

Д. В. Пешехонов

Поиск темной материи в эксперименте NA64

На протяжении всей истории современной цивилизации философы размышляли о природе материи и ее формах. В V в. до н.э. Демокрит был убежден, что мир состоит из фундаментальных и неделимых строительных блоков, бесконечных по числу, — атомов. Космологическая модель Аристотеля доминировала на протяжении Средневековья, утверждая, что Земля является центром Вселенной и не существует невидимых и неизвестных форм материи. Наблюдения Галилея, проведенные с помощью телескопа, показали, что во Вселенной есть объекты, которые могут быть открыты при внедрении новых технологий. Опубликовав в 1687 г. трактат «Математические начала натуральной философии», И.Ньютон дал исследователям инструмент, позволяющий определять гравитационную массу астрономических тел путем измерения их динамических свойств. Ф.Бессель в 1844 г. был первым, кто предположил, что наблюдаемое собственное движение Сириуса и Прокциона может быть объяснено наличием ненаблюдаемых звезд-компаньонов, влияющих на

них гравитационно. В 1911 г. А.Пуанкаре писал: «Есть звезды, которые мы видим, потому что они светят; но не могут ли быть темные звезды, которые вращаются в межзвездном пространстве и существование которых может долго оставаться неизвестным?». В 1933 г. Ф.Цвикки, изучая красные смещения скоплений галактик, опубликованные Э.Хабблом и М.Хьюмасоном, сделал вывод о том, что темная материя присутствует во Вселенной в гораздо большем количестве, чем видимая. На сегодня считается, что менее 20 % материи во Вселенной является барионной.

Словосочетание «темная материя» в настоящее время используется в качестве названия для особого вида частиц, в отличие от раннего, в котором слово «темный» означало слишком слабый, чтобы быть обнаруженным с помощью доступных астрономических приборов. Сегодня большая часть научного сообщества принимает гипотезу, что темная материя не является барионной. Единственным жизнеспособным кандидатом на роль темной материи в Стандартной

D. V. Peshekhonov

Search for Dark Matter at NA64

Throughout the history of modern civilization, philosophers have been speculating on the nature of matter and its forms. In the 5th century BC, Democritus was convinced that our world is made up of fundamental and indivisible building blocks, called atoms, and that these atoms were infinite in number. The cosmological model of Aristotle was dominant discourse throughout the Middle Ages. It stated that the Earth was the centre of the immutable Universe and denied the existence of invisible or unknown forms of matter. Galileo's observations made with the help of a telescope showed that there are objects in the Universe that can be discovered with the introduction of new technologies. I. Newton provided scientists with a tool when he published his treatise "Mathematical Principles of Natural Philosophy" in 1687. It allowed them to determine the gravitational mass of astronomical bodies by measuring their dynamical properties. In 1844,

F. Bessel was the first to assume that the observed proper motion of stars Sirius and Procyon could be explained by the presence of nonobservable companion stars affecting them gravitationally. In 1911, H. Poincaré wrote: "There are the stars which we see because they shine, but might there not be obscure stars which circulate in the interstellar space and whose existence might long remain unknown?" In 1933, while studying the redshifts of galaxy clusters published by E. Hubble and M. Humason, F. Zwicky concluded that the amount of dark matter in the Universe is much greater than the amount of visible matter. To date, less than 20% of matter in the Universe is believed to be baryonic matter.

Nowadays, the phrase "dark matter" is more frequently used as the name, a proper noun, of particles species accounting for the bulk of our Universe's matter density, unlike the early one, in which the word "dark"

модели (СМ) являются так называемые стерильные нейтрино, которые в зависимости от массы могут быть холодными ($m \gg \text{кэВ}$) или теплыми ($m \sim \text{кэВ}$), в то время как нейтрино СМ, являясь горячими, не могут объяснить наблюдаемую структуру Вселенной.

