

В. А. Бедняков

Физика нейтрино и новая физика в Лаборатории ядерных проблем

В ОИЯИ исследования свойств нейтрино и слабых взаимодействий, а также поиск так называемой «новой физики» проводится главным образом в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова. В этой области получен ряд выдающихся научных результатов. Упомянем лишь некоторые из них. Это открытие бета-распада пиона и доказательство закона сохранения векторного тока в слабом взаимодействии. Фундаментальная идея об осцилляциях нейтрино была высказана Б. М. Понтекорво (1957 г.) также в ЛЯП [1].

За последние годы научное сообщество все больше убеждается в том, что легкие массивные нейтрино — ключевой объект современной физики элементарных частиц. Известна важная роль нейтрино в построении теорий великого объединения, в современной астрофизике (модель Солнца, дефицит солнечных нейтрино, ме-

ханизм взрыва сверхновых, характер эволюции звезд, космические лучи ультравысоких энергий) и космологии (модели ранней Вселенной, формирование крупномасштабных структур, проблема темной или скрытой материи и т. п.). Поиск осцилляций нейтрино наряду с поиском безнейтринного двойного бета-распада ядер является основным направлением современной нейтринной физики, поскольку они позволяют определить все свойства нейтрино (дираковское или майорановское, массы и смешивание). Начиная с 1993 г. физики ЛЯП успешно участвуют в поиске нейтринных осцилляций на установке NOMAD. Важный вклад в исследование физики нейтрино внесла группа ученых ЛЯП в составе коллаборации DELPHI на e^+e^- -коллайдере LEP. Отметим лишь результат первостепенного значения для физики нейтрино и особенно для астро-

V. A. Bednyakov

Neutrino Physics and New Physics at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems

At JINR the systematic studies of neutrino properties, weak interactions and the research in the field of the so-called new physics have been generally conducted at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems. A number of outstanding results have been achieved in these studies. We would like to dwell on some of them in this paper. This is the discovery of the pion β decay and the direct proof of the law of the vector current conservation in weak interactions. The fundamental concept about the neutrino oscillations was also presented by B. M. Pontecorvo in 1957 at DLNP [1]. Scientists are more and more convinced that light massive neutrinos are the key object of the modern elementary particle physics. It is well known that neutrino plays an important role in the theory of grand unification, in modern astrophysics (solar models, the solar neutrino deficiency, mecha-

nisms of supernova explosion, the character of star evolution, ultra-high cosmic rays) and in cosmology (models of the early universe, the formation of large-scale structures, problems of the dark or hidden matter, etc.). The search for neutrino oscillations together with the search for neutrinoless double beta decay of nuclei are the main trends of the modern neutrino physics. These two fundamental effects allow one to determine all neutrino properties (Dirac or Majorana, mass and mixing). The DLNP physicists have also been participating in the search for neutrino oscillations $\nu_\mu - \nu_\tau$ and $\nu_\mu - \nu_e$ at the NOMAD set-up. An important contribution into the neutrino physics research has been made by a group of JINR scientists in the DELPHI collaboration at the e^+e^- collider LEP. We would like to mark here

физики — доказательство существования только трех поколений легких нейтрино [2].

Физика нейтрино и слабых взаимодействий непосредственно граничит с областью новой физики за рамками стандартной модели. Эта новая физика, как правило, сопровождается новыми частицами и новыми взаимодействиями. Наиболее многообещающие построения базируются на идеях суперсимметрии (SUSY). С помощью ускорителей проводится прямой поиск новой физики — они позволяют либо обнаружить предсказываемую частицу, либо, не обнаружив ее, закрыть возможность ее существования. Другой подход основан на косвенном поиске проявлений новой физики, который проводится в неускорительных прецизионных экспериментах.

