

УДК 539.12
ББК 22.383
Б38

**Бедняков В. А., Будагов Ю. А., Кухтин В. В., Русакович Н. А.,
Б38 Чеплаков А. П., Шелков Г. А., Храмов Е. В.**

Объединенный институт ядерных исследований в эксперименте ATLAS. 1992–2015 гг. — Дубна: ОИЯИ, 2018. — 280 с.: ил.

ISBN 978-5-9530-0488-6

В течение 2009–2014 гг. в ЦЕРН проходил первый этап (Run-I) работы Большого адронного коллайдера LHC при энергии сталкивающихся протонов $\sqrt{s} = 7-8$ ТэВ. Была успешно выполнена одна из самых главных задач создания коллайдера — открытие бозона Хиггса, недостающего и принципиально важного звена современной Стандартной модели физики элементарных частиц, которая, в свою очередь, была проверена в данной области энергий с беспрецедентной точностью. Наряду с этим было получено много других уникальных физических результатов, имеющих принципиальное научное значение. Все они были обеспечены стабильной работой многофункциональных детекторов ATLAS и CMS, в создании и эксплуатации которых принимал активное участие Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

Книга посвящена описанию вклада сотрудников ОИЯИ в проектирование, разработку, сборку, отладку, запуск и успешную эксплуатацию всех основных узлов установки ATLAS, а также в получение на ней физических результатов фундаментальной важности. Кратко затронут вопрос об участии ОИЯИ в модернизации установки ATLAS и физическом анализе данных на следующем этапе работы LHC (Run-II).

**УДК 539.12
ББК 22.383**

ISBN 978-5-9530-0488-6

© Объединенный институт
ядерных исследований, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Вместо введения. Главные задачи современной физики элементарных частиц	5
2. Экспериментальная установка ATLAS	8
2.1. Внутренний детектор установки ATLAS	9
2.2. Калориметры установки ATLAS	11
2.3. Мюонный детектор установки ATLAS	13
3. Вклад ОИЯИ в создание установки ATLAS	14
3.1. Немного истории	14
3.2. Внутренний детектор и трекер	18
3.3. Адронный тайл-калориметр	28
3.3.1. Изготовление компонентов и сборка submodule калориметра	32
3.3.2. Сборка баррелей адронного тайл-калориметра	39
3.3.3. Сцинтилляционные пластины для Minimum Bias Trigger Scintillators	54
3.3.4. Контрольно-измерительные работы на установке ATLAS	56
3.3.5. Работы по подготовке к приему и обработке данных	64
3.4. Жидкоаргоновый адронный калориметр	70
3.4.1. Изготовление модулей жидкоаргонового калориметра	71
3.4.2. Изучение радиационной стойкости электроники и материалов	77
3.4.3. Изучение уровня возможного загрязнения жидкого аргона	80
3.4.4. Создание аппаратуры для измерения температуры жидкого аргона	81
3.4.5. Создание электроники считывания калориметрической информации	83
3.4.6. Подготовка LAr HEC-калориметра к работе LHC на большей светимости	84
3.5. Мюонная система	87
3.5.1. Разработка прототипов мюонных камер в ОИЯИ	89
3.5.2. Подготовка к производству мюонных камер в ОИЯИ	91
3.5.3. Производство мюонных камер в ОИЯИ	97
3.5.4. Монтаж мюонных камер в установку ATLAS и их испытания	99
3.5.5. «Компьютерные» работы дубненской мюонной группы	100
3.6. Компьютинг и системы обработки и передачи данных	102
3.7. Система триггирования и сбора данных	113
3.8. Магнитные поля установки ATLAS	124
3.9. Создание сверхпроводящих магнитных тороидов	129
4. Подготовка физической программы ATLAS в ОИЯИ	136
4.1. Дубненская мюонная группа в физической программе ATLAS	136
4.2. Участие группы SANC в разработке физической программы ATLAS	142
4.3. Участие группы жидкоаргонового калориметра в разработке физической программы ATLAS	145
4.4. Вклад группы тайл-калориметра в физическую программу ATLAS	153
4.4.1. События с очень большой множественностью	154
4.4.2. Композитность	155
4.4.3. На пути к обнаружению бозона Хиггса	155
4.4.4. Физика топ-кварка	156

4.4.5. О возможности поиска монополя	160
4.4.6. В направлении поиска суперсимметрии (SUSY)	161
4.4.7. Солнце в эксперименте ATLAS	169
4.4.8. Подготовка к исследованию структуры протона	170
4.4.9. Новые киральные бозоны	177
4.4.10. Поиск и идентификация дополнительных бозонов, гравитонов и т. п.	183
5. Роль ОИЯИ в получении главных результатов эксперимента ATLAS (Run-I)	186
5.1. Участие в запуске, наладке и эксплуатации LHC и установки ATLAS	186
5.1.1. Эксплуатация жидкоаргонового калориметра ATLAS	189
5.1.2. Эксплуатация тайл-калориметра ATLAS	189
5.1.3. Обеспечение радиационной безопасности	193
5.1.4. Прецизионный лазерный инклинометр — продукт эксперимента ATLAS	194
5.2. ОИЯИ в анализе данных эксперимента ATLAS.	196
5.2.1. «Локальные» физические результаты группы ОИЯИ раннего этапа	196
5.2.2. Бозе-эйнштейновские корреляции в событиях с большой множе- ственностью	200
5.2.3. Вклад странности в структуру нуклона на LHC	203
5.2.4. Рождение Z -бозонов во взаимодействиях тяжелых ионов	203
5.2.5. Поиск киральных Z^* - и W^* -бозонов	204
5.2.6. Поиск суперсимметрии в состояниях с большим числом струй	208
5.2.7. Поиск бозона Хиггса, образованного совместно с W - или Z -бозоном	213
5.2.8. Поиск квантовых черных дыр на установке ATLAS	216
5.2.9. Образование очарованных $D^{*\pm}$, D^\pm - и D_s^+ -мезонов на LHC	217
5.2.10. Исследование распадов B_c^+ -мезонов	218
5.2.11. Наблюдение и исследование распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$	218
5.2.12. Подготовка к поиску внутреннего очарования и бьюти	219
5.3. Другие важные события коллаборации ATLAS в ОИЯИ	220
5.3.1. Крупные международные симпозиумы в Дубне. 1995–2000 гг.	220
5.3.2. Совещание рабочей группы по физике тяжелых ионов в Дубне. 2008 г.	224
5.3.3. Совещания рабочей группы по исследованию бозона Хиггса. 2010 и 2011 г.	225
5.3.4. «Brainstorming workshop on applications from ATLAS using EU- funding for R&D-upgrades». 2010 г.	227
5.3.5. Обучение анализу данных ATLAS в Грид-лаборатории ЛИТ	230
5.3.6. Рабочие совещания дубненской части коллаборации ATLAS	232
6. Физика нового этапа работы ATLAS. Run-II LHC и далее	235
7. Заключение	236
Список литературы	240

1. ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ.

ГЛАВНЫЕ ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Физика элементарных частиц — наука о самых фундаментальных законах природы. Фундаментальность заложена в само ее основание и простирается от структуры мельчайших частиц материи до астрофизических масштабов космоса. Изучение взаимных превращений внутриатомных частиц дает ключ к пониманию законов, которые управляют всей Вселенной. По этим причинам физика элементарных частиц, являясь основой современной астрофизики и космологии, занимает центральное место на пути поиска совершенно новых знаний, без которых невозможно представить дальнейшее взаимодействие человека с природой. Именно в этой наиболее фундаментальной области, по словам Бруно Понтекорво, заложен огромный потенциал неожиданных открытий [1], способных, как показывает опыт, кардинально улучшать качество жизни. Наконец, как передовая методология, так и уникальная приборная база физики элементарных частиц обогащают и стимулируют развитие всех областей современного естествознания, промышленности и культуры в целом.

Стратегическая цель собственно физики элементарных частиц (вместе с астрофизикой и космологией) состоит в формировании нового физического мировоззрения, лишенного «недостатков» современной Стандартной модели слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий (см., например, [2–5]), которая представляет собой выдающееся достижение человеческой мысли [6]. Триумфальным подтверждением тому служит открытие недостающего элемента Стандартной модели — бозона Хиггса [7, 8] (последняя колонка на рис. 1.1), а также прецизионное описание многочисленных данных на электрослабом масштабе энергий Большого адронного коллайдера LHC в ЦЕРН (см., например, [9–13]).

Тем не менее Стандартная модель не может считаться единой непротиворечивой фундаментальной теорией — адекватной основой современного мировоззрения (см., например, [9, 10, 12]). Она лишь «низкоэнергетический предел» какой-то более фундаментальной теоретической концепции, которая будет способна «работать» на всех энергетических масштабах, включая, видимо, и астрономический масштаб массы Планка (10^{19} ГэВ). У Стандартной модели имеется слишком много внешних параметров и внутренних неразрешимых проблем, в частности, отсутствует ясное понимание механизма нарушения электрослабой симметрии, нет объяснения стабильности массы бозона Хиггса (проблема иерархии) и наблюдаемого разнообразия масс элементарных частиц (рис. 1.1), гравитация полностью выпадает из этой модели и т. п. (см., например, о нестабильном вакууме Стандартной модели в [9, 12, 14]).

Более того, ряд экспериментальных данных рассматриваются в настоящее время как указания на «новую» физику за рамками Стандартной модели.

масса →	$\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
заряд →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
спин →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.7 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ МэВ}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ

Рис. 1.1. Полный состав элементарных частиц Стандартной модели

Сюда обычно относят крайнюю малость ненулевых значений нейтринных масс (следствие осцилляции нейтрино), барионную асимметрию [15] и ускоренное расширение Вселенной (темная энергия), в которой обнаружен огромный недостаток вещества (темной материи), а также несколько так называемых «флейворных аномалий» ($H \rightarrow \mu\tau$, $B \rightarrow K\mu^+\mu^-$, $B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu$, $B_s \rightarrow \varphi\mu^+\mu^-$, $g-2$ и др.), которые, однако, еще недостаточно обоснованы экспериментально (см., например, [9, 10, 12]).

