

*С. Н. Гниненко, Д. В. Пешехонов*

## Поиск темной материи в эксперименте NA64

В настоящее время есть серьезные основания предполагать, что Стандартная модель (СМ) не является полной и что в природе есть частицы, не описываемые в ее рамках. Причиной являются астрономические наблюдения, исходя из которых мы достоверно знаем, что известная нам материя составляет лишь несколько процентов от общей «массы» вещества во Вселенной. Недостающая «масса» объясняется двумя источниками: присутствием неизвестной нам формы энергии, получившей название «темная энергия», природа которой на сегодня является загадкой, и неизвестными нейтральными частицами, которые ответственны за массу, примерно в 5 раз большую приходящейся на обычное вещество. Эти частицы образуют то, что называется «темной материей», про них достоверно известно лишь то, что они массивны и взаимодействуют с обычным веществом крайне слабо, посредством гравитации, что существенно затрудняет их обнаружение.

Основными кандидатами на роль «темной материи» являются так называемые WIMP (Weakly

Interacting Massive Particles) — массивные частицы, в десятки раз тяжелее протона, участвующие в гравитационном и слабом взаимодействиях. Эксперименты по их регистрации в основном проводятся в подземных лабораториях, в условиях максимального подавления фона, с помощью сверхчувствительных, работающих, как правило, при низких температурах детекторов. Непрямой способ обнаружения WIMP не менее популярен и заключается в поиске и регистрации нейтринно высоких энергий, которые должны образовываться при аннигиляции WIMP в Солнце. Это одна из задач таких нейтринных детекторов, как IceCube на Южном полюсе и Байкальский глубоководный нейтринный телескоп, — в создании последнего активно участвуют физики из ОИЯИ.

В последние годы развиваются модели, которые предполагают, что темная материя является частью так называемого скрытого сектора. Скрытый сектор, согласно, например, определению, данному нобелевским лауреатом Ф. Вилчеком, представляет собой совокуп-

*S. N. Gninenko, D. V. Peshekhonov*

## Search of the Dark Matter in the NA64 Experiment

Currently, there are serious arguments to assume that the Standard Model (SM) is not complete and there are some particles in Nature that are not described within it. It comes from astronomical observations which are telling us that the known matter composes only a few percent of the overall “mass” of matter in the Universe. Theoreticians propose an explanation of the missing “mass” by two sources: the existence of an unknown form of the energy called “dark energy”, the nature of which today is a puzzle, and unknown neutral particles that are responsible for the mass of about 5 times greater than that associated with the ordinary matter. These particles form the so-called “dark matter”, they are massive and interact, by means of gravity, with the ordinary matter very weakly which significantly complicates their discovery.

The main candidates for “dark matter” are the so-called WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) — massive particles, at least ten times heavier than the proton, which are involved in gravitational and super-weak interactions. Experiments on their registration are mainly carried out in underground laboratories, under conditions of maximum background suppression, with the help of ultra-sensitive detectors operating, as a rule, at low temperatures. Indirect methods of WIMP detection are also popular. One of them consists in search and registration of high-energy neutrinos which should be formed during WIMP annihilation in the Sun. This is one of the objectives of such neutrino detectors as IceCube at the South Pole and Baikal deep-water neutrino telescope. Physicists

ность частиц и полей, которые являются синглетами относительно калибровочной группы СМ и могут взаимодействовать с нашей материей через определенные порталы. Большую популярность в последнее время приобрели модели, мотивирующие существование векторного портала, т.е. новой векторной частицы, обычно называемой скрытым или темным фотоном, переносящей взаимодействие между обычной и темной материей. Открытие нового, дополнительного к гравитации взаимодействия с темной материей, безусловно, было бы революционным событием в космологии и физике частиц. Замечательным фактом является также то, что расширенная СМ, включающая эти новые частицы и взаимодействия, остается перенормируемой, а область масс темного фотона и констант связи с легкой темной материей доступна для поисков

на современных ускорителях [1]. Темный фотон, в отличие от частиц темной материи, является нестабильной частицей, которая в зависимости от ее массы может распадаться либо на более легкие частицы СМ (например  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ -пары), либо на частицы темной материи. В последнем случае поиск таких частиц весьма затруднителен, так как распад является невидимым.