Популярной является гипотеза о наличии новой физики в электрослабом масштабе, в которой кандидатом на роль темной материи являются массивные нерелятивистские элементарные частицы — WIMPs. Поиск WIMP ведется в экспериментах по их прямому обнаружению рядом исследовательских групп с использованием сверхчувствительной аппаратуры, криогенных твердотельных и жидких массивных, как правило ксеноновых, мишеней.

Другое направление связано с моделью *суперсимметрии*, в которой предполагается, что каждому фермиону отвечает бозон с такими же квантовыми числами, что предсказывает появление нескольких новых электрически нейтральных частиц, включая суперпартнеров нейтрино, Z-бозона, фотона, гравитона. В случае существования стабильных суперпартнеров они могли бы играть существенную роль в разрешении проблемы темной материи. В рамках этой парадигмы на выведенных вторичных пучках ускорителя SPS ЦЕРН (Женева) была принята к реализации програм-

ма исследований по поиску легкой темной материи — эксперимент NA64.

Группа ОИЯИ, участвующая в эксперименте NA64, отвечает за разработку, создание и эксплуатацию координатных трековых детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок, создание математического обеспечения для их онлайн-мониторинга, моделирования и реконструкции, участвует в анализе экспериментальных данных по поиску темного фотона, а также отвечает за систему сбора данных с установки (DAQ).

В сеансах 2016–2018 гг. на электронном пучке ускорителя SPS ЦЕРН проводился поиск сигнала рождения и распада темного фотона A' и легкой темной материи [1]. Суммарная статистика составила $\sim 4 \cdot 10^{11}$ событий. В 2017–2018 гг. сеансы также частично были посвящены поиску гипотетического бозона с массой 16,7 МэВ [2], существование которого могло бы объяснить результат по аномальному рождению e^+e^- -пар в распаде возбужденного состояния ${}^8\text{Be}^*$ в стабильное, полученный в эксперименте АТОМКИ. Было набрано $8,4 \cdot 10^{10}$ событий. Эти данные позволили существенно увеличить ограничения на вероятность его рождения, дополнив результаты других исследовательских групп (см. рисунок).

meant too faint to be detected using available astronomical instruments. Today, most of the scientific community accepts the hypothesis that dark matter is not baryonic. The only viable candidates for the role of dark matter in the Standard Model (SM) are the so-called sterile neutrinos. Depending on their mass, such sterile neutrinos could be either cold ($m \gg \text{keV}$) or warm ($m \sim \text{keV}$), while SM neutrinos, being hot, cannot explain the observed structure of the Universe.

There is a popular hypothesis about the existence of new physics at the electroweak scale, in which the candidates for the role of dark matter are massive nonrelativistic elementary particles, i.e., weakly interacting massive particles (WIMPs). The search for WIMPs is performed in direct detection experiments by a number of research groups using ultra-sensitive equipment, cryogenic solid-state and liquid massive (usually xenon) targets.

Another field is associated with the *supersymmetry* model. It assumes that each fermion has a corresponding boson with the same quantum numbers, which predicts the existence of several new electrically neutral and nonstrongly interacting particles, including superpartners of neutrinos, Z bosons, photons, gravitons. If any of

superpartners are stable, they could play a significant role in solving the problem of dark matter. Within the framework of this paradigm, a programme on searching for light dark matter (LDM), i.e., the NA64 experiment, was approved for implementation at extracted secondary beams of the CERN SPS accelerator (Geneva).

The JINR group taking part in the NA64 experiment is responsible for the development, construction and commissioning of coordinate detectors based on thin-walled straw tubes. It participates in the development of the software system for their online monitoring, simulation and reconstruction, and takes part in the reconstruction and analysis of data aimed at searching for the dark photon. The group is also responsible for the DAQ setup.

In the 2016–2018 runs, a search for a signal of the production and decay of the dark photon A' and light dark matter was carried out at the CERN SPS electron beam [1]. In total, $\sim 4 \cdot 10^{11}$ events were collected. In 2017–2018, the runs were also partially aimed at searching for a hypothetical 16.7-MeV boson [2]. Its existence could explain the result of the anomalous production of e^+e^- pairs observed in the excited ${}^8\text{Be}^*$ nucleus decays obtained in the АТОМКИ experiment. $8.4 \cdot 10^{10}$ events were collected.