Среди неускорительных экспериментов безнейтринный двойной бета-распад ядер уже давно признан наиболее чувствительным зондом новой физики. Наблюдение $0\nu\beta\beta$ -распада ${}^Z_A Y \rightarrow {}^{Z+2}_A Y + 2e^-$ ядра ${}^Z_A Y$ было бы недвусмысленным сигналом новой физики, поскольку этот процесс сопровождается нарушением лептонного числа на две единицы и запрещен в стандарт-

ной модели. Коллаборацией NEMO с участием значительной группы сотрудников ЛЯП проведен поиск двойного β -распада ядер ${}^{100}\text{Mo}$, ${}^{116}\text{Cd}$, ${}^{82}\text{Se}$ и ${}^{96}\text{Zr}$. Для безнейтринной моды двойного β -распада получена нижняя граница на время полураспада 10^{21} лет. В настоящее время создан новый большой спектрометр NEMO-3, цель экспериментов на котором [3] состоит в поиске безнейтринной и двухнейтринной мод двойного бета-распада ядер ${}^{100}\text{Mo}$, ${}^{130}\text{Te}$, ${}^{82}\text{Se}$, ${}^{150}\text{Nd}$, ${}^{96}\text{Zr}$, ${}^{48}\text{Ca}$ (масса изотопически обогащенных образцов будет около 10 кг) и измерении эффективной майорановской массы нейтрино на уровне 0,1 эВ.

Как известно, для объяснения прецизионных космологических данных сегодня невозможно обойтись без так называемой темной материи. В рамках SUSY-моделей естественным образом возникает наиболее реалистичский кандидат на роль частицы так называемой холодной (нерелятивистской) темной материи во Вселенной. Это легчайшая из суперсимметричных частиц — нейтралино с массой 10–300 ГэВ (рис.1). Она стабильна, нейтральна, и ее реликтовая плотность удовлетворяет современным астрофизическим данным.

the paramount result for the neutrino physics and astrophysics — the proof of the existence of only three generations of light neutrinos [2].

The neutrino physics and weak interactions physics directly border with the new physics beyond the Standard Model. As a rule, this new physics concerns new particles and new interactions. Most promising constructions are based on the ideas of the supersymmetry (SUSY). The direct search in new physics is conducted with accelerators. They provide a chance either to discover directly a predicted particle or to close the discussion of its existence by non-observance. Another approach is based on indirect search in new physics, which is conducted in non-accelerator very accurate experiments. Among the non-accelerator experiments, the neutrinoless double beta decay of nuclei ($0\nu\beta\beta$) has long been acknowledged as the most sensitive tool of the new physics. The observed $0\nu\beta\beta$ decay ${}^Z_A Y \rightarrow {}^{Z+2}_A Y + 2e^-$ of the ${}^Z_A Y$ nucleus could undoubtedly speak in favour of the new physics, because this process is accompanied by the violation of the lepton number by 2 and is forbidden in the Standard Model. The international collaboration NEMO, where in a large group of DLNP scientists takes part, has conducted research in the double β decay of ${}^{100}\text{Mo}$, ${}^{116}\text{Cd}$, ${}^{82}\text{Se}$

and ${}^{96}\text{Zr}$. The lower limit for a half-decay time of 10^{21} years has been obtained for the double β -decay neutrinoless mode. At present a new large spectrometer NEMO-3 has been developed and the experiments at it are aimed [3] at the search of neutrinoless and two-neutrino modes of double β decay of ${}^{100}\text{Mo}$, ${}^{130}\text{Te}$, ${}^{82}\text{Se}$, ${}^{150}\text{Nd}$, ${}^{96}\text{Zr}$, ${}^{48}\text{Ca}$ (the mass of the isotopically enriched samples will be about 10 kg) and measurement of the effective Majorana neutrino mass on the 0.1 eV level.

It is well known that it is impossible to cover all the spectrum of precision cosmological data today without the so-called dark matter. The SUSY models give naturally a most realistic candidate to be a particle of the cold (non-relativistic) dark matter in the Universe. It is the lightest of the supersymmetric particles (LSP) — neutralino with a mass of 10–300 GeV (Fig. 1). LSP is a stable, chargeless particle. The relict density of the LSP particles splendidly satisfies modern astrophysics data. As a result, SUSY allows the old problem of dark matter to be now closely approached, concerning the age of the Universe and the genesis of large-scale structures in it.