Поэтому на пути создания новой теории элементарных частиц (новой физической картины мира) главными источниками решающей информации сегодня считаются [16–21]:

- *прямой поиск «новой» физики* на Большом адронном коллайдере ЛHC (суперсимметрии, дополнительных размерностей пространства, новых сил, новых частиц и т. п.);
- *нейтринная физика и астрофизика*;
- *выяснение природы темной материи и темной энергии* (космология);
- *прецизионные исследования (крайне) редких превращений лептонов и адронов, нарушающих (флейворную) симметрию поколений (косвенный поиск «новой» физики).*

Важнейшее значение сохраняет проблема структуры вещества, решение которой сегодня видится в рамках *непертурбативной квантовой хромодинамики*.

В связи с этим первая главная задача нового этапа коллайдерных экспериментов на ЛHC (Run-II) состоит в тщательном исследовании свойств бозона Хиггса на предмет убедительного доказательства принадлежности

(или непринадлежности [22]) его Стандартной модели [9, 23–25]. Решение этой задачи связывают сегодня с будущими линейными электрон-позитронными ускорителями (CLIC, ILC, FCC-ee) — прецизионными машинами нового поколения (см., например, [26–29]).

Вторая главная задача — получить ответ на вопрос о существовании (или отсутствии) «новой» физики на ТэВ-ном масштабе энергий [30, 31], причем особый интерес (инспирированный результатами Run-I) здесь связан с экспериментальным обоснованием идеи суперсимметрии [9, 10, 32–36]. Доказательство как «стандартности» бозона Хиггса, так и существования «новой» физики в форме, скажем, суперсимметрии будет несомненным триумфом современной физической мысли и безусловным оправданием затрат на создание коллайдера LHC. С другой стороны, «нестандартность» бозона Хиггса и, особенно, полное отсутствие каких-либо «ТэВ-ных сигналов» «новой» физики, подрывающее в значительной мере фундамент идеи суперсимметрии, будут представлять собой сильнейший стимул к поиску совершенно иных концепций построения новой картины физического мира.

Остаются также актуальными другие задачи LHC, такие как исследование структуры нуклонов [10, 13] и электрослабого сектора Стандартной модели [9, 37], изучение свойств тяжелых [9, 38], в особенности топ кварков [39–42], поиск и исследование новых эффектов нарушения CP-симметрии (см., например, [9]) и т. д.

В целом, есть серьезные основания надеяться на то, что работа коллайдера LHC (Run-II и далее) позволит получить новые, совершенно неожиданные результаты, которые изменят наш взгляд на фундаментальную физику (см., например, [10, 12, 13]). Все эти многообещающие перспективы, не говоря уже об открытии бозона Хиггса и прецизионной проверке предсказаний Стандартной модели, совершенно очевидно связаны с успешной работой в течение 2009–2014 гг. (Run-I при энергии сталкивающихся протонов 7–8 ТэВ) коллайдера LHC и главных детекторов ATLAS и CMS, а также детекторов LHCb и ALICE.

Описанию вклада сотрудников ОИЯИ в создание, запуск, эксплуатацию установки ATLAS и получение на ней физических результатов фундаментальной важности во время Run-I (2009–2014 гг.) посвящена данная книга.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ATLAS

Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider, LHC) является протон-протонным коллайдером с энергией в системе центра масс 14 ТэВ и с проектной светимостью $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. При такой светимости ожидается, что пучки будут пересекаться каждые 25 нс и при каждом таком пересечении будет, в среднем, происходить 23 взаимодействия. Ускоритель с длиной кольца 27 км расположен под землей на глубине 50–175 м в тоннеле диаметром 3,8 м. Впервые полный оборот пучка в LHC был сделан 10 сентября 2008 г. при энергии пучка 450 ГэВ.

В LHC заложен огромный потенциал для поиска «новой» физики и проведения прецизионных измерений уже известных параметров Стандартной модели. LHC также называют «фабрикой» топ-кварков, поскольку даже при низкой светимости ускорителя ($10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) было произведено порядка 8 млн топ–анти топ кварковых пар. Считается, что исследование свойств именно топ-кварков, как самых тяжелых из известных элементарных частиц (см. рис. 1.1), открывает наиболее короткий путь в область «новой» физики. Беспрецедентная энергия соударения протонных пучков позволяет проводить исследования жестких кварк-глюонных процессов в недоступной ранее области энергий вплоть до нескольких ТэВ. Предполагается, что данные, полученные на четырех главных экспериментальных установках LHC — ATLAS, CMS, ALICE и LHCb, позволят ответить на множество важнейших вопросов, стоящих перед современной физикой. Так, результаты экспериментов на установке LHCb (Large Hadron Collider beauty) должны дать новую информацию для объяснения барионной асимметрии во Вселенной. Основная задача исследований на установке ALICE (A Large Ion Collider Experiment) — продвинуться в понимании конфайнмента, т.е. механизма образования из кварков и глюонов составных частиц, таких как протон и нейтрон. Конфайнмент, по-видимому, тесно связан с проблемой генерации масс адронов, поскольку глюоны являются безмассовыми частицами, а сумма масс трех кварков в протоне не превышает 1% от его полной массы.

Как известно, международные коллаборации ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) [43] и CMS (Compact Muon Solenoid) [44] были специально созданы для проведения многоплановых экспериментов нового поколения, нацеленных на систематическое изучение фундаментальных свойств материи в протон-протонных столкновениях с максимальной энергией $\sqrt{s} = 7\text{--}14$ ТэВ на Большом адронном коллайдере LHC в ЦЕРН. Эксперименты ATLAS и CMS имеют во многом схожие программы физических исследований. Как уже упоминалось, главнейшими задачами этих исследований (на стадии Run-I) было обнаружение бозона Хиггса и поиск эффектов «новой» физики за рамками Стандартной модели. Детекторы ATLAS и CMS являются уникальными и беспрецедентными по своей сложности физическими устройствами,

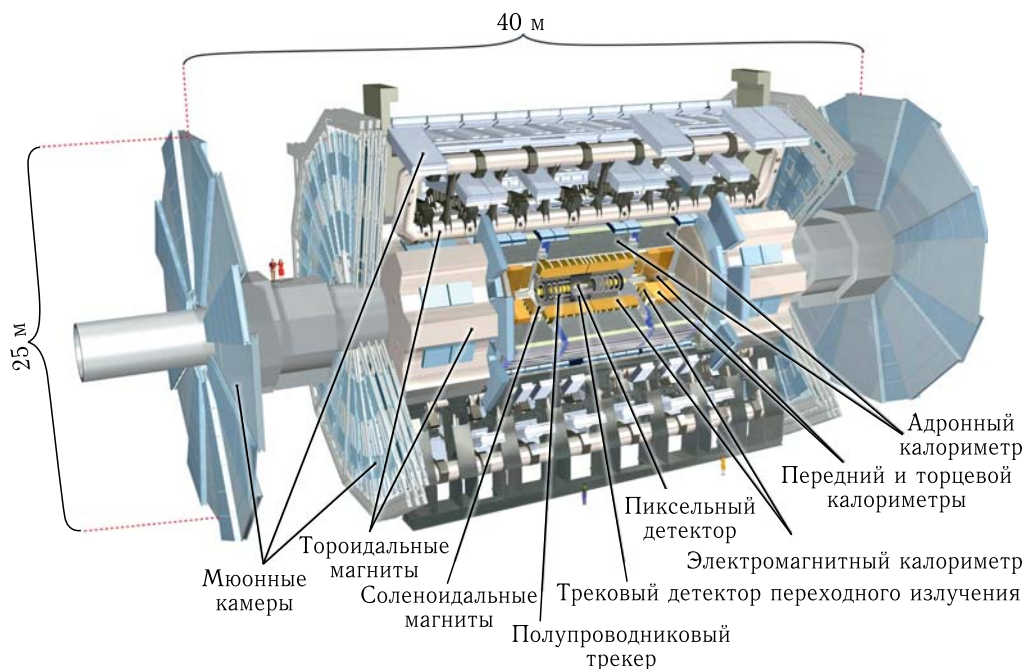


Рис. 2.1. Многоцелевая установка ATLAS на LHC

которые аккумулируют самые передовые достижения современной науки, техники, технологии, средства обработки и передачи информации. По этим причинам они позволяют исследовать максимально широкий спектр, в том числе и новых, неожиданных физических явлений и гарантируют получение совершенно новых знаний.

Экспериментальная установка ATLAS [45, 46] имеет цилиндрическую форму, диаметр 25 м и длину 44 м (рис. 2.1). Общая масса установки около 7000 т. Основная масса (~ 4000 т) приходится на электромагнитный и адронный калориметры. Детектор может быть условно разделен на четыре основные подсистемы (в порядке удаления от вершины взаимодействия первичных протонов): внутренний детектор (трековый), электромагнитный калориметр, адронный калориметр и мюонный спектрометр. Для того, чтобы максимально точно определять потерянную поперечную энергию, электромагнитный и адронный калориметры обеспечивают покрытие области разлета вторичных частиц от соударения протонных пучков по азимутальному углу φ от 0 до 2π и по псевдобыстроте до $|\eta| < 4,9$, где $\eta = -\ln \tan(\theta/2)$ и θ — полярный угол.

