, с.486- 489, 2015

А.В.Серов, И.А.Мамонов, А.В.Кольцов. «Угловые распределения отраженных и преломленных пучков релятивистских электронов, пересекающих тонкую плоскую мишень под малым углом к ее поверхности». ЖЭТФ, т.148, в.4(10), с.658- 664, 2015.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО ТИПА ГАММА-ЛОКАТОРА

Гамма-локатор — это миниатюрный детектор γ излучения, предназначенный для использования в ядерной медицине с целью определения в режиме реального времени пространственного распределения радиоактивных фармакологических препаратов в теле человека. Разработан гамма-локатор на основе

сцинтилляционного кристалла $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ и кремниевое фотоумножителя SiPM. Гамма-локатор обладает следующими техническими характеристиками: энергетическое разрешение 4.1% (на линии 662 кэВ); координатное разрешение 8 мм; пространственная селективность 26° ; чувствительность 12 имп/с/кБк.

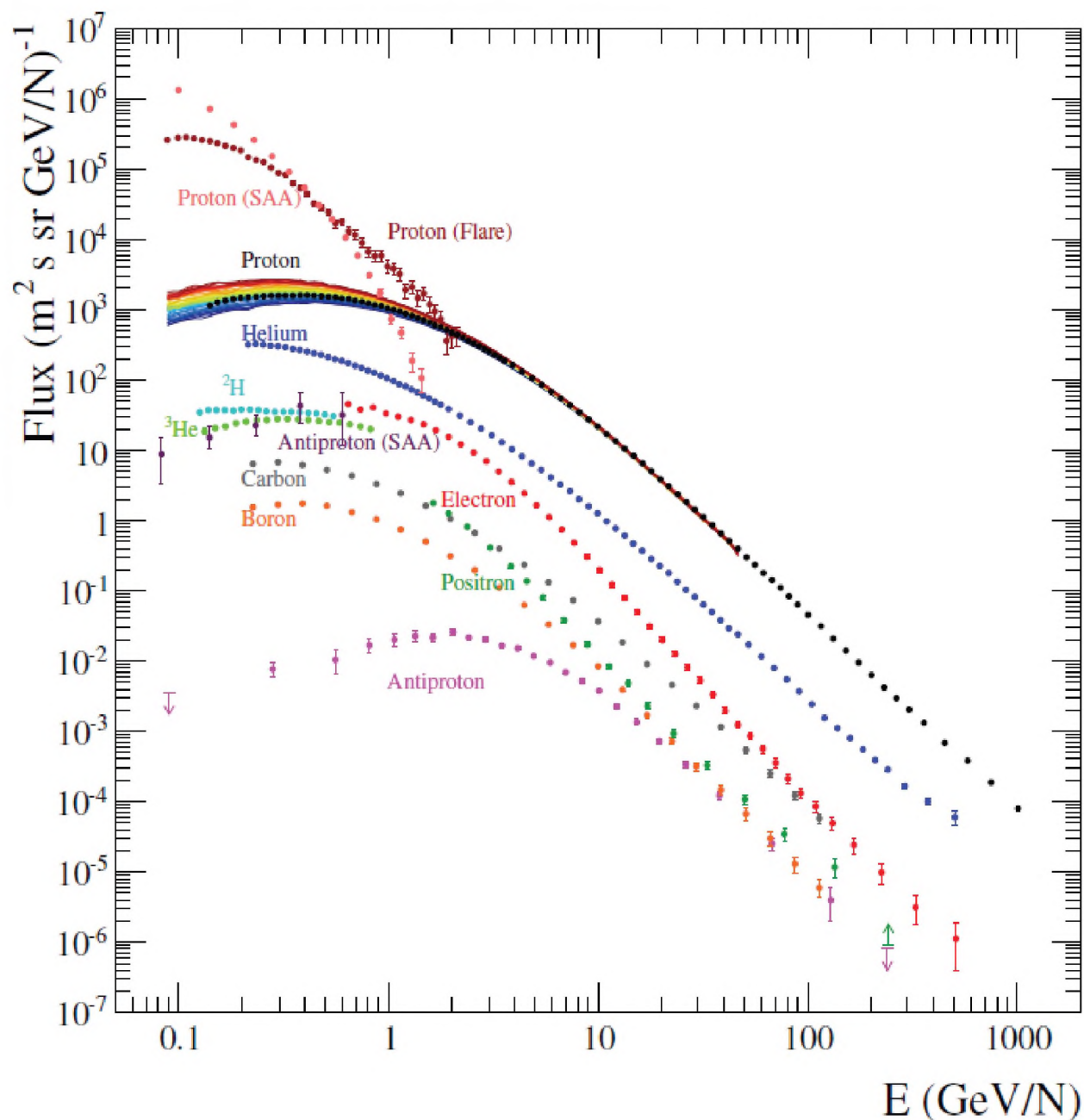


Внешний вид гамма-локатора

А. И. Болоздыня, К. А. Воробьев, Е. И. Евграфова, К. И. Жуков, В. А. Канцеров, В. В. Сосновцев, Д. Е. Филиппов, А. К. Ягнюкова Гамма-локатор для радионуклидной диагностики онкологических заболеваний // Приборы и техника эксперимента 2015, No 1, с. 159-163

СПЕКТРЫ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПАМЕЛА

Получены уникальные суммарные результаты по спектрам различных компонент космических лучей (протоны, антипротоны, ядра гелия, электроны и позитроны, ядра бора и углерода) полученные за ~9-летний период выполнения космического эксперимента.



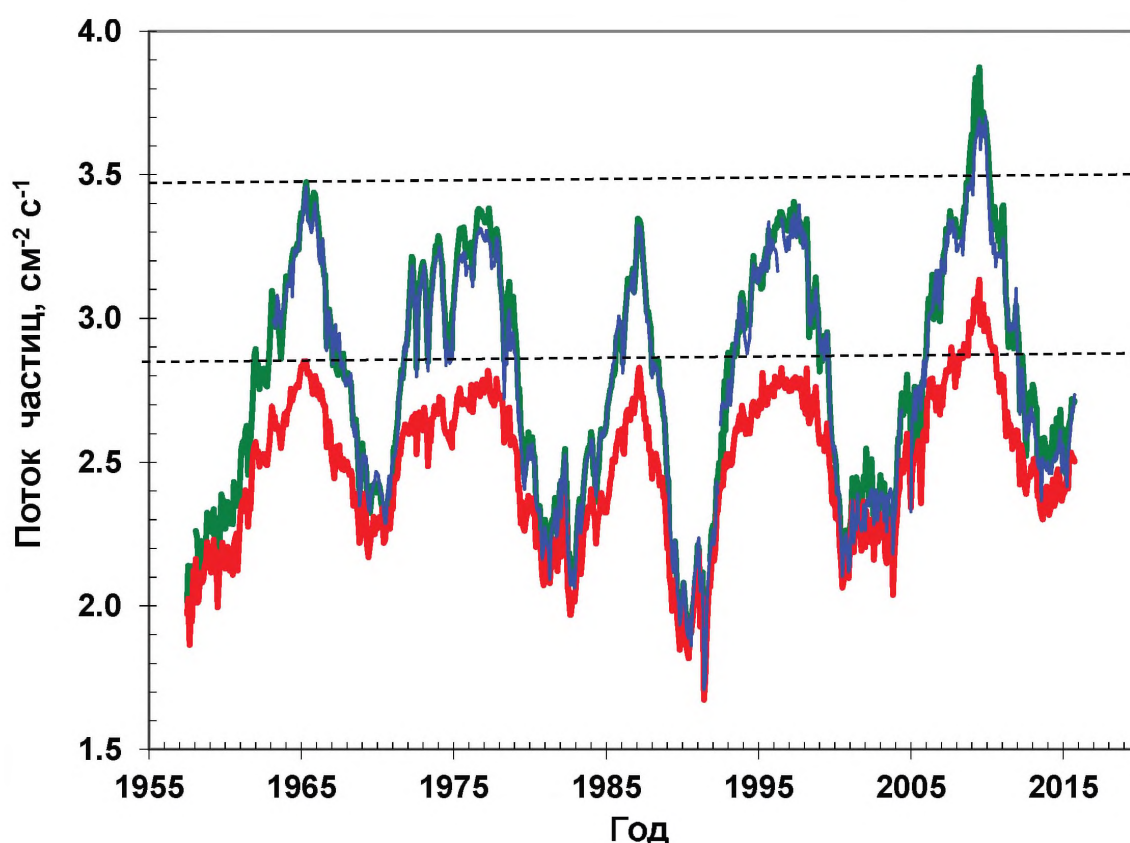
Суммарные потоки частиц, измеренные спектрометром ПАМЕЛА в космическом эксперименте