По результатам 2019 г. эксперимент NA64 был отмечен генеральным директором ЦЕРН как один из наиболее интересных и многообещающих с научной точки зрения проектов, реализуемых в лаборатории. В 2020 г. руководством ЦЕРН было принято решение о выделении эксперименту постоянного места на вторичном электронном канале ускорителя SPS, PPE114 (H4B), и о расширении программы исследований — создании установки и наборе данных на

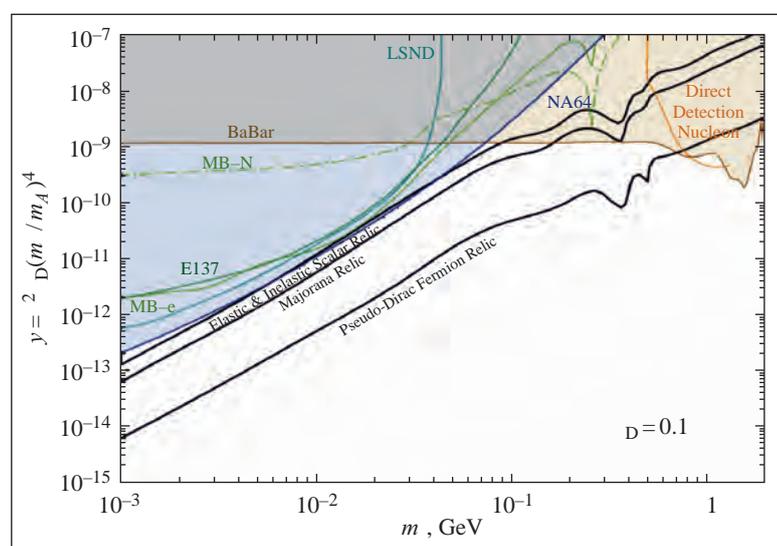
мюонном пучке ускорителя, которые могли бы внести существенный вклад в разрешение $(g-2)_\mu$ проблемы аномального магнитного момента мюона [3].

В период остановки ускорителей ЦЕРН в 2020–2021 гг. были изготовлены новые детекторы для работы как на электронном, так и на мюонном пучках ускорителя, в том числе детектор синхротронного излучения (SRD), вольфрамовый калориметр-мишень, электромагнитный и адронный калориметры, veto-ка-

лориметры и калориметр нулевого угла, новые трековые детекторы из строу-трубок большой площади. Модернизация установки была проведена при поддержке целевого гранта Российской Федерации и при финансовом участии ОИЯИ.

В 2021 г. после возобновления работы ускорителей ЦЕРН эксперимент NA64 был продолжен, на пучке электронов было зарегистрировано $7 \cdot 10^{10}$ событий. А в период с 28 октября по 18 ноября состоялся тестовый сеанс на мюонном пучке ускорителя SPS, в ходе которого группой ОИЯИ были введены в эксплуатацию новые станции строу-детекторов большого размера, работающие

calorimeters, veto calorimeters and a zero-degree calorimeter, and new tracking detectors made of large-area straw tubes. This upgrade was supported by the RF earmarked grant and financial participation of JINR.



Current limits set by NA64 and other experiments on the LDM mass. With $3 \cdot 10^{11}$, NA64 suppressed bounds from the LSND, MiniBooNE and SLAC experiments, obtained with $\sim 10^{22}$, 10^{20} pot and 10^{19} eot, respectively

These data allowed significant increase of the limits on the probability of its production, complementing the results of other research groups (see the figure).