2.1. Внутренний детектор установки ATLAS

Внутренний детектор (Inner Detector, ID), расположенный в сверхпроводящем соленоиде с магнитным полем 2 Тл, имеет длину около 6,5 м и радиус 1,1 м (рис. 2.2). Система считывания сигналов детектора имеет более 3 млн каналов. Внутренний детектор позволяет точно восстанавливать координаты

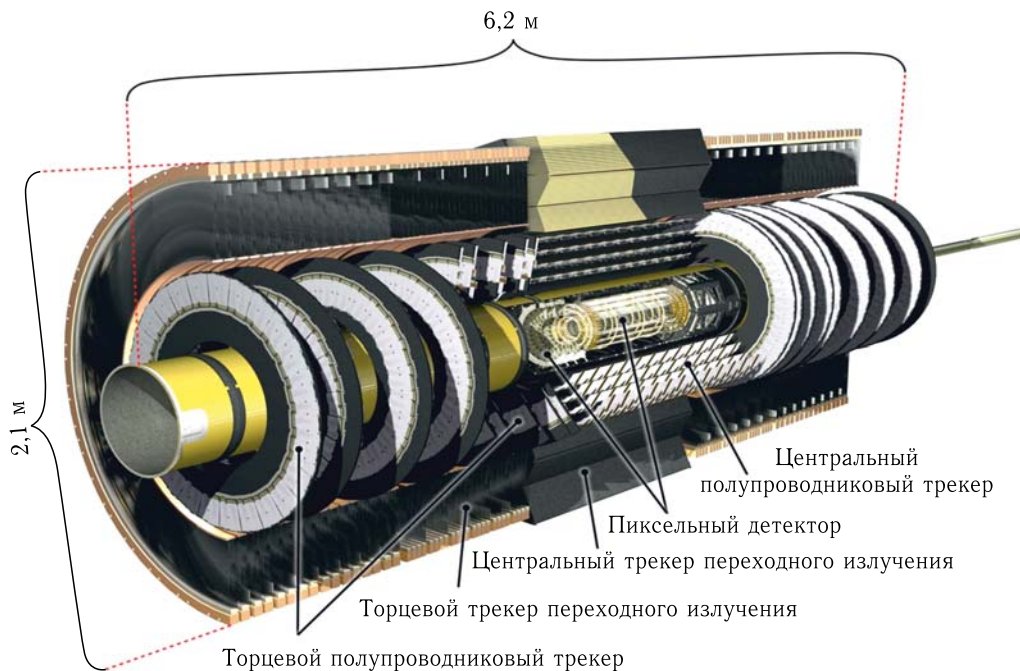


Рис. 2.2. Внутренний детектор установки ATLAS

взаимодействия сталкивающихся протонов и вершин от распадов вторичных частиц, измерять импульсы частиц, а использование детектора переходного излучения обеспечивает надежную идентификацию электронов.

Трековая система эксперимента ATLAS состоит из трех подсистем (в порядке удаления от вершины взаимодействия первичных протонов): кремниевого пиксельного детектора, кремниевого стрипового детектора и детектора переходного излучения. Ячейки пиксельного детектора, имеющие ширину 50 мкм и длину 300 мкм каждая, расположены тремя слоями на радиусах 50,5, 88,5 и 122,5 мм от вершины взаимодействия. На расстоянии около 4 см от вершины взаимодействия первичных протонов расположен так называемый *B*-слой пиксельного детектора, позволяющий эффективно восстанавливать вершины от вторичных распадов.

Полупроводниковый микростриповый трековый детектор (Semiconductor Tracker, SCT) состоит из нескольких слоев модулей (4 слоя в центральной части и по 9 дисков в торцевой части), каждый из которых включает две плоскости односторонних кремниевых микростриповых детекторов. Алюминиевые стрипы имеют длину 12 см и расположены с шагом от 80 до 120 мкм. Две плоскости детекторов развернуты друг к другу на стереоугол 40 мрад. Пиксельный и микростриповый детекторы вместе образуют прецизионный трековый детектор. Общая площадь кремниевых пластин превышает 60 м².

Самый внешний детектор, детектор переходного излучения, состоит из приблизительно 36 слоев тонкостенных трубок, получивших название строу (англ. straw — «соломинка»), диаметром 4 мм. Внутри каждой строу, запол-

ненной газовой смесью 70% Xe, 20% CO₂ и 10% CF₄, протянута 30-мкм вольфрам-рениевая (W–Re) позолоченная нить, которая является анодом. На внутреннюю поверхность строу нанесен проводящий слой, служащий катодом. На него подается напряжение в несколько киловольт. Этот детектор регистрирует заряженные частицы большой энергии по так называемому переходному излучению, испускаемому ими при пересечении (переходе) границы раздела сред с различными диэлектрическими проницаемостями. Интенсивность переходного излучения пропорциональна квадрату заряда частицы и (при больших энергиях) ее релятивистскому фактору, что позволяет использовать его для определения массы и заряда частиц.

Центральная часть детектора состоит из 50 тысяч трубок, а торцевая — из 320 тысяч. Пространственное разрешение каждой строу около 170 мкм. Пространственное разрешение детектора для трека порядка 50 мкм (подробнее в п. 3.2).

2.2. Калориметры установки ATLAS

Электромагнитный жидкоаргоновый (LAr) калориметр имеет цилиндрическую форму с внешним радиусом 2,23 м ($24X_0 \equiv 1,2\lambda$, где X_0 и λ — радиационная длина и длина до ядерного взаимодействия соответственно) и длиной 12,3 м (рис. 2.3). Благодаря высокой степени грануляции калориметр имеет очень хорошие энергетическое и пространственное (в плоскости $\eta \times \varphi$) разрешения. Центральная (Barrel) и торцевые (End-Cap) части калориметра

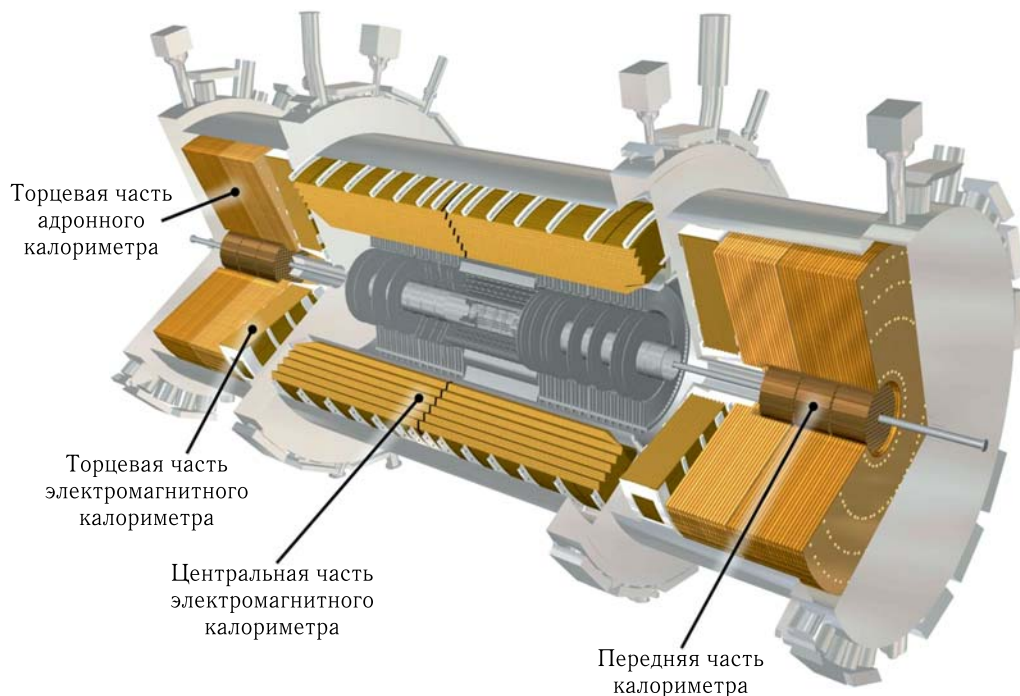


Рис. 2.3. Электромагнитный и адронный жидкоаргоновые калориметры установки ATLAS

в сумме покрывают область псевдобыстрот $|\eta| < 3,2$. Калориметр имеет форму «мехов аккордеона», расположенных вдоль азимутального направления, с электродами, состоящими из трех медных слоев, проложенных каптоновым изолятором (лентой на основе полиимидной пленки), и многослойного поглотителя, в котором основным материалом является свинец. На оба внешних слоя электрода подается высокое напряжение, а средний слой используется для считывания сигнала. Свободное пространство между внешним электродом и поглотителем заполнено жидким аргоном, который является активным веществом (подробнее в п. 3.4).

Адронный калориметр, состоящий из трех сегментов цилиндрической формы, покрывает область псевдобыстрот $|\eta| < 1,7$ и состоит из поочередно расположенных железных и скнтилляционных пластин. Пластины расположены таким образом, что их плоскость параллельна азимутальному направлению и перпендикулярна оси пучка ускорителя. Эффективная толщина калориметра составляет $7,2\lambda$. Жидкоаргоновые торцевой адронный и передний калориметры, покрывающие область псевдобыстрот $|\eta| < 4,9$, помещены в криостат, поскольку в них, так же как и в электромагнитном калориметре, в качестве активного вещества используется жидкий аргон. Жидкоаргоновый торцевой адронный калориметр собран из двух (переднего и заднего) колец, которые различаются толщиной медных пластин поглотителя — 25 и 50 мм. В переднем калориметре, состоящем из трех сегментов, в качестве поглотителя в первом сегменте используется медь, а в последних двух — вольфрам (подробнее в п. 3.4).