The study of weak interactions, neutrino properties and search for new phenomena in new physics by participation

Рис. 1. Сечение (в пикобарнах) скалярного взаимодействия слабозадействующих массивных частиц (WIMP) с нуклонами как функция массы WIMP-частиц (в ГэВ). Показаны достигнутые экспериментальные пределы (сплошные кривые) и наиболее жесткие ожидаемые ограничения планируемых экспериментов нового поколения (пунктирные кривые). Замкнутый контур (из [5]) и распределенные точки (из [6]) — теоретические ожидания для данного сечения. Только крупные установки нового поколения типа GENIUS, обладающие большим объемом мишени, способны зарегистрировать частицы темной материи, в частности, за счет эффекта сезонной модуляции ожидаемого сигнала

Fig. 1. Cross section (in pb) of the scalar interaction of weak-interacting massive particles (WIMP) with nucleons as a function of WIMPs' mass (in GeV). Shown are experimentally obtained limits (solid curves) and the strongest expected limitations of the experiments in store of a new generation (dotted curves). The closed curve (from [5]) and scatter dots (both light and dark from [6]) are theoretical predictions for this cross section. These are only such massive installations of a new generation as GENIUS that have a large matter volume of the target, which can detect dark matter particles, in particular due to the effect of the season modulation of the expected signal

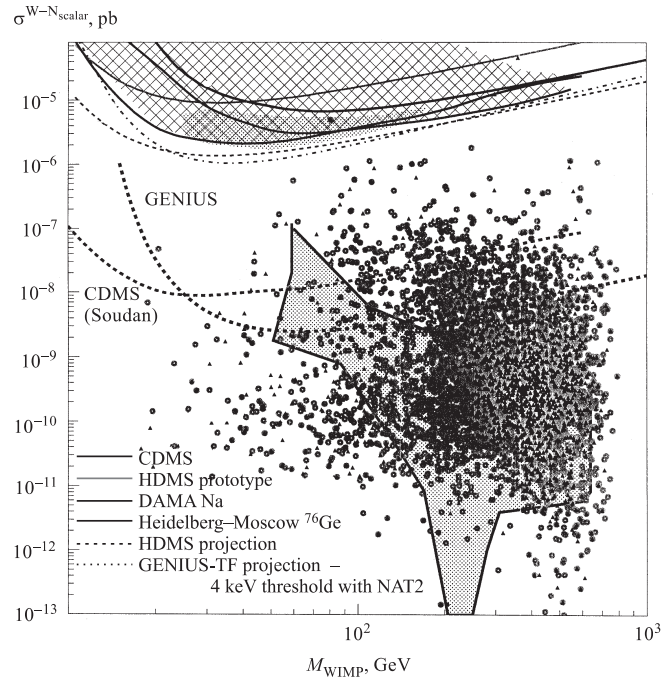


Рис. 2. Слева: схема установки GENIUS. Сборка из сверхчистых германиевых детекторов (100 кг натурального Ge на первом этапе эксперимента или 1–10 т обогащенного Ge на втором этапе) располагается на специальной поддерживающей структуре в центре большого резервуара, наполненного жидким азотом. Диаметр «азотной» защиты — как минимум 12 м. Справа: концептуальная схема пробной установки GENIUS-Test Facility [7]. Во внутренней детектирующей камере, заполненной жидким азотом, установлено 14 сверхчистых германиевых детекторов весом до 40 кг