N. Mori et al., Pamela Collaboration. The PAMELA experiment and cosmic ray observations. Nuclear and Particle Physics Proceedings 265-266 (2015) 242-244

НАБЛЮДЕНИЕ 11-ЛЕТНИХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ПОТОКАМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ

Получен уникальный однородный ряд экспериментальных данных о потоках заряженных частиц в земной атмосфере на высотах от уровня земли до (30–35) км. Минимум в космических лучах текущего солнечного цикла пройден и должно начаться достаточно быстрое возрастание потоков космических лучей в гелиосфере. Крупномасштабные изменения потоков галактических космических лучей в земной атмосфере вызваны 11-летним циклом солнечной активности.

На основе численного решения транспортного уравнения для галактических космических лучей, в котором коэффициенты определялись только измерительными данными по гелиосферному магнитному полю, солнечному ветру и углу наклона гелиосферного токового слоя, удовлетворительно описан временной ход интенсивности галактических космических лучей низких и высоких энергий в трех последних циклах солнечной активности.



Среднемесячные значения потоков заряженных частиц в максимуме Пфотцера в атмосфере северных полярных широт (зеленая кривая), в Антарктиде (синяя кривая) и в северных средних широтах (красная кривая). Данные получены на высотах 17–24 км и охватывают период с середины 1957 г. по октябрь 2015 г. включительно. Пунктирные прямые показывают уровень потоков космических лучей, наблюдавшийся в 1965 г.

Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б., Свиржевский Н.С., Свиржевская А.К., Стожков Ю.И. Описание интенсивности галактических космических лучей в трех последних минимумах солнечной активности. Изв. РАН, сер. физ., 2015, т. 79(5), 660–662

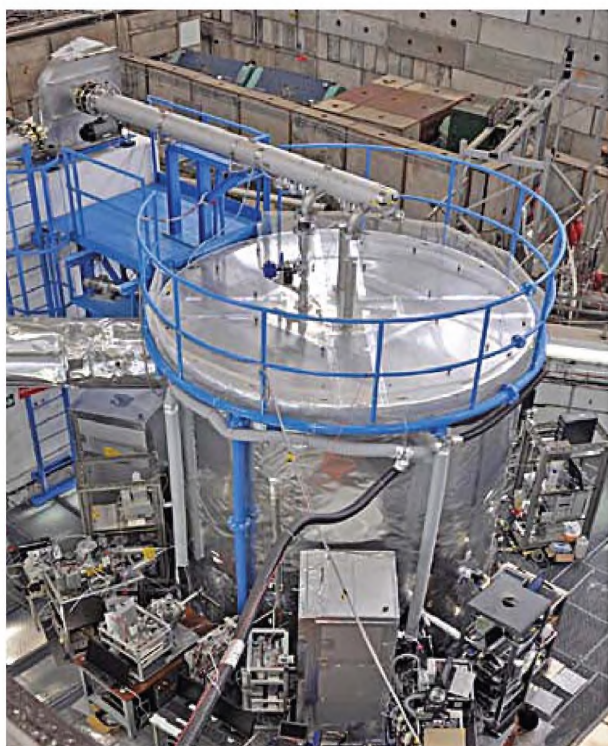
М. С. Калинин, Г. А. Базилевская, М. Б. Крайнев, Н. С. Свиржевский, А. К. Свиржевская, Ю. И. Стожков. ОПИСАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ТРЕХ ПОСЛЕДНИХ МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ. ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ, 2015, том 79, № 5, с. 663–666

АТОМНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ CLOUD (CERN)

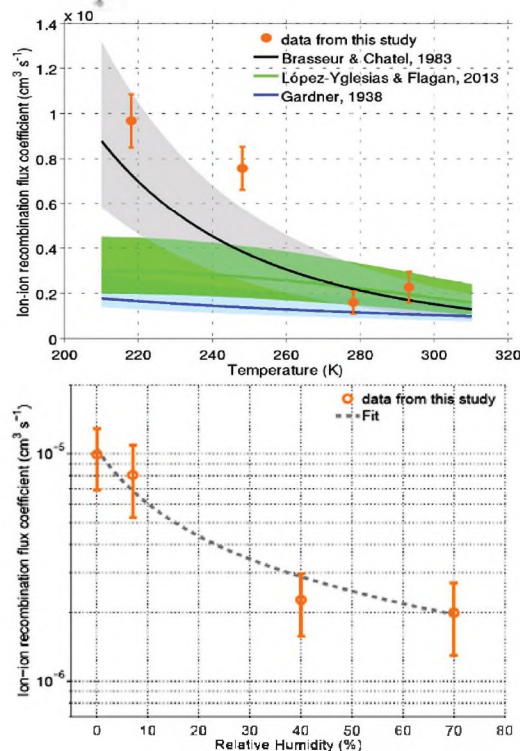
Исследован эффект влияния ионов на формирование кластеров $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ (размерами от 1.3 нм до 3.2 нм) в условиях приближенных к земной атмосфере: концентрация H_2SO_4 в пределах от 10^5 до 10^9 см^{-3} , относительная влажность от 11% до 58%, температура от 207K до 299K и концентрация ионов в диапазоне от 0 до 6800 см^{-3} . Впервые обнаружены большие кластеры, содержащие до 10 молекул H_2SO_4 , которые образовались в результате бинарной нуклеации.

Впервые проведены лабораторные измерения коэффициентов рекомбинации ионов (α) при различных температурах (от -55°C до $+20^\circ\text{C}$), отно-

сительной влажности RH (0–70%), концентрации озона (0–40 ppb и диоксида серы (200–700 ppb)). Величина скорости образования ионов изменялась в пределах $2\text{--}100 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$, что соответствует нижней атмосфере. Установлено, что при RH = 40 % и $T=5^\circ\text{C}$ величина $\alpha = (1.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-6} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, что соответствует реальным условиям. Обнаружено 4-х кратное увеличение величины α при понижении температуры и отсутствие влияния на α изменения концентрации озона и диоксида серы. Впервые показан существенный рост величины α при уменьшении относительной влажности.



Общий вид экспериментальной установки международного проекта CLOUD в ЦЕРНе



Зависимость коэффициента рекомбинации ионов от температуры (вверху) и относительной влажности (внизу)

Franchin A., Ehrhart S., Leppä J., ..., Makhmutov V., ..., Stozhkov Y. et al. Experimental investigation of ion ion recombination at atmospheric conditions. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, v. 15(13), 7203–7216;

Kurten A., Munch S., Rondo L., ..., Makhmutov V. et al. Thermodynamics of the formation of sulfuric acid dimers in the binary ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O}$) and ternary ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{--H}_2\text{O--NH}_3$) system. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015, v. 15(18), 10701–107201;

Duplissy J., Merikanto J., Franchin A., ..., Makhmutov V. et al. Effect of ions on sulfuric acid-water binary particle formation II: Experimental data and comparison with QC-normalized classical nucleation theory. *JGR (A)*, 2015, 4 Sep. 2015, v. 120