

А. П. Чеплаков

Модернизация детектора ATLAS

Обнаружение бозона Хиггса в экспериментах ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРН в 1992 г. открыло новую страницу в истории физики высоких энергий. Теперь надо понять природу обнаруженной частицы: либо это последний «кирпичик» в основании Стандартной модели, либо долгожданное проявление новой физики. Ответ могут дать высокоточные измерения основных параметров обнаруженной частицы и изучение ее распадов. Такого рода исследования требуют накопления значительных объемов экспериментальной информации.

В октябре 2015 г. было объявлено о том, что начинается вторая стадия проекта повышения светимости коллайдера — практическая реализация, связанная с созданием промышленных прототипов различных узлов ускорителя. «Протоны в LHC уже сталкиваются при наивысшей из когда-либо достигнутых энергий», — сказал доктор Р. Хойер, в то время директор ЦЕРН. — В Большом адронном коллайдере при высокой светимости (HL-LHC) столкновения протонов

будут происходить в 10 раз чаще, что увеличит потенциал будущих открытий и трансформирует LHC в инструмент прецизионных измерений на предельном уровне высоких энергий». Каждый год на HL-LHC будет рождаться 15 миллионов бозонов Хиггса — намного больше, чем 1,2 миллиона, полученные на LHC за весь период 2011–2012 гг. [1].

Проект модернизации LHC — очень трудная задача, требующая от исполнителей развития новых инновационных технологий для сверхпроводящих магнитов и других элементов ускорительной цепочки. Не менее сложные задачи встают и перед участниками экспериментов на LHC, ведь детекторы создавались для работы в номинальных условиях LHC и некоторые подсистемы не выдержат возросших радиационных нагрузок на HL-LHC и не смогут обеспечить надежность и высокое качество экспериментальных данных. Необходима соответствующая модернизация экспериментальных установок. Работы по модернизации всего комплекса LHC — и машины, и детекторов — плани-

A. P. Cheplakov

Upgrade of the ATLAS Detector

The discovery of the Higgs boson in the ATLAS and CMS experiments at the Large Hadron Collider, LHC, at CERN in 1992 opened a new page in the history of High Energy Physics. Now one has to understand the nature of the detected particles — either it is the last “brick” at the base of the Standard Model, or it is a long-awaited manifestation of a new physics. The answer can come from the accurate measurements of basic parameters of the detected particle and its decays study. Such studies require the accumulation of significant amounts of experimental information.

It was announced in October 2015 that the LHC luminosity upgrade project is moving to its second phase which will see the development of industrial prototypes for various parts of the accelerator. “The LHC already delivers proton collisions at the highest energy ever,” said Dr. Rolf Heuer, CERN Director General at that time. “The High-Luminosity LHC will produce collisions 10 times more rapidly, increasing our discovery potential and transforming the LHC into a machine for precision studies: the natural next step for the high energy frontier.” The High-Luminosity LHC will produce 15 million Higgs bosons

per year compared to the 1.2 million in total created at the LHC between 2011 and 2012 [1].

The LHC upgrade is a challenging project, which requires development of new innovative technologies for superconducting magnets and other elements of the accelerator chain. The participants of the LHC experiments face complex tasks as well. The detectors were designed to operate at the nominal LHC conditions, some subsystems will not endure the increased radiation loads at the HL-LHC and will not be able to provide reliable experimental data of high quality. Appropriate modernization of experimental facilities is needed. The modernization of the whole LHC complex, both machine and detectors, is scheduled to be performed in two stages (Phase 1 and Phase 2), with two long technical stops in 2019–2020 and 2024–2026 [2].

Comprehensive programme of modernization for different detector subsystems of the ATLAS detector, the largest one running at the LHC, has been published in [3]. The JINR physicists have been participating in the ATLAS project since the early 1990s. We made a notable contribution to the production of almost all parts of the detector. In recent years, our efforts have been focused pri-

руется выполнить поэтапно (этапы «Фаза-1» и «Фаза-2»), с двумя длительными техническими остановками коллайдера в 2019–2020 и 2024–2026 гг. [2].

ATLAS, самый крупный из работающих на LHC детекторов, имеет детально разработанную программу модернизации для различных детекторных подсистем [3]. Участвуя в проекте ATLAS с начала 1990-х гг., сотрудники ОИЯИ внесли заметный вклад в создание практически всех частей установки. В последние годы наши усилия сосредоточены в основном на развитии и эксплуатации магнитной системы, мюонного спектрометра и калориметров ATLAS. Отсюда и планы по участию в модернизации этих подсистем.

На первом этапе модернизации наиболее масштабными для ОИЯИ стали обязательства по сборке и тестированию 32 квадруплетов малого мюонного колеса (NSW), которое будет установлено в торцевой части детектора взамен существующего. По расчетам,

в области псевдобыстрот, перекрываемой модулями NSW, загрузки триггерной системы детектора возрастут до 60 кГц и выше, а это уже за пределами рабочего диапазона установленных там модулей из дрейфовых трубок. Кроме того, существенно увеличится частота ложных срабатываний триггерной системы. Требуется новый подход, и после длительного периода научно-исследовательских разработок и испытаний коллаборация остановилась на технологии MicroMegas [4]. Эта новая для ОИЯИ технология была успешно освоена группой сотрудников Лаборатории ядерных проблем под руководством А. Гонгадзе.

