

А. В. Гуськов

SPD: как вращается протон?

Несмотря на то, что протон был открыт более столетия назад и кажется нам хорошо изученным, сложно представить другой объект физики частиц, который при кажущейся простоте таит в себе столько загадок. И хотя Нобелевская премия за определение зарядового радиуса протона была вручена еще в 1961 г., загадка протонного радиуса до сих пор волнует умы ученых. Мы имеем пока лишь очень общее понимание того, как масса протона складывается из масс кварков, кинетической энергии ультрарелятивистского движения кварков и глюонов, а также из энергии их взаимодействия. «Спиновый кризис» разразился еще в 1987 г. после открытия незначительности вклада спина кварков в спин протона, но нам до сих пор не вполне ясно, как спин протона складывается из спинов составляющих его кварков и глюонов и их орбитальных моментов.

Для изучения структуры спина протона, а заодно и дейтрона — простейшей ядерной системы — планируется создать установку Spin Physics Detector (SPD) в одной из двух точек пересечения пучков коллайде-

ра NICA. Основная задача проекта SPD — измерение спин-зависимых функций партонных распределений, в том числе и тех, которые учитывают поперечное движение партонов в нуклоне (TMD PDF). Особое внимание будет уделено наименее изученным глюонным распределениям. Для зондирования глюонного содержимого протона и дейтрона будут использованы три дополняющих друг друга процесса: рождение чармониев, рождение *D*-мезонов и рождение прямых фотонов в столкновениях поляризованных пучков протонов, а также дейтронов с энергией в системе центра масс до 27 ГэВ. Отдельная программа была разработана для первой фазы эксперимента, где, как предполагается, энергия и светимость коллайдера будут ниже запланированных. В формировании физической программы эксперимента приняли участие ученые ведущих мировых научных центров России, Европы, США, Японии и Китая.

Проектируемая установка SPD представляет собой классический детектор для коллайдерных экспери-

A. V. Guskov

SPD: How Does the Proton Get Its Spin?

Despite the fact that the proton was discovered more than a century ago and seems well studied to us, it is difficult to imagine another object of particle physics that, despite its apparent simplicity, conceals so many mysteries. Although the Nobel Prize for measuring the proton charge radius was awarded back in 1961, the mystery of the proton radius still excites the minds of scientists. So far, we have only a very general understanding of how the mass of a proton is comprised of the masses of quarks, the kinetic energy of the ultrarelativistic movement of quarks and gluons, as well as the energy of their interaction. The proton spin crisis broke out back in 1987 when it was discovered that the contribution of the spin of quarks to the spin of a proton is insignificant. But it is still not entirely clear to us how the spin of a proton is built up from the spins of its quark and gluon constituents and their orbital momenta.

The Spin Physics Detector (SPD) for studying the spin structure of the proton and also of the deuteron, the simplest nuclear system, is planned to be constructed and placed in one of the two beam collision points of the NICA

collider. The SPD project focuses on measuring spin-dependent parton distribution functions, including those that take into account the transverse movement of partons in the nucleon (TMD PDF). The least studied gluon distributions will be given particular attention. To probe the gluon content of proton and deuteron, three complementary processes will be used: charmonium production, *D*-meson production, and prompt photon production in collisions of polarized protons and deuterons with a centre-of-mass energy of up to 27 GeV. A separate programme was developed for the first stage of the experiment, where it is assumed that the energy and luminosity of the collider will be lower than planned. Scientists from the world's leading scientific centres of Russia, Europe, the USA, Japan and China took part in the development of the physics programme of the experiment.

The SPD facility under design is a classic detector for collider experiments made up of the silicon vertex detector, the tracking system placed within the field of the superconducting solenoid, the electromagnetic calorime-

ментов, включающий в себя кремниевый вершинный детектор, трековую систему в поле сверхпроводящего соленоида, электромагнитный калориметр и мюонную систему. Времяпролетный детектор и детектор на основе аэрогеля будут использоваться для идентификации вторичных частиц. Для контроля светимости и локальной поляриметрии предполагается оснастить SPD парой детекторов пучковых столкновений и калориметров нулевого угла. Система сбора данных будет рассчитана на поток информации с детектора до 20 Гб/с. Для отбора интересующих событий предлага-

ется использовать программный триггер, в том числе основанный и на методах машинного обучения.