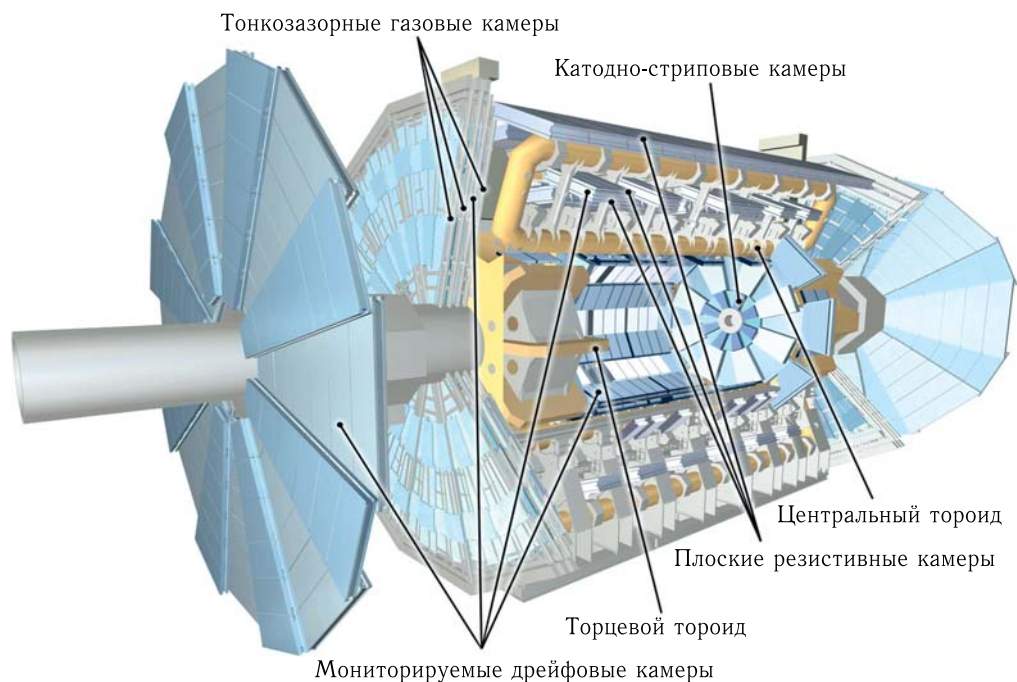


Рис. 2.4. Мюонный спектрометр установки ATLAS

2.3. Мюонный детектор установки ATLAS

Размеры мюонного спектрометра определяют размеры всей установки ATLAS (см. рис. 2.4). Он состоит из тороидальной магнитной системы и камер мониторируемых дрейфовых трубок (Monitored Drift Tubes, MDT), позволяющих измерить кривизну траектории мюона с высоким разрешением, и плоских резистивных камер (Resistive Plate Chambers, RPC), используемых в качестве триггера. В торцевой части в качестве триггера используются тонкозазорные газовые камеры (Thin Gap Chambers, TGC). Передняя часть, вместо мониторируемых дрейфовых трубок, оснащена катодно-стриповыми камерами (Cathode Strip Chambers, CSC), чтобы обеспечивать более высокую скорость счета. Магнитная система создает поле 0,5 Тл. Достоинством спектрометра является то, что он способен измерить импульс мюона с энергией 1 ТэВ с разрешением 10% (подробнее в п. 3.5).

Сотрудники ОИЯИ принимали активное участие в разработке, изготовлении, сборке и установке *всех главных подсистем* детектора ATLAS.

3. ВКЛАД ОИЯИ В СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ ATLAS

Участие в амбициозных и крупномасштабных международных проектах, таких как эксперименты ATLAS и CMS на Большом адронном коллайдере LHC в ЦЕРН, всегда рассматривалось как совершенно необходимое для ОИЯИ — международной научной организации, призванной решать наиболее фундаментальные задачи ядерной физики.

3.1. Немного истории

Как известно, в рамках подготовки программы экспериментальных исследований на создаваемом в ЦЕРН коллайдере LHC было сделано четыре предложения новых экспериментов: ASCOT, EAGLE, CMS и L3-LHC. После рассмотрения этих проектов на конференции «Toward the LHC Experimental Programme» в Эвиане (Франция) в марте 1992 г. было принято решение об объединении разработок двух из них — EAGLE (Experiment for Accurate Gamma, Lepton and Energy Measurements) под руководством Питера Йенни (P. Jenni) и ASCOT (Apparatus with a SuperCONducting Toroid) под руководством Фридриха Дидака (F. Dydak), в котором уже принимали участие сотрудники Лаборатории ядерных проблем (ЛЯП) и Лаборатории сверхвысоких энергий (ЛСВЭ; с 1999 г. — Лаборатория физики частиц (ЛФЧ), с 2008 г. — Лаборатория физики высоких энергий (ЛФВЭ)) ОИЯИ. Вскоре после конференции (9 сентября 1992 г.) участники этих двух проектов решили перейти к более тесному сотрудничеству и объединились в одну коллаборацию под флагом ATLAS (название было предложено Карлом Якобсом).

Первое официальное упоминание об участии ОИЯИ в эксперименте ATLAS датируется 1 октября 1992 г., когда в ЦЕРН был опубликован документ под названием «ATLAS. Letter of Intent for a General-Purpose *pp* Experiment at the Large Hadron Collider at CERN» (CERN/LHCC/92-004; LHCC I-2, 1992), где был приведен, пожалуй, самый первый список дубненских сотрудников, участвующих в проекте. Стоит отметить, что проработка принципиальных параметров установки началась раньше, в рамках «протоколлобораций» ASCOT и EAGLE.

Уже в 1992 г. для экспериментов на LHC в ЛЯП (совместно с ЦЕРН, Германией и США) были разработаны и исследованы на пучках ОИЯИ, ИФВЭ (Протвино) и ЦЕРН несколько прототипов новых дрейфовых трубок с повышенным давлением рабочего газа. Необходимо отметить, что в указанный выше документ вошло предложение сотрудника ЛЯП ОИЯИ Г. Д. Алексеева собирать мюонную систему установки из дрейфовых трубок с повышенным давлением газа (HPDT). По словам Ф. Дидака (25 апреля 2017 г.), эти управляемые дрейфовые трубки стали одним из главных вкладов

ОИЯИ в эксперимент ATLAS. Успеху данного предложения способствовало создание в короткие сроки в ЛЯП ОИЯИ прототипов таких детекторов и экспериментальное подтверждение существенного улучшения (до 25 мкм) их пространственного разрешения. Далее, в 1993–1994 гг. были начаты совместные с Институтом Макса Планка (Мюнхен, Германия) работы, главной целью которых была разработка конструкции мюонной системы, включающей детекторы (дрейфовые трубки высокого давления, HPDT) для прецизионного измерения координат. Подробнее об этом будет рассказано в п. 3.5. В то же время в ЛЯП были начаты работы по адронному тайл-калориметру (см. п. 3.3).

На этапе подготовки «Letter of Intent» сотрудники Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ выполнили расчеты ожидаемых выходов мюонов [47–50], что было очень важно для оценки загрузки мюонного спектрометра и обоснования выбора принципиальной концепции установки ATLAS — воздушного тороидального магнита. Сделанные оценки позволили также определить оптимальную толщину калориметров ATLAS.

В 1992 г. сотрудники ЛСВЭ выступили с предложением об участии в разработке и создании адронного калориметра на основе жидкого аргона и создании внутренней трековой системы со сцинтиллирующими нитями для установки ATLAS. В 1994 г. они (совместно с коллегами из Института Макса Планка (Мюнхен)) разработали прототип торцевого адронного калориметра (см. рис. 3.3, справа), на пучках ЦЕРН провели первые испытания тестового модуля тонкозазорного жидкоаргонового калориметра, а также приступили к выполнению обширной программы радиационных испытаний образцов электроники и материалов детекторов на нейтронном импульсном реакторе ИБР-2 ОИЯИ. В тот же период было завершено создание и тестирование полномасштабного сектора прототипа модуля детектора переходного излучения TRT (внутреннего трекера).

В 1994 г. разноплановая «подготовительная» деятельность ЛЯП и ЛСВЭ по уникальному международному проекту ATLAS, проводившаяся до этого за счет ресурсов уже имевшихся тем этих лабораторий, в соответствии с решением Ученого совета ОИЯИ была оформлена в самостоятельную тему «ATLAS. pp-эксперимент общего назначения на LHC». Руководителем темы был назначен директор ЛЯП Н. А. Русакович.

Главная задача группы ОИЯИ в коллаборации ATLAS в 1994 г. состояла в завершении работ над «Техническим проектом детектора ATLAS». Большой объем исследовательских и конструкторских разработок, положенных в основу проекта, был выполнен группой физиков и инженеров ОИЯИ (около 70 человек). Работы включали следующие направления: адронный тайл-калориметр; мюонная система на основе мониторируемых дрейфовых трубок; расчеты магнитного поля тороидального магнита; исследования радиационной стойкости изделий микроэлектроники; математическое моделирование рабочих характеристик электромагнитного sampling калориметра; изучение различных вариантов организации мюонного триггера второго уровня.

В 1994–1995 гг. по правилам ОИЯИ был подготовлен соответствующий проект участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS, который был представлен Н. А. Русаковичем на Программно-консультативном комитете по физике ча-

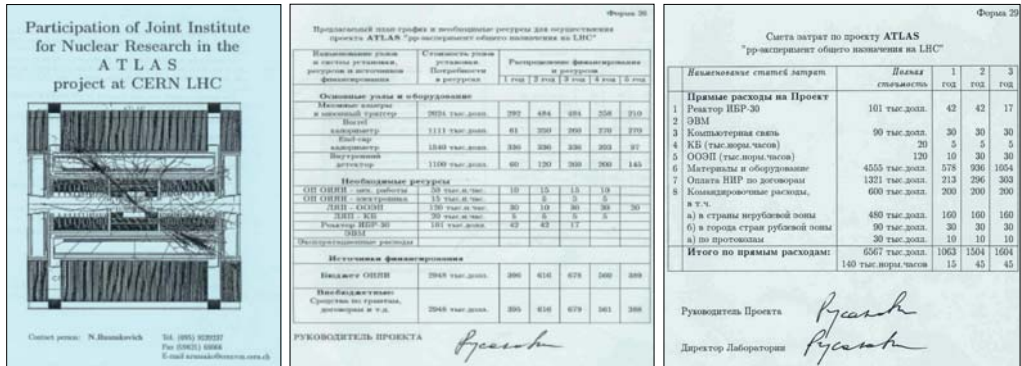


Рис. 3.1. Обложка первого официального документа ATLAS в ОИЯИ и сметы расходов при открытии работ по проекту ATLAS. Из [51]

стиц (24 ноября 1995 г.). Проект был одобрен и рекомендован дирекции ОИЯИ для выполнения, что стало официальным началом работ сотрудников ОИЯИ в эксперименте ATLAS.