Эксперимент NA64, основной задачей которого является поиск частиц скрытого сектора во взаимодействиях электронов, мюонов или адронов высокой энергии с активной мишенью, был предложен в ЦЕРН в 2014 г. В 2016 г. после серии тестов, подтвердивших методику измерений, он был утвержден.

Установка NA64 (рис. 1), предназначенная для поисков на электронном пучке высокой энергии, представляет собой полностью герметичный детектор,

Рис 1. Схема установки NA64 по поиску темного фотона в невидимой моде распада

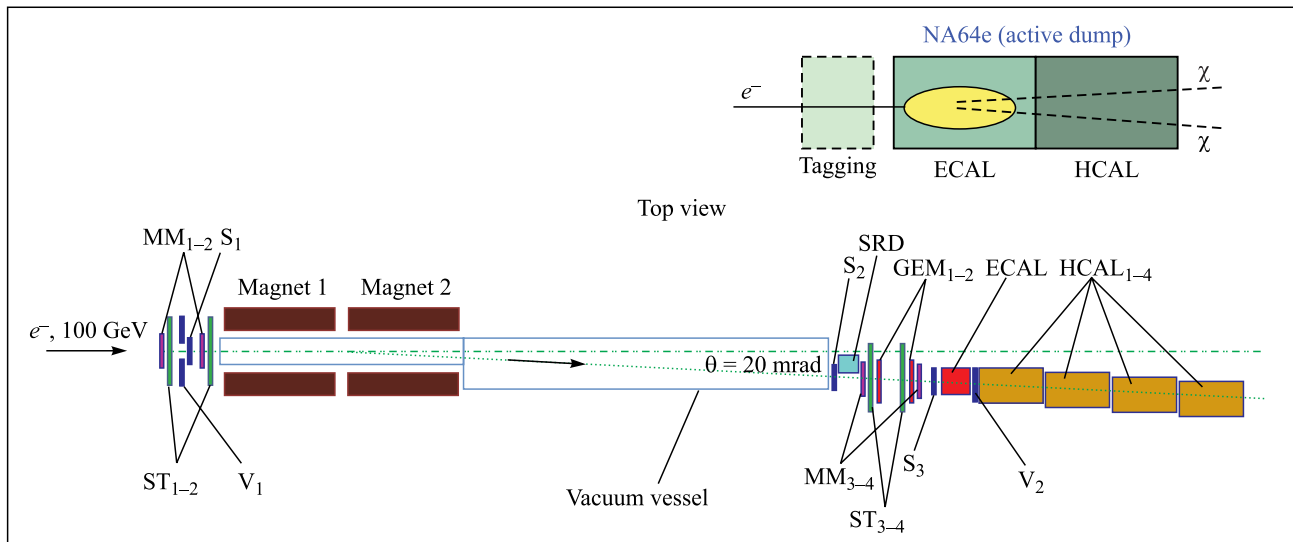


Fig. 1. Scheme of the NA64 facility to search for a dark photon in invisible decay mode

from JINR are actively involved in the development of the latter.

In recent years, models have been developed assuming that the dark matter is part of the so-called hidden sector. For instance, according to the Nobel prize winner F. Wilczek, the hidden sector is a set of particles and fields, which are singlets with respect to the SM gauge group and which can interact with our matter through certain portals. Models that motivate the existence of a vector portal, i.e., a new vector particle, usually called a hidden or dark photon, transferring the interaction between the ordinary and dark matter, have recently become very popular. The discovery of a new interaction (additional to gravity) with the dark matter would certainly be a revolutionary event in cosmology and particle physics. It is also a remarkable fact that the expanded SM, which includes these new par-

ticles and interactions, remains renormalized, and the mass region of the dark photon and the light dark matter coupling constants is accessible in searches at modern accelerators [1]. The dark photon, unlike dark matter particles, is an unstable particle which, depending on its mass, can decay into either lighter SM particles (e.g.,  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  pairs) or dark matter particles. In the latter case, the search for such particles is very difficult because the decay is invisible.