В сжатые сроки в лаборатории была создана необходимая инфраструктура, включая «чистую комнату» и испытательные стенды, было приобретено и установлено новое оборудование. Тонкости технологии сборки камер сотрудники ОИЯИ осваивали в ходе совместных работ с коллегами из ЦЕРН, СЕА (Сакле) и других на-

Дубненские физики за сборкой
модулей MicroMegas камер

Dubna physicists are assembling
the MicroMegas modules



marily on the development and operation of the magnetic system, the muon spectrometer and the ATLAS calorimeters. Hence, we plan to participate in the modernization of these subsystems.

In the first stage of modernization the most ambitious obligation of JINR is the assembly and testing of 32 quadruplets for the new small wheel, NSW, which will replace the existing part of the ATLAS muon spectrometer. According to calculations, in pseudorapidity interval of the NSW we expect the trigger rates for muons with $p_T > 20 \text{ GeV}/c$ to increase above 60 kHz which exceeds the acceptable level for operation of modules made of drift tubes. In addition, the rate of false trigger will increase significantly. A new approach was required and the ATLAS collaboration chose MicroMegas technology [4] after a long-term R&D effort. This new technology for the JINR group has been successfully mastered at the Laboratory of Nuclear Problems, under the leadership of A. Gongadze.

The necessary infrastructure has been created at the Laboratory in a short time, including the “clean room” and test benches; the new equipment was purchased and installed. Technology subtleties of the camera assembly were learnt in the course of joint work with colleagues from CERN, CEA Saclay, and other research centres. Several tens of the module prototypes were made. The first quadruplet should be made by the JINR group members at CERN in April. There is no doubt that the Dubna assembly centre will be successfully certified by the collaboration and will start mass production of quadruplets, as soon as the delay of component delivery for NSW is sorted out. We hope that another centre developed for production of MicroMegas cameras and useful experience gained during the ATLAS modules assembly will be in demand for detectors at the NICA complex.

High professionalism shown by the Dubna team while creating the world’s largest superconducting magnet sys-

учных центров. Было изготовлено несколько десятков модулей для тестовых испытаний. Первый квадруплет должен быть изготовлен сотрудниками ЛЯП в ЦЕРН уже в апреле. Нет сомнений, что дубненский центр по сборке камер будет успешно сертифицирован коллаборацией и приступит к массовому производству квадруплетов, как только решится проблема с задержкой поставщиками комплектующих для NSW. Мы надеемся, что создаваемый в ЛЯП участок по производству камер MicroMegas и накопленный полезный опыт окажутся востребованными при создании экспериментальных установок на ускорительном комплексе NICA.

Высокий профессионализм, показанный дубенцами при создании самой большой в мире сверхпроводящей магнитной системы ATLAS, был отмечен дирекцией ЦЕРН специальной грамотой. Видимо, поэтому группе ОИЯИ, возглавляемой Н.И.Зиминим,

была поручена чрезвычайно ответственная работа в тоннеле ЛHC по вскрытию более 1700 внутренних соединений сверхпроводников и монтажу 612 дополнительных клапанов аварийного сброса газообразного гелия на дипольных магнитах коллайдера. И вновь все работы были выполнены качественно и в срок. В шахте ATLAS сотрудники ОИЯИ продолжают работать над совершенствованием магнитной системы детектора и повышением надежности криогенной системы. Другая группа дубненских сотрудников (руководитель Г.А.Шелков) занята сейчас размещением в шахте разработанных российскими учеными мониторов контроля радиационной обстановки. Датчики на основе GaAs:Cr были созданы совместно с коллегами из Томска, налаживается их серийное производство.

В период «Фазы-1» модернизация сцинтилляционного и жидкоаргонового калориметров состоит в об-



Профессор Ци Мин из Нанкинского университета (КНР) и ведущий научный сотрудник ЛФВЭ ОИЯИ В. В. Кухтин обсуждают результаты он-лайн измерений теневого тока облучаемых сенсоров из алмазных монокристаллов

Professor Qi Ming (right) from Nanjing University (China) and leading scientific researcher V. Kukhtin (VBLHEP, JINR) are discussing the results of the leak current on-line measurements of irradiated sensors made of diamond single crystals

tem of the ATLAS detector was awarded a special diploma of the CERN Directorate. That is why the JINR group, led by N. Zimin, was charged with an extremely demanding job in the LHC tunnel on opening more than 1,700 interconnects and installation of 612 additional safe valves aimed to evacuate the helium gas from the dipole magnets of the collider. Again, all the work was carried out efficiently and on schedule. Our group continues to work in the ATLAS pit on improving the magnetic detector system and increasing the reliability of the cryogenic system. Another Dubna group (head: G. Shelkov) is now engaged in the deployment of new sensors to monitor the background radiation for the ATLAS detector. Sensors based on GaAs:Cr were created in collaboration with colleagues from Tomsk, their production is ongoing.