В этом документе [51] впервые на систематической основе были изложены все «предварительные» научно-исследовательские работы, касающиеся возможного участия ОИЯИ в проекте ATLAS. В нем достаточно кратко были описаны все подсистемы установки, вклад в создание которых сотрудников ОИЯИ ожидался быть заметным (с самого начала это было одним из главных принципов участия ОИЯИ в крупном международном проекте). Далее, документ содержал план-график работ по проектированию, производству элементов и сборке детекторов, запрашиваемые финансовые и материальные ресурсы, а также полный список сотрудников нескольких лабораторий ОИЯИ, которые собирались работать в проекте ATLAS. Этот проект был подготовлен руководителями нескольких групп в ОИЯИ, которые имели дело с конкретными подсистемами установки ATLAS на предварительном этапе (1992–1994 гг.).

Первоначально таких подсистем было пять: мюонные камеры (рук. Г. А. Шелков, участников — 31 человек, рис. 3.2, слева) и мюонный триггер (В. М. Котов, 10 человек), адронный сцинтилляционный (tile) тайл-калориметр (Ю. А. Будагов, 37 человек, рис. 3.2, в центре), жидкоаргоновый торцевой (End-Cap) калориметр (В. В. Кухтин, 23 человека, рис. 3.3) и внутренний TRT-трекер (В. Д. Пешехонов, 13 человек, рис. 3.4). Уже в 1995 г. большая команда ученых, инженеров и конструкторов ОИЯИ (114 человек) была существенным образом вовлечена в реализацию проекта ATLAS. Был выполнен большой объем работ по проектированию, изготовлению опытных образцов и прототипов элементов основных подсистем установки, по подготовке мастерских для полномасштабного производства этих элементов и т. п. Все эти работы уже тогда были высоко оценены руководством коллаборации ATLAS. На создание установки ATLAS в проекте было запрошено \$6.6M, из них \$4.5M — из бюджета ОИЯИ [51]. В течение следующих лет ежегодно ПКК и Ученый совет ОИЯИ на систематической основе следили за исполнением этого проекта.

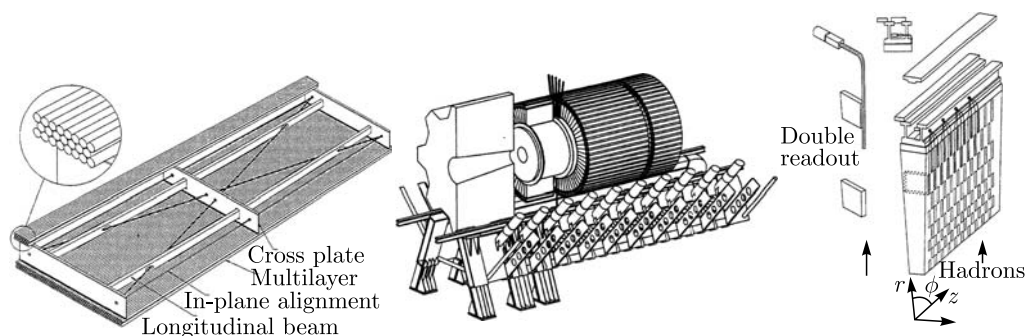


Рис. 3.2. Слева: частично собранная MDT-камера, показаны элементы ее крепежа. В центре: центральный и дополнительный баррели тайл-калориметра ATLAS. Справа: структура модуля барреля адронного калориметра. Из [51]

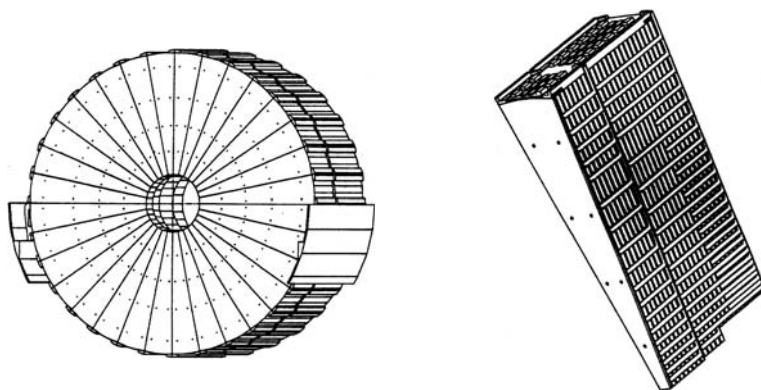


Рис. 3.3. Слева: 3D-вид адронного End-Cap калориметра. Справа: схематичный 3D-вид одного из модулей этого калориметра. Из [51]

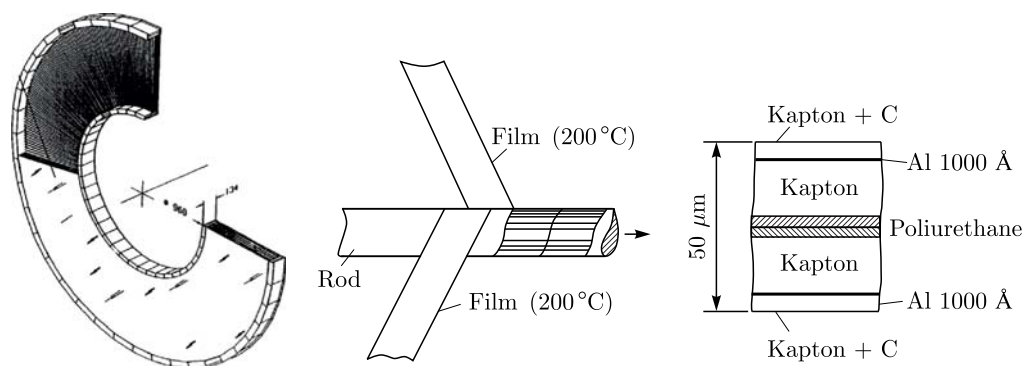


Рис. 3.4. Слева: один из модулей («колесо») торцевого (End-Cap) TRT-трекера. В центре: схема намотки строу. Справа: процедура изготовления строу. Из [51]

На момент запуска ЛНС в 2008 г., когда все системы детектора ATLAS были готовы к приему первых данных, ОИЯИ в эксперименте ATLAS полностью выполнил свои обязательства по:

- 1) производству 84 MDT-камер (Monitored Drift Tube Chambers) и систем их механического крепления (ЛЯП);
- 2) производству 25 и сборке 20 секторов адронного End-Cap LAr-калориметра (ЛФЧ и ЛЯП);
- 3) производству 65 модулей и сборке «бочки» (барреля) адронного тайл-калориметра (ЛЯП);
- 4) производству 17 В-колес (wheels) трекера переходного излучения TRT (ЛФЧ);
- 5) исследованию радиационной стойкости электронной аппаратуры и компонентов детекторов (ЛНФ, ЛФЧ, ЛЯП);
- 6) участию в разработке DAQ и SC систем (ЛИТ);
- 7) расчетам магнитных полей и распределения сил напряжений установки ATLAS (ЛЯП);
- 8) изготовлению системы измерения температуры в криостатах LAr (ЛФЧ и ЛЯП);
- 9) разработке и изготовлению 2000 предусилителей электроники считывания НЕС.

Был выполнен ряд проектов общего назначения, сотрудники ОИЯИ также внесли свой вклад в развитие физической программы исследований и системы обработки данных. К 2008 г. число официальных авторов работ коллаборации ATLAS от ОИЯИ достигло 30 человек, не считая 16 авторов «по молодежному списку».

Итак, за 1992–2006 гг. в ОИЯИ была проделана большая и очень важная работа. Руководство коллаборации ATLAS неоднократно подчеркивало, что сотрудники ОИЯИ внесли существенный, а в ряде случаев решающий вклад в разработку, проектирование, производство, монтаж и ввод в эксплуатацию основных подсистем детектора ATLAS — системы детектирования мюонов, адронных тайл- и жидкоаргонового калориметров, трекера внутреннего детектора, а также системы сбора и первичной обработки данных (см., например, [52–70]). В связи с этим следует особо отметить, что наряду с ОИЯИ только три участника коллаборации ATLAS (Италия, США и ЦЕРН) внесли вклад в разработку и наладку *всех* главных детектирующих систем установки ATLAS.

Ниже более подробно изложены результаты работ сотрудников ОИЯИ по каждой из важнейших подсистем установки ATLAS.

3.2. Внутренний детектор и трекер

Группа сотрудников Лаборатории физики частиц ОИЯИ (рук. В. Д. Пешехонов) вместе с коллегами из ряда российских и международных научных организаций участвовала в разработке и создании детектора переходного излучения (TRT — Transition Radiation Tracker) для внутреннего детектора (рис. 2.2) установки ATLAS [59, 60, 62, 71, 72]. В проекте ATLAS эта группа



Рис. 3.5. Цех по сборке TRT-колец детектора ATLAS в ЦЕРН

отвечала за производство 34 строу-колес для TRT (3072 каналов информации в каждом).

С 1994 по 2007 г. сотрудники ОИЯИ выполнили исследования и разработки в области тонкостенных дрейфовых трубок, методов считывания информации с них, участвовали в создании и тестировании прототипа детектора переходного излучения — трекера на основе трубок, а также в полномасштабной сборке этого детектора (см., например, рис. 3.5). Использование тонкостенных дрейфовых трубок, так называемых строу-трубок (*straw tubes*), в составе внутреннего детектора ATLAS было обусловлено [73] возможностью создания на их базе двухфункционального детектора (переходного излучения и трекера) с минимальной радиационной толщиной в сравнении с остальными известными координатными детекторами, а также достаточно хорошими радиационной стойкостью и пространственно-временными параметрами [74, 75].

При этом требования к строу-трубкам и сервисным системам детектора были достаточно жесткие, например, отклонение от соосности анода и катода строу-трубки должно быть менее 300 мкм. Необходима была также высокая стабилизация высоковольтного напряжения и парциального состава компонентов газовой смеси [60, 76].

В 1995 г. коллаборацией ATLAS было принято решение о выполнении в ОИЯИ работ по созданию модулей TRT-детектора типа В, которые расположены в торцевых частях внутреннего детектора вдоль направления пучка (торцевые, или *End-Cap*, детекторы). В Дубне также было решено выполнить работы по укреплению жесткости (армированию) 50% всех строу-трубок,

которые должны были быть установлены как в баррельную, так и в торцевую часть полномасштабного TRT-детектора.