The NA64 experiment, the main objective of which is to search for particles of the hidden sector in the interactions of electrons, muons or hadrons of high energy with an active target, was proposed at CERN in 2014. In 2016 it was approved after a series of tests that confirmed the measurement methodology.

расположенный на канале H4 ускорителя SPS ЦЕРН. Идея измерения основана на полном поглощении энергии сбрасываемого на активную мишень установки пучка (active beam dump) и использовании техники поиска и регистрации событий с недостающей энергией (missing energy technique), уносимой частицами темной материи, которые и являются кандидатами на сигнал. Цель реализуемой в настоящее время экспериментальной программы состоит в поиске темного фотона ( $A'$ ) с массой  $m_{A'} \leq 1$  ГэВ, который может родиться в реакции  $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$  в рассеянии электронов высокой энергии на ядрах ( $A, Z$ ) и далее распасться на  $e^+e^-$ -пару (так называемая видимая мода) либо на пару более легких частиц темной материи  $\chi$  (невидимая мода). Вероятность этого процесса оценивается как  $\leq 10^{-12}$ . Проведение измерений на таком высоком уровне чувствительности требует использования высокоинтенсивного пучка и создания системы «мечения» налетающих частиц для уменьшения фона. Работы, проведенные в ЦЕРН по оптимизации канала H4, позволили довести интенсивность пучка электронов до  $\sim 10^7$   $e^-$ /сброс при менее 1% примеси других заряженных частиц. Это даст возможность набрать статистику  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  событий. В качестве системы мечения используется регистрация синхротронного излу-

чения электронов в сильном магнитном поле, которое позволило дополнительно подавить примесь адронов в пучке более чем на 4 порядка.

В сеансах 2016–2018 гг. установка NA64 набирала данные по поиску сигнала в невидимой моде распада  $A'$ . Набор проводился на пучке электронов с интенсивностью до  $10^7$  частиц за сброс, длительностью 4,8 с при энергии 100 ГэВ.

В качестве мишени используется электромагнитный калориметр ECAL. Расположенная до него передняя часть установки, задачей которой является определение параметров налетающих частиц, включает пучковые и трековые детекторы, магнитную структуру, вакуумную трубу и детектор синхротронного излучения SRD. Электромагнитный калориметр ECAL длиной 40 радиационных длин ( $X_0$ ) является активной мишенью и предназначен для измерения и полного поглощения энергии налетающего электрона. За ним расположен полностью герметичный адронный калориметр HCAL, состоящий из четырех модулей, суммарно составляющих 30 ядерных длин, задачей которого является детектирование энергии мюонов и вторичных адронов, родившихся при взаимодействии электрона с веществом мишени.

The NA64 facility (Fig. 1), situated at a high-energy electron beam, is a completely hermetic detector located at the H4 channel of the SPS accelerator at CERN. The idea of measurement is based on the complete absorption of the beam energy released in the active target of the setup (active beam dump) and the use of the technique for search and registration of events with the missing energy that is carried away by dark matter particles, which are the candidates for the signal (missing energy technique). The objective of the currently implemented experimental programme is to search for a dark photon ( $A'$ ) with a mass  $m_{A'} \leq 1$  GeV which can be produced in the reaction  $e^-Z \rightarrow e^-ZA'$  in the scattering of high-energy electrons on the nuclei ( $A, Z$ ) and can then decay into an  $e^+e^-$  pair (the so-called visible mode) or a pair of lighter dark matter particles  $\chi$  (invisible mode). The probability of this process is estimated as low as  $\leq 10^{-12}$ . Measurements with such a high level of sensitivity require the use of a high-intensity beam and the development of a system of “tagging” of incoming particles to reduce the background. The work carried out at CERN to optimize the H4 channel made it possible to bring the electron beam intensity to  $\sim 10^7$   $e^-$ /spill with less than 1% impurity of other charged particles.