According to the results of 2019, CERN Director-General noted the NA64 experiment as one of the most interesting and scientifically promising projects being implemented at the Laboratory. In 2020, according to the CERN Directorate's decision, the experiment obtained a permanent allocated place at the SPS secondary electron channel, PPE114 (H4B). Also, the research programme was expanded by constructing a setup and taking data with muon beams. This could contribute to resolving the $(g-2)_\mu$ anomaly [3].

During CERN's accelerators shutdown in 2020–2021, new detectors were constructed for operating at both electron and muon beams of the SPS: the SRD detector, a target tungsten calorimeter, electromagnetic and hadron

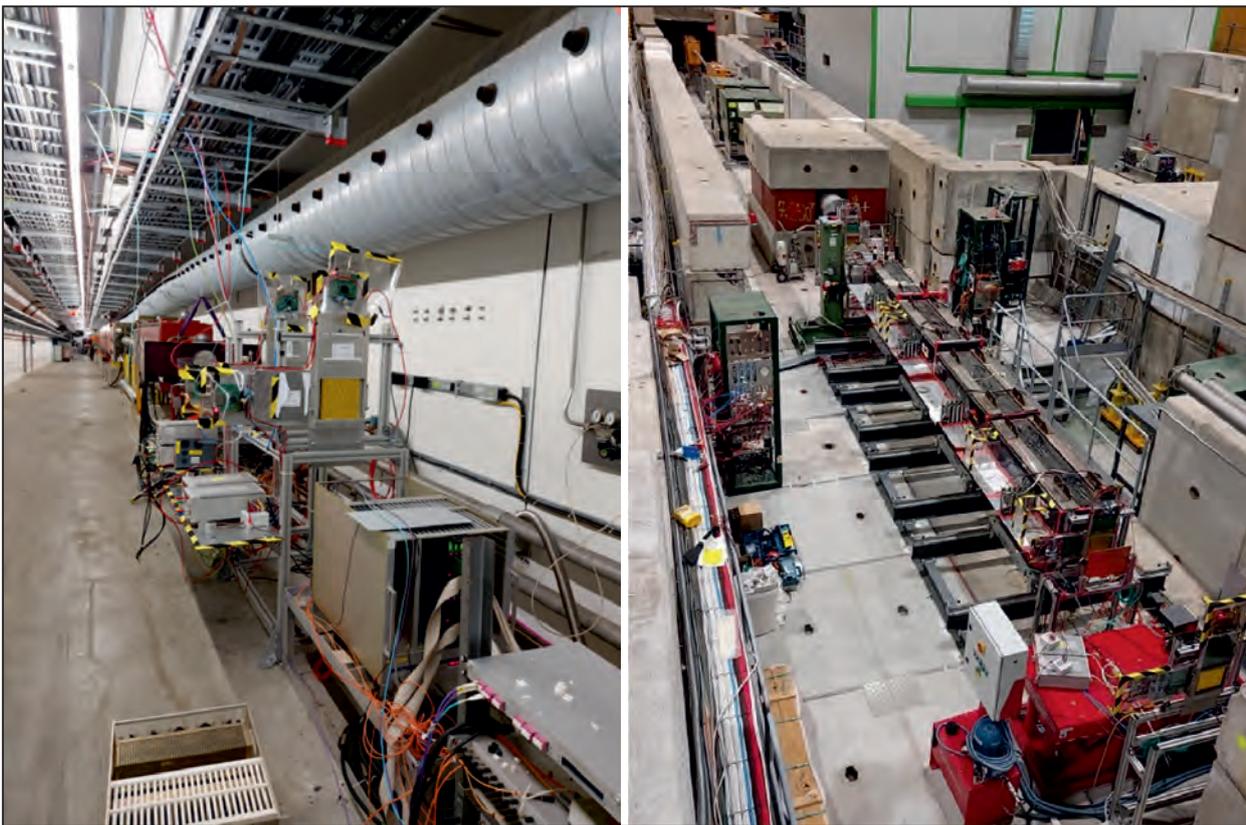
In 2021, after CERN started up its accelerators, the NA64 experiment was continued. $7 \cdot 10^{10}$ events were registered at the electron beam. From 28 October to 18 November, a test run was performed at the SPS muon beam. During the run, the JINR group commissioned new large straw detector stations operating together with hadron calorimeters. The analysis of the obtained results has shown that for effective operation of the setup, its tracking system, based on micromegas and GEM detectors, should be supplied with several detector stations of a larger effective size. They should be placed on a base about 100 m from the input into the setup channel to its target. For implementing this, straw detectors with an operating area of 20×20 cm made for operation at the electron beam were offered. In April 2022, the JINR group prepared the gas and fiber-optic infrastructure required for the implementation of this proposal, as well as a power