Для проведения этих мероприятий в ЛФЧ ОИЯИ были подготовлены и оборудованы помещения для армирования строу-трубок с высотой потолка 8 м (1999 г.), чистая зона площадью 100 м² с восемью участками для выполнения различных операций по подготовке строу-трубок к сборке детектора (2000 г.), основное сборочное помещение площадью 150 м² и высотой 7 м (2000 г.), перепланированное в середине 2001 г. в соответствии с окончательно принятой коллаборацией ATLAS процедурой сборки субмодулей. Было организовано подсобное помещение для складирования элементов и готовых изделий, а также помещение для тестирования готовых модулей площадью 28 м² (2002 г.). Все сборочные помещения были класса 10 000 по чистоте, с локальной освещенностью не менее 500 лк, круглосуточной температурой (21 ± 2) °С и с влажностью менее 50%. Эти помещения были оборудованы системой подачи сжатого воздуха и подъемным устройством грузоподъемностью до 1 т [60].

В 1996–1998 гг. в ОИЯИ были выполнены основные работы по созданию TRT-детектора переходного излучения (трекера установки ATLAS). Его концепция совмещает в себе как трекер заряженных частиц на основе строу-камер, так и детектор переходного излучения для идентификации электронов. Для детального изучения параметров работы строу-камер были созданы и исследованы различные виды прототипов небольшого размера, некоторые из которых были использованы на тестовом пучке SPS в ЦЕРН.

Исследования на тестовом пучке показали, что прототипы обеспечивают надежную идентификацию электронов и хорошую точность измерения их треков. Затем был разработан и изготовлен полномасштабный прототип модуля этого детектора, на котором были проведены термометрические измерения и исследования его свойств на тестовом пучке ЦЕРН.

Для изготовления строу-трубок использовалась полиимидная (каптоновая) пленка толщиной 25 мкм, на одну сторону которой специальным образом было нанесено алюминиевое покрытие толщиной около 0,2 мкм и затем графитовое покрытие толщиной 6 мкм. На обратную сторону пленки наносился в качестве термоклей полиуретан толщиной около 5 мкм. Окончательная толщина пленки была примерно 36 мкм, и резистивность ее составляла около 10 Ом/квадрат. Строу-трубки с внутренним диаметром 4 мм были намотаны из двух нарезанных из этой пленки лент (рис. 3.6, слева). Проводящее графитовое покрытие находилось на внутренней и наружной поверхностях строу-трубок. Намотка строу-трубок выполнялась сотрудниками специализированной фирмы из Англии. Для сохранения прямолинейности, хорошей цилиндричности, исключения изменения линейных размеров строу-трубок при изменениях климатических условий и повышения их жесткости было разработано специальное пневмоэлектрическое автоматизированное устройство (для армирования строу-трубок), которое поступило в ОИЯИ из ЦЕРН в середине 1999 г. Для размещения этого оборудования, как уже отмечалось, в ЛФЧ было организовано специальное помещение с высоким потолком, с четырьмя термощкафами для сушки обдуваемых нагретым воздухом вертикально подвешенных строу-трубок.

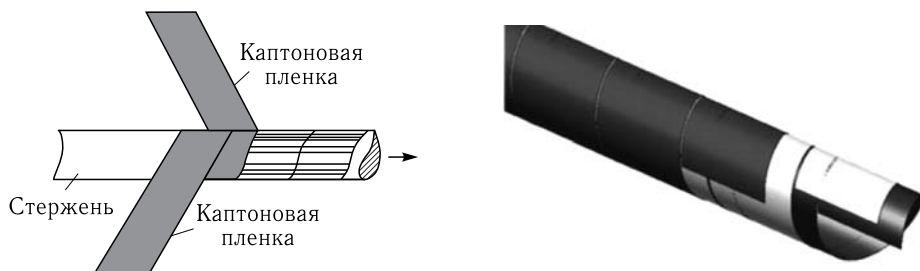


Рис. 3.6. Слева: схема процесса намотки строу-трубки на калиброванный стержень. Справа: схема конструкции строу. Из [60, 62]

В основе процедуры армирования лежал процесс (автоматизированного) наклеивания в продольном направлении четырех углеродных стрипов на наружную поверхность строу-трубок (длиной 1,65 м). Каждый стрип содержал 1000 нитей диаметром 8 мкм и приклеивался эпоксидным клеем. Далее армированные строу-трубки проходили тщательную сушку и всестороннюю проверку. При армировании строу-трубок в режиме массового производства было наклеено примерно 608 км углеволоконных нитей. Вес одного метра каждого установленного стрипа составлял 0,067 г. С сентября 2000 г. по апрель 2002 г. в режиме массового производства было армировано 91 993 строу-трубки, что соответствовало более 50% потребности в них TRT-детектора.

Для вклеивания строу-трубки в детектор, а также для установки в строу-трубке анодной проволоки диаметром 30 мкм использовались отлитые из поликарбоната (по специальным формам, разработанным в ОИЯИ) с точностью лучше 30 мкм внешние и внутренние втулки, различные для двух концов строу-трубки (рис. 3.7, вверху). Для фиксирования анодной проволоки применялись специальные тонкостенные СU-пины с изоляционным пластиковым покрытием для одного конца строу-трубки и цельнометаллические для другого.

Для сборки TRT-детектора уже в 2003 г. было подготовлено около 105 тыс. строу-трубок В-типа и 48 тыс. трубок С-типа, кроме того, уже были полностью готовы и проверены шесть четырехслойных детекторов

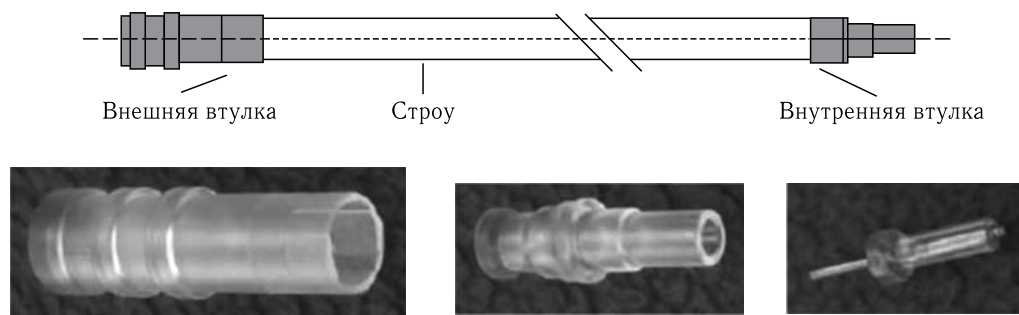


Рис. 3.7. Вверху: схема подготовленной к установке в детектор строу-трубки. Внизу: две отлитые из пластика концевые втулки и элемент фиксации анодной проволоки внутри строу-трубки. Из [60]

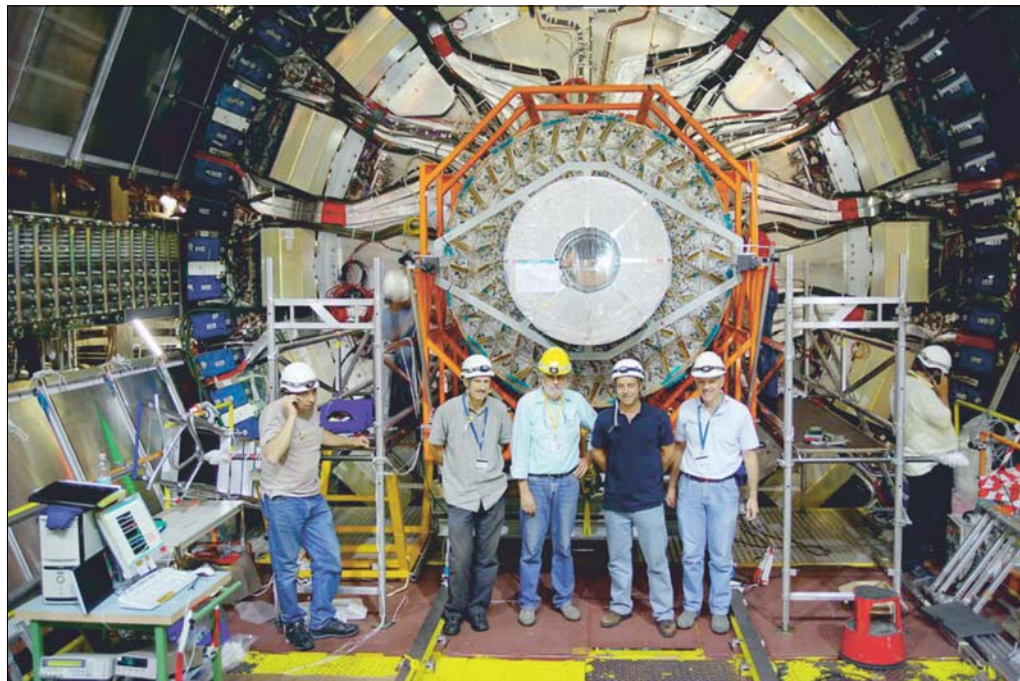


Рис. 3.8. Завершена установка баррельной части внутреннего детектора в сверхпроводящем соленоиде. 2006 г.

В-типа [77]. Два восьмислойных детектора были доставлены в ЦЕРН и испытаны. Далее, в 2004 г. восемь четырехслойных колес были полностью смонтированы и испытаны в ОИЯИ, еще три восьмислойных колеса были смонтированы и два из них доставлены в ЦЕРН. В 2006 г. были протестированы три последних «дубненских» восьмислойных торцевых колеса (End-Cap) TRT-детектора. С участием физиков ЛФЧ в 2006 г. по разработанной ранее технологии сборки с помощью специально созданного оборудования баррельная часть внутреннего детектора (см. рис. 2.2) была установлена на ее рабочее место внутри сверхпроводящего соленоидального магнита в шахте ATLAS (рис. 3.8). Также были инсталлированы все сервисные системы внутреннего детектора.

В 2006 г. были изучены временные и амплитудные характеристики строу-трубок с целью оптимизации их «мертвого» времени в условиях высокой загрузки [61, 62]. Полная установка, тестирование и наладка TRT-детектора были закончены в 2007 г.