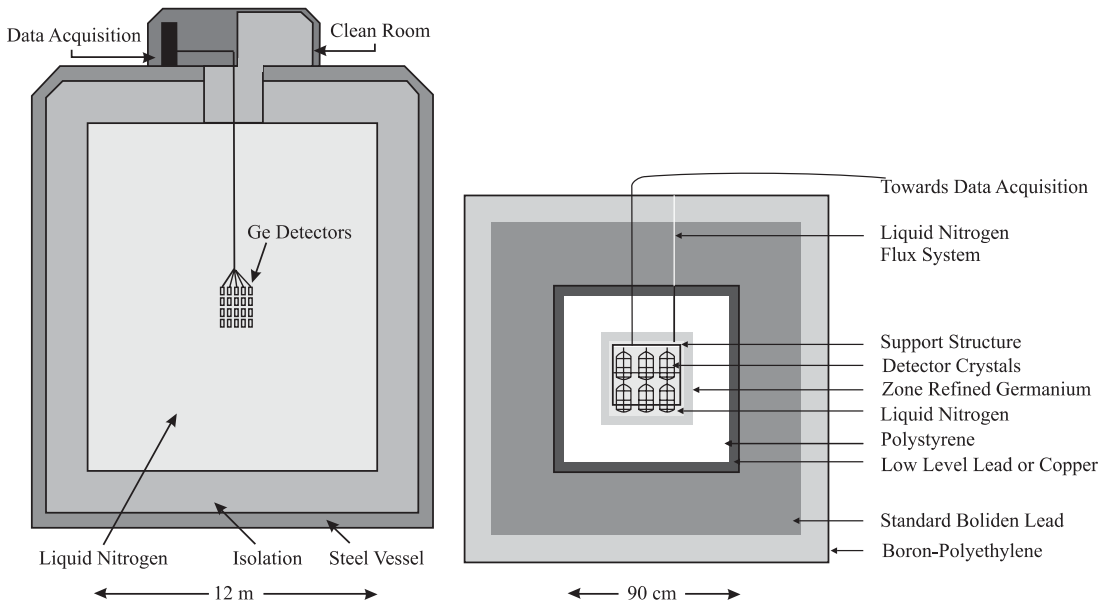


Fig. 2. Left: Scheme of the GENIUS (GERmanium in liquid NItrogen in an UndergrounD Set-up). A block of ultrapure Ge detectors (100 kg of natural Ge to search for dark matter in the first part of the experiment or 1–10 tons of enriched Ge in the second part to register the double beta decay) is situated on a special structure in the centre of a large reservoir filled with liquid nitrogen. The diameter of the «nitrogen» shielding is minimum 12 m. Right: A conceptual scheme of a GENIUS set-up variant (GENIUS-Test Facility [7]). 14 ultrapure Ge detectors, weighing up to 40 kg, are installed in the inner-detecting chamber filled with liquid nitrogen

В результате SUSY позволяет вплотную подойти к решению проблемы темной материи, связанной с возрастом Вселенной и генезисом крупномасштабных структур в ней.

Исследования слабых взаимодействий, свойств нейтрино и поиск проявлений новой физики путем участия в проектах NOMAD, PIBETA, ANCOR, NEMO, FAMILON и др. позволят лаборатории оставаться на магистральном пути современной физики. Еще большие возможности для получения фундаментальных результатов могут открыться, если лаборатория решит приложить свой потенциал, накопленный в области криоген-

ных и высокочистых детекторов, ядерной спектроскопии и т. п., к созданию детектора нового поколения типа GENIUS (GERmanium in liquid NITrogen in an UNDERground SET-up) (рис. 2). Детектор GENIUS [4] будет обладать возможностями для получения уникальных данных сразу в трех важнейших областях неускорительной физики: в физике нейтрино и безнейтринного двойного бета-распада (рис. 3), в проблеме обнаружения частиц галактической темной материи (рис. 1) — и впервые будет регистрировать в реальном времени низкоэнергетические солнечные нейтрино (рис. 4). В Институте Макса Планка (Гейдельберг) уже начата практи-

Рис. 3. Области эффективных масс майорановских нейтрино $m_{ee} = \langle m \rangle$, ожидаемые из различных экспериментов по поиску нейтринных осцилляций (для различных вариантов нейтринных масс и матриц смешивания) в сравнении с современным значением верхней границы $m_{ee} = \langle m \rangle < 0,3$ эВ, полученным в эксперименте Гейдельберг–Москва, и ожидаемыми чувствительностями экспериментов CUORE (и NEMO-3), MOON, EXO и GENIUS