Международная коллаборация, сформировавшаяся вокруг проекта SPD, представила сначала концептуальный проект установки, который прошел международную экспертизу и был одобрен Программно-консультативным комитетом по физике частиц, а затем, в начале 2023 г., — первую версию технического проекта SPD. Создание первой фазы детектора SPD было включено в план развития ОИЯИ на текущую семилетку. В рамках подготовки технического проек-



Г. Д. Алексеев (ЛЯП ОИЯИ) и Рехам Ибрагим Сайед (Каирский университет, Египет) с прототипом модуля мюонной системы в тестовой зоне SPD

G. Alekseev (DLNP JINR) and Reham Ibrahim Sayed (Cairo University, Egypt) with a prototype module of the muon system in the SPD test zone

ter, and the muon system. The time-of-flight system and the aerogel detector will be used for identifying secondary particles. A pair of beam-beam counters and zero-degree calorimeters will be responsible for the local polarimetry and luminosity control. The DAQ system will be designed to receive 20 GB/s information flow from the detector.

A programme trigger, including one based on machine learning, will be used for selecting signal events.

At first, the international SPD collaboration presented the SPD CDR, which passed the international examination and was approved by the Programme Advisory Committee for Particle Physics. Then, in early 2023, the

та были созданы и протестированы прототипы большинства детекторных и инфраструктурных подсистем установки. Также была создана и оснащена тестовая зона SPD на выведенных пучках нуклотрона. В настоящее время идет активная работа над обновленной версией технического проекта для представления на январской сессии ПКК по физике частиц. А параллельно с этим уже готовится документация для создания в Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера (Новосибирск) сверхпроводящего соленоида с индукцией поля на оси до 1 Тл.

В настоящее время коллаборация SPD насчитывает почти 300 участников из более чем 30 институтов России, стран Европы, Азии, Африки и Америки, и

интерес к сотрудничеству продолжает расти. В 2023 г. к коллаборации присоединились Институт ядерной физики Республики Казахстан и Томский государственный университет. Рассматриваются заявки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера и Высшей школы экономики. Прошедшая в Дубне в начале сентября конференция DSPIN-2023, посвященная 90-летию выдающегося теоретика А.В.Ефремова, внесшего значимый вклад в понимание спиновой структуры нуклона, показала, что интерес к физике спина не ослабевает. А это значит, что проект SPD имеет реальный шанс дать исчерпывающий ответ на вопрос — как вращается протон.



Дискуссия на полях совещания
коллаборации SPD

Backstage discussion during the SPD
collaboration meeting

collaboration presented the first draft of the SPD TDR. The construction of the SPD first stage was included in the current Seven-Year Plan for the Development of JINR. As part of the TDR preparation, prototypes of most of the detector and infrastructure subsystems of the facility were produced and tested. The SPD test zone at extracted beams from the Nuclotron was also constructed and equipped. Currently, the team is actively working on an updated version of the TDR, which will be presented at the January session of the PAC for Particle Physics. At the same time, documentation is already being prepared for the construction of a superconducting solenoid with up to 1 T field at axis at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS (Novosibirsk).

At present, the SPD collaboration is made up of almost 300 participants from more than 30 institutes of Russia, Europe, Asia, Africa and America, and interest in cooperation continues to grow. In 2023, the Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan and Tomsk State

University joined the collaboration. Applications from the Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS and the Higher School of Economics are being considered. In early September, a workshop on High Energy Spin Physics, DSPIN-23, was held in Dubna. It was dedicated to the 90th anniversary of the birth of the outstanding theorist A. Efremov, who greatly contributed to the understanding of the nucleon spin structure. The workshop showed that there is a growing interest in spin physics, which means that the SPD project has a real chance to give a comprehensive answer to the question of how the proton gets its spin.