Всего в ОИЯИ было изготовлено 110 127 строу-трубок длиной 37 см и 45 062 трубок длиной 49,7 см, пригодных для установки в TRT-детектор (рис. 3.9). Кроме того, в Дубне было изготовлено 17 кольцевых субмодулей типа В с общим числом строу-трубок 104 448 и, соответственно, каналов электроники считывания (рис. 3.10).

Из других многочисленных коллаборационных работ в этом направлении можно выделить некоторые наиболее трудоемкие, которые были реализованы,



Рис. 3.9. Первое кольцо внутреннего трекера в режиме массового производства



Рис. 3.10. Общий вид кольцевого субмодуля TRT типа В со всеми строу-трубками. После сборки субмодули объединялись в восьмислойные модули с установкой в них всех элементов сервисных систем. Из [60, 62]

главным образом, сотрудниками ОИЯИ. Прежде всего это исследования конструкционных материалов, элементов детекторов и прототипов на импульсном реакторе ИБР-2 ОИЯИ [78, 79]. Далее, это поиск отечественных предприятий и производство на них элементов детектора, разработка и производство в промышленности сборочного оборудования, а также разработка технологии сборки детекторов и специализированного уникального сборочного оборудования [80]. Высокой сложностью и оригинальностью отличалось исследование и выработка спецификации на метод охлаждения детектора [81]. На специально созданном стенде в ОИЯИ (1996–1997 гг.) был проведен целый спектр разноплановых совместных с сотрудниками ЦЕРН исследований, в результате которых были разработаны конструктивные элементы теплообменников, определены режимы газового и жидкостного охлаждения, а также другие

важные параметры. Созданный в итоге прототип модуля кольцевого детектора TRT и накопленный в этой области опыт легли в основу церновской системы охлаждения всего TRT-детектора. В 1997 г. был разработан оригинальный метод интегрального измерения прямизны трубок детектора.

Организация всех работ коллаборации ATLAS по созданию TRT-детектора установки была основана на нескольких важных принципах, неукоснительное следование которым, по существу, обеспечило успех в этом направлении. Это, во-первых, поэтапная разработка всех сборочных процедур детектора с тестированием каждой и введением оперативной информации в базу данных, во-вторых, разработка и создание автоматизированного и вспомогательного сборочного оборудования практически для каждой сборочной процедуры и, в-третьих, тщательное тестирование модулей как после сборки, так и после их доставки в ЦЕРН и паспортизация.

Наличие разнотипных участков с большими объемами работ для, например, армирования строу-трубок, подготовки строу-трубок, сборки субмодулей и модулей предполагало не только обучение и специализацию многочисленного персонала, но и создание различных блоков как основного, так и вспомогательного оборудования на этих участках. К основному оборудованию относится вся установка армирования, устройство для определения кривизны строу-трубок и проверки их герметичности на участке подготовки строу-трубок, сборочные столы нескольких типов, устройства перемещения субмодулей на участке их сборки и т. п. Так, на рис. 3.11, слева показан стол для сборки субмодулей, первые четыре таких стола были изготовлены в ОИЯИ в конце 2000 г. и использовались в ЦЕРН, ПИЯФ и Дубне для разработки оптимальной процедуры тестовой сборки и последующей массовой сборки этих субмодулей. Основания остальных 15 таких столов были изготовлены также в ОИЯИ.

Пример вспомогательного оборудования показан на рис. 3.11, справа — это транспортное устройство, задачей которого было обеспечение переме-



Рис. 3.11. Слева: стол для сборки субмодулей с установленными композитными кольцами. Справа: транспортное устройство для надежного перемещения субмодулей.

Из [60]

щения без повреждений достаточно хрупкой конструкции субмодулей вдоль последовательно расположенных сборочных столов, а также фиксирование субмодуля в строго определенном положении, требуемом процедурой сборки и тестирования.

Контроль качества являлся основной процедурой на всех участках работы и на всех сборочных мероприятиях [77, 82, 83]. Для его осуществления была разработана автоматизированная система (стенд) для проверки качества сборки кольцевых строу-детекторов типа В для TRT-трекера установки ATLAS [61]. Эта система позволяла автоматически проводить полную проверку модулей, определять работоспособность всех каналов, а также измерять величину неоднородности газового усиления по длине для каждой строу.

Результатом многочисленных оперативных тестов стало высокое качество всех 17 изготовленных в ЛФЧ ОИЯИ кольцевых модулей TRT-детектора, что было подтверждено проведенным в ЦЕРН итоговым тестированием всей аппаратуры [84].

По просьбе коллаборации ATLAS в 2004 г. в ОИЯИ была организована группа, целью которой было создание кабельной системы передачи данных и низковольтных кабелей для TRT-детектора. Было проверено и налажено оборудование для изготовления кабелей, которые использовались в баррельной части и внутреннем детекторе. Из-за сложности трассировки с высокой точностью жгутов с кабелями различной длины требовалась разработка специальной технологии выполнения работ, что было успешно выполнено в Дубне. Были созданы специальные столы (длиной до 17 м), разработаны схемы трассировки, изготовлены обжимные устройства, предложен низкотемпературный режим пайки отечественными материалами, полностью исключая вероятность замыкания. В результате, разработанная технология и хорошо обученный в ОИЯИ персонал позволили изготовить всю кабельную систему TRT-детектора в требуемые сроки (начало 2006 г.).

Как уже упоминалось (см. разд. 2 и рис. 2.2), внутренний детектор занимает пространство внутри соленоидального магнита и включает в себя три детектора, расположенных слоями вокруг оси пучков. Каждый детектор имеет цилиндрическую структуру (баррель) вокруг точки столкновения пучков [85] и дисковую (или торцевую) по торцам (End-Cap) [86]. Первыми на пути рожденных частиц стоят пиксельные детекторы, затем расположены два трекера: кремниевый стриповый трекер и TRT-трекер [71]. В соответствии с внутренней структурой детекторов и их расположением весь внутренний детектор был разбит на четыре транспортных модуля: Pixel, Barrel, End-Cap A и End-Cap C. Для монтажа их в единый детектор было спроектировано и изготовлено специализированное оборудование (три транспортных тележки), которое использовалось для объединения трех транспортных модулей (Barrel, End-Cap A и End-Cap C). Ранее эти транспортные модули были собраны в ЦЕРН с установкой всех сервисных систем и протестированы [87].

Кольцевые модули End-Cap были двух типов (А и В) и различались конструктивно шагом между слоями строу-трубок (рис. 3.12). В конце 2006 г. были завершены работы по объединению End-Cap модулей SCT- и TRT-детекторов (рис. 3.13).

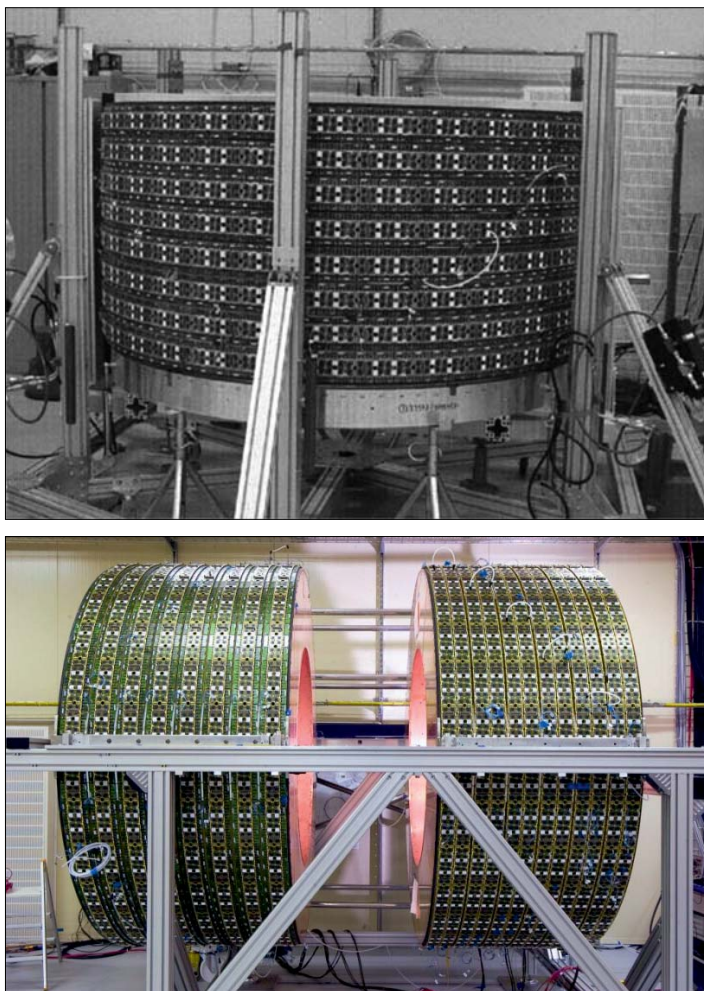


Рис. 3.12. Общий вид собранного детектора переднего направления (End-Cap типа В) (вверху). Детектор содержит 8 восьмислойных модулей с электроникой считывания [76]. Эти восьмислойные модули типа А и В объединялись в дальнейшем и устанавливались во внутренний детектор установки ATLAS (внизу). Из [62]

В 2007 г. с участием специалистов ЛФЧ был полностью завершен весь объем работ по интеграции внутреннего детектора в установку ATLAS и подготовке его к запуску [88]. Это включало монтаж в шахте ATLAS кремниевого и строу-детекторов, кабельных жгутов, низковольтной и высоковольтной систем, трасс газообеспечения, систем охлаждения и т. д. После установки детектора в шахту было осуществлено полное подключение всех систем обслуживания и проведены сеансы по набору статистической информации от космических частиц, как с магнитным полем, так и без него. Мониторинг систем и проведение тщательной настройки их параметров обеспечили высокую стабильность работы детектора с требуемыми характеристиками,



Рис. 3.13. Процесс интеграции детекторов End-Cap A

что и показала его успешная эксплуатация во время Run-I. На этом этапе с участием сотрудников ОИЯИ проводились работы по мониторингу TRT-детектора, моделированию ряда физических процессов, проведению сеанса с космическими лучами и т. п.