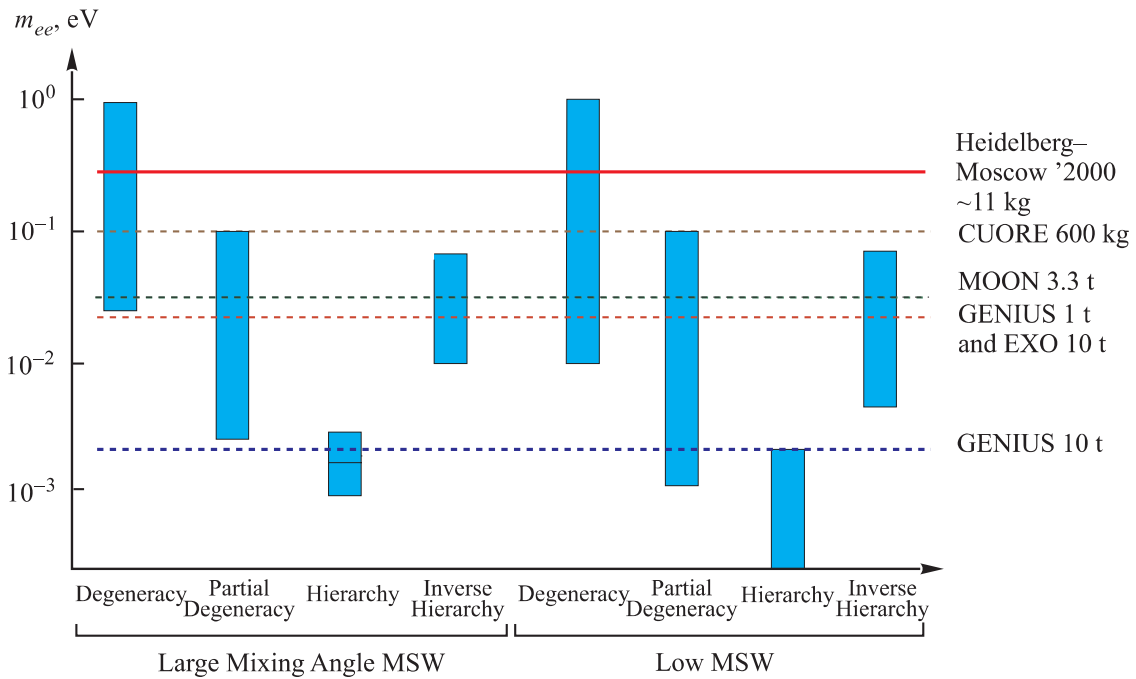


Fig. 3. Regions of Majorana neutrino effective mass $m_{ee} = \langle m \rangle$ expected in different experiments on neutrino oscillation research (for variants of neutrino masses and mixing matrices), in comparison to the modern value of the upper limit of $m_{ee} = \langle m \rangle < 0.3$ eV, obtained in the Heidelberg–Moscow experiment, and expected sensitivities of the CUORE (and NEMO-3), MOON, EXO and GENIUS experiments

in most perspective experimental projects, such as NOMAD, PIBETA, ANCOR, NEMO, FAMILON and others, will allow the Laboratory of Nuclear Problems to be on the highway of research in modern experimental physics. Even larger opportunities to obtain fundamental results may appear in case the Laboratory applies its rich experience in cryogenic and high-purity detectors, nuclear spectroscopy, etc. to the development of a large new-generation detector like GENIUS (Fig. 2). The GENIUS detector [4] will be

able to obtain unique data in three most important fields of the non-accelerator physics — in neutrino physics and neutrinoless double beta decay (Fig. 3), in the discovery of galactic dark matter particles (Fig. 1) and, for the first time, will register in real time low-energy solar neutrino (Fig. 4). Practical preparation work has been started at the test GENIUS set-up (GENIUS-TF, Fig. 2) at the Max Planck Institute of Nuclear Physics.

ческая подготовка к проведению экспериментов на пробной установке GENIUS-TF (рис. 2).

Эксперименты на e^+e^- -коллайдере LEP были нацелены на проверку стандартной модели, на определение масс Z - и W -бозонов, их свойств и т. п. Получен большой спектр прецизионных данных. Задача экспериментов нового поколения на большом адронном коллайдере LHC — поиск физики за рамками стандартной модели,

подтверждение идей великого объединения, суперсимметрии и т. п., установление экспериментальных основ новой теоретической концепции в физике частиц. Отличительной особенностью (и во многом целью) более фундаментальной теории является способность с единых позиций дать согласованное описание всех наблюдаемых в физике частиц как при сверхвысоких, так и при самых низких энергиях. По этой причине, а также

Рис. 4. Чувствительность, в терминах порога по энергии, различных детекторов солнечных нейтрино. В экспериментах GALLEX и SAGE измеряются $pp + {}^7\text{Be} + {}^8\text{B}$ -нейтрино с порогом 0,24 МэВ. Хлорный эксперимент измеряет ${}^7\text{Be} + {}^8\text{B}$ -нейтрино с энергией $E_\nu > 0,817$ МэВ без информации о спектре, времени прихода сигнала и его направлении. Отсутствуют детекторы, способные измерять раздельно pp - и ${}^7\text{Be}$ -нейтрино. GENIUS может быть первым и единственным пока детектором, способным измерять полный поток pp (и ${}^7\text{Be}$)-нейтрино в реальном времени