This will allow collecting the statistics of  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  events. Registration of synchrotron radiation of electrons in a strong magnetic field is used as a tagging system. It additionally suppresses the admixture of hadrons in the beam by more than 4 orders of magnitude.

During the runs in years 2016–2018 the NA64 facility collected data for search of  $A'$  through the invisible decay mode. The data taking was carried out in an electron beam with an intensity of up to  $10^7$  particles per spill with a duration of 4.8 s and particle energy of 100 GeV.

The electromagnetic calorimeter ECAL is used as a target. The forward part of the setup, located in front of it and aimed at determination of incident particles parameters, comprises beam and tracking detectors, magnets, a vacuum tube and a synchrotron radiation detector (SRD). The electromagnetic calorimeter ECAL with a length of 40 radiation lengths ( $X_0$ ) is used as an active target. It measures and fully absorbs the energy of the incident electron. Behind it, a completely hermetic hadron calorimeter HCAL, consisting of four modules (30 nuclear lengths), is located; its task is to measure the energy of muons and secondary hadrons produced in the interaction of the electron with the target.

В трековой системе используются детекторы нескольких типов, такие как Micromegas (ММ), GEM и Straw Tubes (ST). Рис. 2 иллюстрирует, каким образом выделяется искомый сигнал и что он из себя представляет.

В настоящее время обработаны и опубликованы данные 2016 и 2017 гг., суммарная статистика составляет  $\sim 10^{11}$  событий; кандидатов на сигнал, отвечающий сигнатуре темного фотона, не обнаружено

Рис. 2. Слева: экспериментально измеренное распределение потери энергии в электромагнитном и адронном калориметрах после введения всех критериев отбора. Серым цветом показана область, отвечающая регистрации события с рождением темного фотона и его дальнейшим распадом в невидимой моде. Данные сеансов 2016 г. с полной статистикой  $4,3 \cdot 10^{10}$  электронов на мишени. Справа: событие, отвечающее сигнальной области

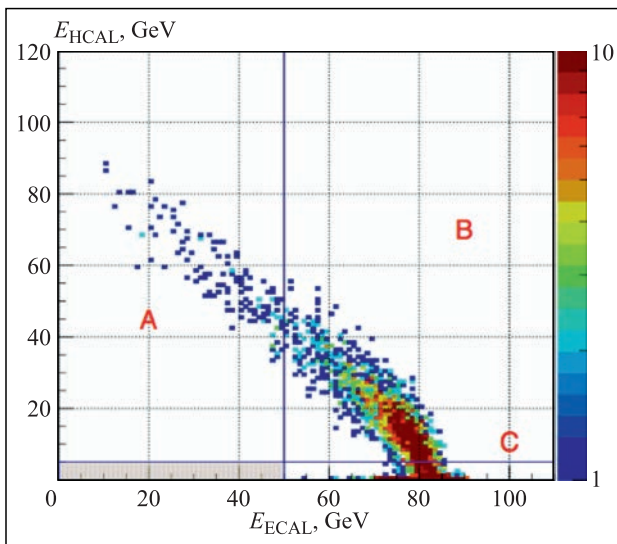


Fig. 2. Left: Experimentally measured energy loss distribution in electromagnetic and hadron calorimeters after all selection criteria have been applied. The gray area shows where events corresponding to production of the dark photon and its further decay in the invisible mode should fall. The points represent data taken during the year 2016 runs with full statistics of  $4.3 \cdot 10^{10}$  electrons per target. Right: the event that corresponds to the signal area

The tracking system consists of several types of detectors such as Micromegas (MM), GEM and Straw Tubes (ST). Figure 2 shows how the signal is generated and what it looks like.