The upgrade of readout and trigger electronics for scintillator and liquid argon calorimeters is the main part

of the modernization plan for Phase 1 [5]. The trigger signal rate will increase significantly in the forward region of the ATLAS detector. It will exceed the value of 80 kHz for 23 GeV electromagnetic clusters. In addition, a serious problem will be a large number of overlapping events. At the HL-LHC conditions we expect up to 200 “extra” (so-called “pile-up”) events in every beam crossing in the collider every 25 nanoseconds. The problem should be resolved by using finer granularity of the calorimeter cells used to create the trigger signal, and by implementing fast digital electronics into the readout modules. The development of electronics is led by E. Ladygin at the LHEP Protvino group. Some of our developments (signal shaper, backplane for FE crate, etc.) have already been considered and adopted by the collaboration.

An extensive research programme of radiation hardness of materials and electronics for the ATLAS liquid ar-

новлении считывающей и триггерной электроники [5]. В передней части установки ATLAS частота триггерных сигналов на начальном уровне заметно возрастает. Так, для электромагнитных кластеров с энергией более 23 ГэВ она превысит 80 кГц. Кроме того, серьезной проблемой станет большое количество наложений событий. В условиях HL-LHC ожидается до 200 «лишних» (так называемых pile-up) событий при каждом взаимодействии сгустков протонов в коллайдере, повторяющемся через каждые 25 нс. Проблему должна решить более мелкая гранулярность ячеек калориметра, используемых при создании триггерного сигнала, и оснащение считывающих модулей быстрой цифровой электроникой, в разработке которой принимают участие сотрудники СНЭО ЛФВЭ во главе с Е. А. Ладыгиным. Некоторые из наших разработок (формирователь сигналов, базовая плата FE крейта и др.) уже рассмотрены и приняты коллаборацией.

В 1990-е гг. на реакторе ИБР-2 была выполнена обширная программа исследования радиационной стойкости материалов и электроники для жидкоаргоновых калориметров ATLAS. Можно сказать, что все элементы калориметров, размещенные сейчас в огромных торцевых криостатах в шахте ATLAS, прошли в свое время «суровые» испытания пучками быстрых нейтронов на канале №3. В связи с модернизацией

установки ATLAS обсуждаются варианты размещения новых детекторов miniFCal перед передним калориметром FCal, и в качестве активной среды в miniFCal рассматривается газ ксенон под большим давлением или алмазные сенсоры. Как и прежде, должна быть испытана радиационная стойкость новых материалов.

Программа исследований была возобновлена на модернизированной облучательной установке. Результаты проведенных испытаний будут учтены при скором выборе окончательной конфигурации будущего переднего калориметра ATLAS. Не исключено, что потребуются заменить FCal целиком. Полезную информацию должны дать проводимые на ускорителе У-70 в Протвино облучения мини-модулей жидкоаргоновых калориметров высокоинтенсивными протонными пучками. Полученные с участием дубненцев предварительные результаты свидетельствуют в пользу FCal с уменьшенной величиной зазора между поглотителями. При ожидаемых на HL-LHC загрузках такой вариант должен решить проблему формирования в зазоре пространственного заряда, искажающего калориметрический сигнал. Если коллаборация ATLAS примет решение о замене FCal, дубненская группа будет активно участвовать в этом проекте. Пожелайте нам удачи!

Список литературы / References

1. CERN Press Release: LHC Luminosity Upgrade Project Moving to Next Phase. 29 October 2015.
2. <http://hilumilhc.web.cern.ch/>
3. *ATLAS Collab.* Letter of Intent for the Phase-I Upgrade of the ATLAS detector, CERN-LHCC-2011-012, LHCC-I-020, December 2011.
4. *ATLAS Collab.* New Small Wheel Technical Design Report, CERN-LHCC-2013-006; ATLAS-TDR-020, 2013.
5. *ATLAS Collab.* ATLAS Liquid Argon Calorimeter Phase-I Upgrade Technical Design Report, CERN-LHCC-2013-017; ATLAS-TDR-022, 2013.

gon calorimeters has been carried out at the IBR-2 reactor in the 1990s. We can say that all elements of calorimeters, located in the endcap cryostats, have passed the harsh tests by fast neutrons at channel No. 3 of the IBR-2.

Several options of the new miniFCal detectors to be mounted in front of the forward calorimeter FCal are under study. The active medium used in the miniFCal could be either xenon gas under high pressure or diamond sensors. As before, the radiation hardness of the new materials has to be investigated.

The research programme has been renewed with the modernized irradiation facility. The results of these tests will be taken into account when selecting the final configuration of the ATLAS future forward calorimeter. The replacement of the entire FCal is possible. The useful information should be provided by the Protvino experiment at U-70 irradiating minimodules of liquid argon calorimeters by high-intensity proton beams. Preliminary results give preference to the FCal option with reduced gap between the absorbers. At the HL-LHC conditions such an option should solve the problem of the space charge formation in the gap, which distorts the calorimetric signal. If the ATLAS collaboration goes for the FCal replacement, the Dubna group will actively participate in this project. Wish us luck!