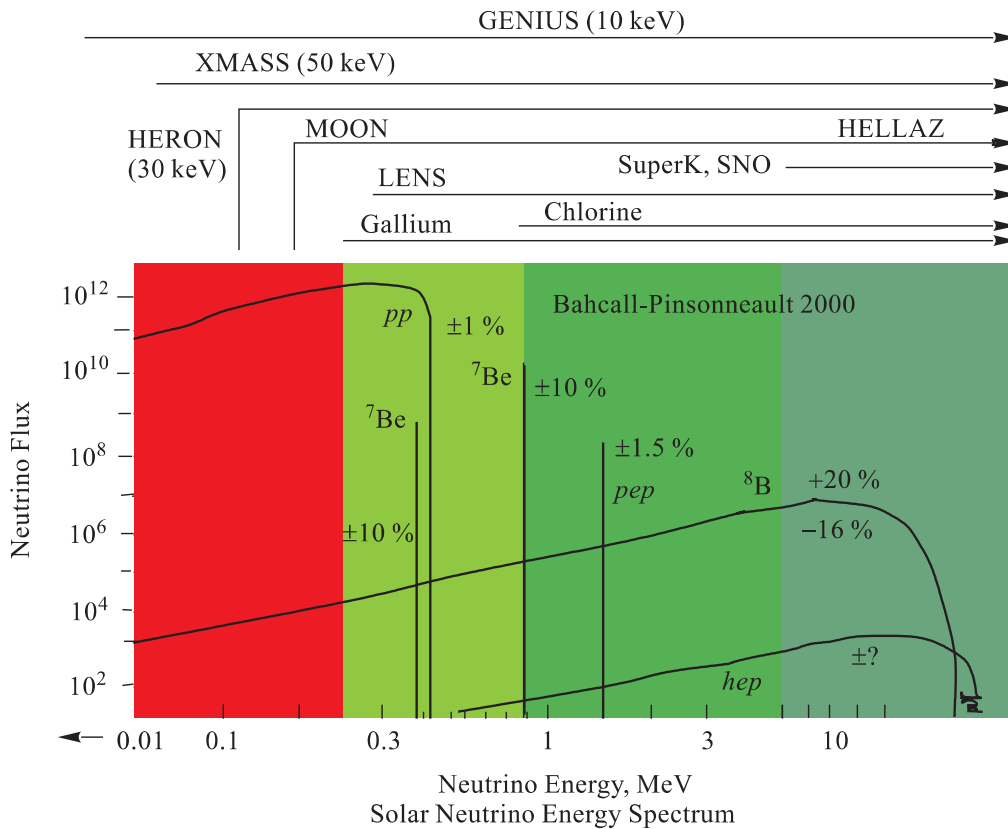


Fig. 4. The sensitivity (thresholds) of the solar neutrino detectors. GALLEX and SAGE measure $pp + {}^7\text{Be} + {}^8\text{B}$ neutrinos with energy threshold 0.24 MeV. The Chlorine experiment measures ${}^7\text{Be}$ and ${}^8\text{B}$ neutrinos with threshold 0.817 MeV. No spectral, time and directional information is available. Only GENIUS could be the first detector which is able to measure the full pp and ${}^7\text{Be}$ neutrino flux in the real time

The experiments at the e^+e^- LEP collider were aimed at the check of the Standard Model, at the determination of the masses of the Z and W bosons, their properties, etc. A large spectrum of precision data has been obtained. The aim of new-generation experiments at the Large Hadron Collid-

er (LHC) is to search for physics beyond the Standard Model, the proof or disproof of the idea of grand unification, supersymmetry, etc., the establishment of the experimental basis of a new theoretical concept in elementary particle physics. A particular peculiarity (and, largely, a purpose) of

из-за возросшей сложности получения надежных физических результатов недостаточно только данных с ускорителей, необходимо одновременно принимать во внимание результаты неускорительных экспериментов и астрофизических наблюдений (в качестве своеобразного «теоретического» триггера).