The data from the years 2016 and 2017 have been processed and published, the total statistics is  $\sim 10^{11}$  events, candidates for the signal corresponding to the signature of the dark photon have not been detected [2, 3]. Part of the year 2017 run was devoted to the search for a new hypothetical X boson with a mass of 16.7 MeV, the existence

[2, 3]. Сеанс 2017 г. частично был посвящен поиску гипотетического бозона — темного фотона  $A'$  с массой 16,7 МэВ, 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 [4]. Было набрано  $5,4 \cdot 10^{10}$  событий, гипотетический бозон не обнаружен, полученные данные позволили существенно увеличить ограничение на вероятность его рожде-

Рис. 3. Экспериментальная ситуация с поиском гипотетического бозона массой 16,7 МэВ

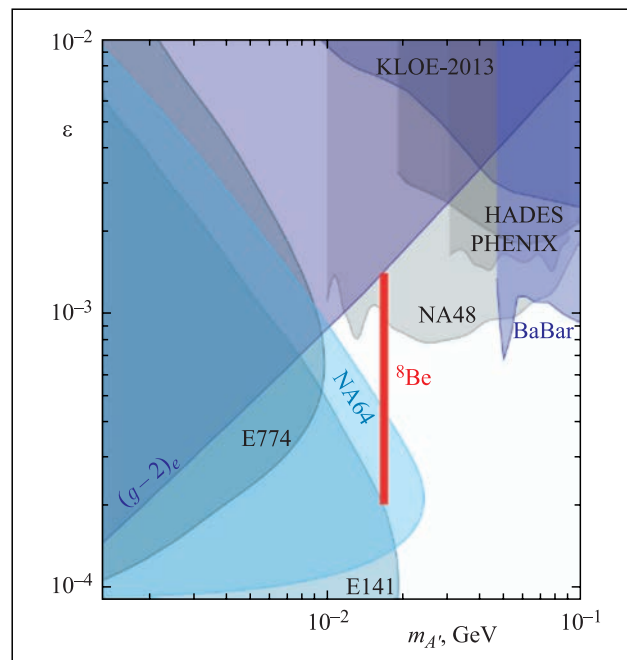


Fig. 3. Experimental situation with search for the hypothetical boson with a mass of 16.7 MeV

of which could explain the result on the anomalous production of  $e^+e^-$  pairs in the decay of the excited state  ${}^8\text{Be}^*$  obtained in the ATOMKI experiment [4].  $5.4 \cdot 10^{10}$  events were taken, the hypothetical boson was not found, the obtained data allowed a significant increase in the limit on the coupling constant of the X boson with an electron, as well as on the mixing parameter of the  $A'$  with the conventional photon [5] (Fig. 3).

During the 2018 run,  $2 \cdot 10^{11}$  events were taken in a search for the invisible mode and  $3 \cdot 10^{10}$  for the visible one, data are being analyzed. In 2019, a permanent experimental zone at CERN on the H4 channel was allocated for the experiment. Preparatory work on its arrangement started. The facility should be upgraded for more efficient operation with high beam intensity and be prepared for the 2021 run, during which it is planned to increase signifi-

ния, дополнив результаты других исследовательских групп [5] (рис. 3).