совместно с адронными калориметрами. Анализ полученных результатов тестового сеанса показал, что для эффективной работы установки ее трековую систему, построенную на базе детекторов micromegas и GEM, необходимо дополнить несколькими станциями детекторов большего эффективного размера, разместив их на базе около 100 м от входа в канал установки до ее мишени. Было предложено использовать для этого часть строу-детекторов размером 20×20 см, созданных для работы на электронном пучке. В апреле 2022 г. группой сотрудников ОИЯИ на канале M2 была создана

на требуемая для реализации данного предложения газовая и опτικο-волоконная инфраструктура, подготовлена система питания, проведен монтаж и включение в систему сбора данных установки дополнительных четырех строу-станций.

Трехнедельный сеанс эксперимента NA64 на мюонном пучке в канале M2 SPS завершился 16 мая. Несмотря на проблемы с магнитной системой ускорителя SPS, устранение которых привело к потере более половины времени набора данных, было набрано $\sim 4 \cdot 10^{10}$ событий, что составило около 80% от плани-

ЦЕРН (Женева). Установка NA64 на мюонном (слева) и электронном (справа) каналах ускорителя SPS



CERN (Geneva). The NA64 setup at the muon (left) and electron (right) lines of the SPS accelerator

supply system, and installed and implemented additional four straw stations to the DAQ setup.

On 16 May, a three-week NA64 run at the muon beam (SPS M2 line) was completed. There were some difficulties with the SPS magnet system. While dealing with them, the collaboration lost more than half of data taking time. Nevertheless, $\sim 4 \cdot 10^{10}$ events were collected, which is about 80% of the planned statistics. The setup operated stably, the upgraded tracking system based on Dubna straw detectors allowed solving previously identified problems, controlling the beam structure and optimizing the trigger.

In the second half of July, a ten-week NA64 run was started at the electron beam. Data taking on the search for light dark matter in the invisible mode of the dark photon A' decay will be continued. The international team of the collaboration, representing the Americas, EU countries, JINR leading institutes and universities of Russia and Belarus, is actively engaged in processing the data taken and preparing for the upcoming run.

руемой статистики. Установка отработала стабильно, модернизированная трековая система на основе строу-детекторов из Дубны позволила устранить выявленные ранее проблемы, контролировать структуру пучка и оптимизировать триггер.

Во второй половине июля был начат десятидневный сеанс NA64 на пучке электронов. Будет продолжен набор статистики по поиску легкой темной материи в невидимой моде распада темного фотона. Интернациональный коллектив коллаборации, представляющий американский континент, страны ЕС, ОИЯИ, ведущие институты и университеты России, Белоруссии, активно занят обработкой полученных данных и подготовкой к предстоящему сеансу.

Список литературы / References

1. *NA64 Collab.* Improved Exclusion Limit for Light Dark Matter from e^+e^- Annihilation in NA64 // *Phys. Rev. D.* 2021. V. 104. P. L091701.
2. *NA64 Collab.* Search for Pseudoscalar Bosons Decaying into e^+e^- Pairs // *Phys. Rev. D.* 2021. V. 104. P. L111102.
3. *NA64 Collab.* Probing the Explanation of the Muon ($g-2$) Anomaly and Thermal Light Dark Matter with the Semi-Visible Dark Photon Channel. arXiv: 2107.02021 [hep-ex].