Исследования по физике частиц высоких энергий всегда были и остаются одной из главных целей сотрудников Лаборатории ядерных проблем. В настоящее время в этом направлении большим коллективом ученых и инженеров ОИЯИ создается грандиозный детектор ATLAS. Этот детектор необходим для проведения экспериментов в области физики элементарных частиц (обнаружение и исследование бозонов Хиггса, изучение механизмов образования и распада топ-кварков, исследование физики В-кварков, обнаружение суперсимметричных частиц и т. д.) при сверхвысоких энергиях LHC. Во многом детектор ATLAS — прибор для исследования именно редких процессов (обусловленных слабым взаимодействием) и поиска явлений новой физики, а это именно та область, где нужно принимать во внимание прецизионные низкоэнергетические данные, источником которых будет прибор типа GENIUS.

Таким образом, в Лаборатории ядерных проблем в настоящее время уже созданы и продолжают создаваться условия для проведения и анализа результатов фундаментальных исследований в области физики элементарных частиц как при сверхвысоких, так и при низких энергиях. Это отвечающее велению времени сочетание низкоэнергетических фундаментальных исследований и фундаментальных исследований при ультравысоких энергиях даст возможность Лаборатории ядерных проблем занимать достойное место в решении ключевых вопросов современной физики частиц и астрофизики.

Список литературы

1. *Pontecorvo B. M.* // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 549; ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 247.
2. *Alexeev G. D. et al.* // Phys. Part. Nucl., Lett. 2000. No. 1[98]. P. 5.
3. *Arnold R. et al.* // Nucl. Phys. 2000. V. A 678. P. 341.
4. *Klapdor-Kleingrothaus H. V.* // Phys. At. Nucl. 1998. V. 61. P. 967.
5. *Ellis J., Ferstl A., Olive K.A.* // Phys. Lett. 2000. V. B 481. P. 304–314.
6. *Bednyakov V. A., Klapdor-Kleingrothaus H. V.* // Phys. Rev. 2000. V. D 62. P. 043524.
7. *Klapdor-Kleingrothaus H. V.* // Phys. Part. Nucl., Lett. 2001. No. 1[104]. P. 20.

such a more fundamental theory is its ability to formulate on a unified basis a coordinated description of all observed particles in physics, either at ultrahigh or at the lowest energies. For this reason and also due to the growing complexity of reliable physics data acquisition, the data from the accelerators are not sufficient. It is necessary to take into account the results of non-accelerator experiments and astrophysics data (as a specified «theoretical» trigger).

The research in high-energy particle physics has always been one of the main targets at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems. A large detector ATLAS is being developed at present along this line under the guidance of the Laboratory Directorate by the JINR community of scientists and engineers. This detector will be used to conduct experiments in elementary particle physics at high LHC energies (discovery and study of Higgs bosons, study of production and decay mechanisms of top quarks, B-quark physics, discovery of supersymmetric particles, etc.). In many aspects the ATLAS detector is a set-up intended to study rare processes (stipulated by weak interaction) and search for new physics phenomena, especially in that region where the precision low-energy data should be taken into account, whose source will be a facility of the GENIUS type.

Thus, at the present time, the conditions have been and are being established at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems to conduct experiments and analyze with high quality the results of fundamental research in elementary particle physics at ultrahigh and low energies. This adequate for our time combination of low-energy fundamental research and fundamental research at ultrahigh energies places the Dzhelapov Laboratory staff in a deserved position in the solution of key items of modern particle physics and astrophysics.

References

1. *Pontecorvo B. M.* // JETP. 1957. V. 33. P. 549; JETP. 1958. V. 34. P. 247.
2. *Alexeev G. D. et al.* // Phys. Part. Nucl., Lett. 2000. No. 1[98]. P. 5.
3. *Arnold R. et al.* // Nucl. Phys. 2000. V. A 678. P. 341.
4. *Klapdor-Kleingrothaus H. V.* // Phys. At. Nucl. 1998. V. 61. P. 967.
5. *Ellis J., Ferstl A., Olive K.A.* // Phys. Lett. 2000. V. B 481. P. 304–314.
6. *Bednyakov V. A., Klapdor-Kleingrothaus H. V.* // Phys. Rev. 2000. V. D 62. P. 043524.
7. *Klapdor-Kleingrothaus H. V.* // Phys. Part. Nucl., Lett. 2001. No. 1[104]. P. 20.