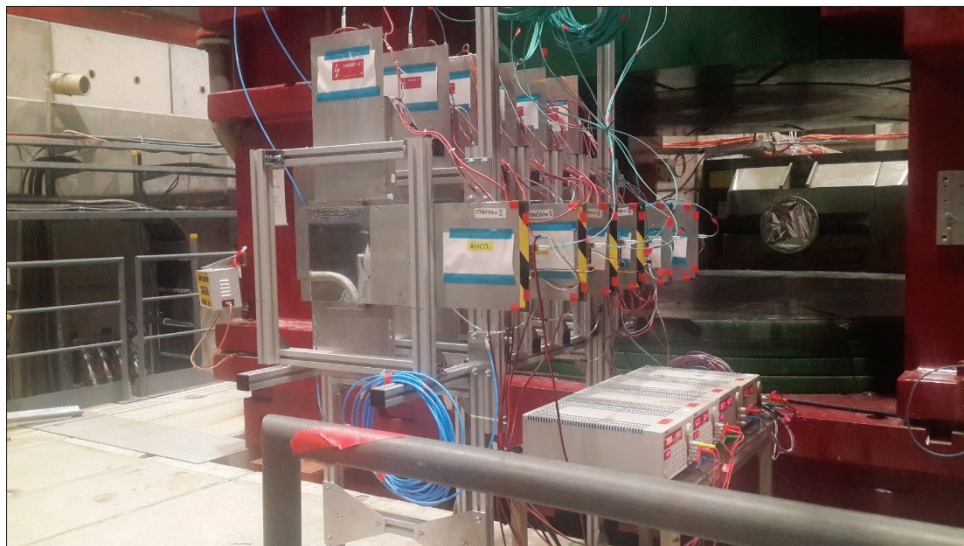
В сеансе 2018 г. было набрано  $2 \cdot 10^{11}$  событий в невидимой и  $3 \cdot 10^{10}$  — в видимой моде, в настоящее время идет анализ данных. В 2019 г. эксперименту в ЦЕРН выделена постоянная экспериментальная зона на канале H4, начаты подготовительные работы по ее обустройству. Установка должна быть модернизирована для более эффективной работы при высокой интенсивности пучка и смонтирована к сеансу 2021 г., в ходе которого планируется существенно увеличить статистику, зарегистрировав более  $5 \cdot 10^{11}$  событий.

Программа исследований NA64 не ограничивается набором данных на пучке электронов. В насто-

ящее время коллаборацией готовится предложение по расширению измерений, включающее работу на мюонном канале ускорителя SPS, что могло бы внести существенный вклад в разрешение  $(g - 2)_\mu$  проблемы аномального магнитного момента мюона. Тестовый сеанс возможен в конце 2021 – начале 2022 г.

Группа ОИЯИ в эксперименте отвечает за дрейфовые камеры из строу-трубок. Обладая высоким быстродействием, хорошим пространственным разрешением и будучи практически прозрачными, не привлекая вещество в пучок, эти детекторы являются одним из ключевых элементов установки.

Дрейфовые камеры строу-трубок на канале H4, сеанс 2018 г.



Drift chambers of straw tubes on the H4 channel, configuration in the 2018 run

cantly the statistics by registering more than  $5 \cdot 10^{11}$  events for further searches for  $A'$  and  $X$ -boson decays.

The NA64 research programme is not limited to the data taking with electron beam. Currently, the collaboration is preparing a proposal for the measurements at the muon channel of the SPS accelerator, which could make a significant contribution to the solution of the  $(g - 2)_\mu$  problem of the anomalous magnetic moment of the muon. A test run might be carried out at the end of 2021 or the beginning of 2022.

In the experiment, the JINR team is responsible for the drift chambers made of straw tubes. These detectors are key elements of the facility as they have a high-speed performance, good spatial resolution and are almost transparent for the passing particles.

## Список литературы / References

1. *Battaglieri M. et al.* US Cosmic Visions: New Ideas in Dark Matter 2017: Community Report. arXiv:1707.04591 [hep-ph].
2. *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.)*. Search for Invisible Decays of Sub-GeV Dark Photons in Missing-Energy Events at the CERN SPS // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118. P. 011802.
3. *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.)*. Search for Vector Mediator of Dark Matter Production in Invisible Decay Mode // *Phys. Rev. D.* 2018. V. 97. P. 072002.
4. *Krasznahorkay A. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 2016. V. 116. P. 042501.
5. *Banerjee D. et al. (NA64 Collab.)*. Search for a New  $X(16.7)$  Boson and Dark Photons in the NA64 Experiment at CERN // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 231802.