С решающим участием сотрудников ОИЯИ по проекту создания TRT-системы установки ATLAS было опубликовано более 40 работ (см., например, [59, 62, 71, 72, 81, 83, 89–99]), а также защищены три кандидатские диссертации: В. Н. Бычковым (2006 г.), Г. Д. Кекелидзе (2007 г.) и В. В. Мялковским (2009 г.).

В эти работы значительный вклад внесли И. В. Богуславский, Е. В. Васильева, К. С. Вирясов, Н. С. Григалашвили, Ю. В. Гусаков, В. Давков, К. Давков, В. Н. Круглов, К. А. Левтеров, В. М. Луценко, В. М. Лысан, Г. В. Масленников, С. С. Паржицкий, Е. М. Хабарова; активное участие в них принимали А. А. Савенков, В. В. Ливинский, И. А. Жуков, С. В. Мишин, И. В. Лапшина, Л. Н. Тарасова, С. Кузмичева, В. Е. Жильцов, В. И. Лущиков, А. О. Голунов и др.

В дальнейшем (после 2007 г.) под руководством В. Д. Пешехонова (рис. 3.14) были разработаны и исследованы прототипы сегментного строудетектора и отдельных строу-камер с высоким дифференциальным давлением их газового наполнения (до 4 бар).

Стендовые исследования сегментного строудетектора показали возможность его высокой гранулярности (до 2 см^2). Было проведено также моделирование процессов считывания информации, и выработаны требования к линиям



Рис. 3.14. В. Д. Пешехонов демонстрирует строу-трубку. 2013 г.

считывания. Исследования строу-детекторов высокого давления, проведенные на стенде и на пучке нуклотрона, показали возможность создания на их основе детекторов минимально ионизирующих частиц и фотонов с энергией квантов до 15 кэВ [100].

Группа была удостоена трех премий ОИЯИ за работы «Разработка и исследование прецизионных трековых детекторов на основе тонкопленочных дрейфовых строу-трубок» (2000 г.), «Детектор переходного излучения — трекер (TRT) внутреннего детектора установки ATLAS» (2010 г.), «Разработки и исследования, направленные на качественное улучшение параметров координатных детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок для экспериментов на ускорителях» (2012 г.).

Современное состояние и перспективы использования координатных детекторов на основе тонкостенных дрейфовых трубок изложены в обзорах [101, 102].

3.3. Адронный тайл-калориметр

Работы над созданием адронного тайл-калориметра (рис. 2.3) установки ATLAS проводились в научно-экспериментальном отделе множественных адронных процессов (НЭОМАП) ЛЯП с самого начала 1994 г. под руководством Ю. А. Будагова и далее совместно с Д. И. Хубуа и Н. А. Русакови-чем [103–108].

Тайл-калориметр ATLAS имеет сотоподобную структуру, при которой детектирующие сцинтилляционные тайл-элементы встроены в стальные поглотители, и считывание информации с них осуществляется с помощью специальных гибких оптических кабелей-фибров (рис. 3.2, справа). Калориметр состоит из трех секций — основной бочки (барреля) в центре и двух дополнительных бочек (расширенных баррелей) по краям установки (рис. 3.15). Внутри этих бочек расположен жидкоаргоновый электромагнитный калориметр (п. 3.4), в свою очередь состоящий из баррельной и торцевых частей (End-Cap). Секция центрального барреля тайл-калориметра собрана из 64 клиноподобных модулей длиной 5,6 м и массой 20 т. Секции расширенного барреля в два раза короче и вдвое легче (2,8 м и 10 т). Каждый такой модуль (рис. 3.16) состоит из субмодулей, которые установлены на специальной общей базе (гердере) с соблюдением необходимой линейной и угловой точности. Следует отметить, что адронный калориметр содержит около 600 тыс. прецизионных стальных пластин (более 1 000 000 деталей в целом).

Сцинтилляционный адронный тайл-калориметр представляет собой так называемый *sampling*-калориметр, в котором стальные элементы используются в качестве поглощающей (пассивной) структуры, а сцинтилляторные элементы — в качестве активной детектирующей субстанции [109]. Эти сцинтилляторы находятся в специальных «карманах» стальной конструкции. Световой сигнал от взаимодействия частиц в сцинтилляторе попадает с них на сдвигающие длину волны светопроводящие волокна (файберы), которые с помощью расположенных в радиальном направлении внутри абсорбера каналов доставляют этот «сдвинутый свет» в регистрирующие его фотоэлектронные умножители, которые находятся на внешних опорных балках (гердерах) калориметра (рис. 3.16). Помимо своей основной роли — детектора частиц высоких энергий, тайл-калориметр является, по существу, несущей конструкцией, на которую опирается жидкоаргоновый электромагнитный калориметр как в центральной баррель-области, так и в торцевой (End-Cap) области. Через них тайл-калориметр также косвенным образом обеспечивает поддержку системы внутреннего трекинга и зоны пучка. Стальной абсорбер, в частности его опорные балки (гердеры), обеспечивают стабильность вихревого магнитного поля центрального соленоида. Наконец, на торцевых поверхностях баррель-калориметра расположены сервисное оборудование (источники питания, крейты считывания информации и т. п.) для системы внутреннего трекинга и барреля жидкоаргонового электромагнитного калориметра.

Процедура массового производства тайл-сцинтилляторов (*scintillator tiles*) для тайл-калориметра ATLAS была описана в работе [110], где также представлены основные характеристики этих тайл-элементов, такие как световыход, стабильность и однородность работы. Детекторы и экспериментальное оборудование установки ATLAS описаны в работе [111].

Главная задача тайл-калориметра установки ATLAS — максимально полное измерение светового потока, производимого в пластическом сцинтилляторе заряженными частицами, образованными в результате взаимодействия протонов LHC (рис. 3.17). Основные характеристики калориметра — это разрешение по энергии поглощаемой калориметром (адронной) струи $\Delta E/E$, ко-

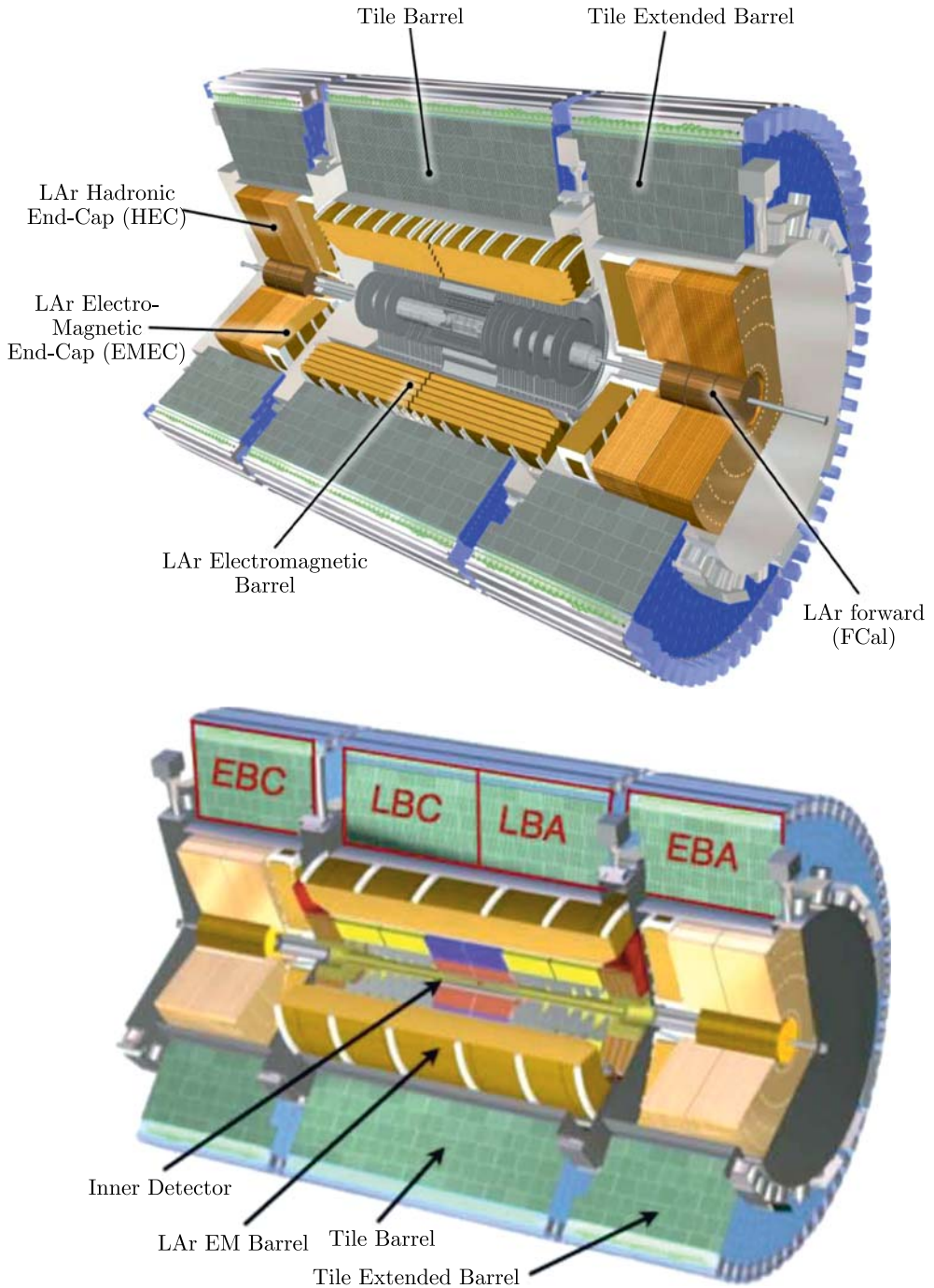


Рис. 3.15. Секции тайл-калориметра — основная бочка (Barrel) в центре установки и две дополнительные (торцевые) бочки (Extended Barrel) по краям

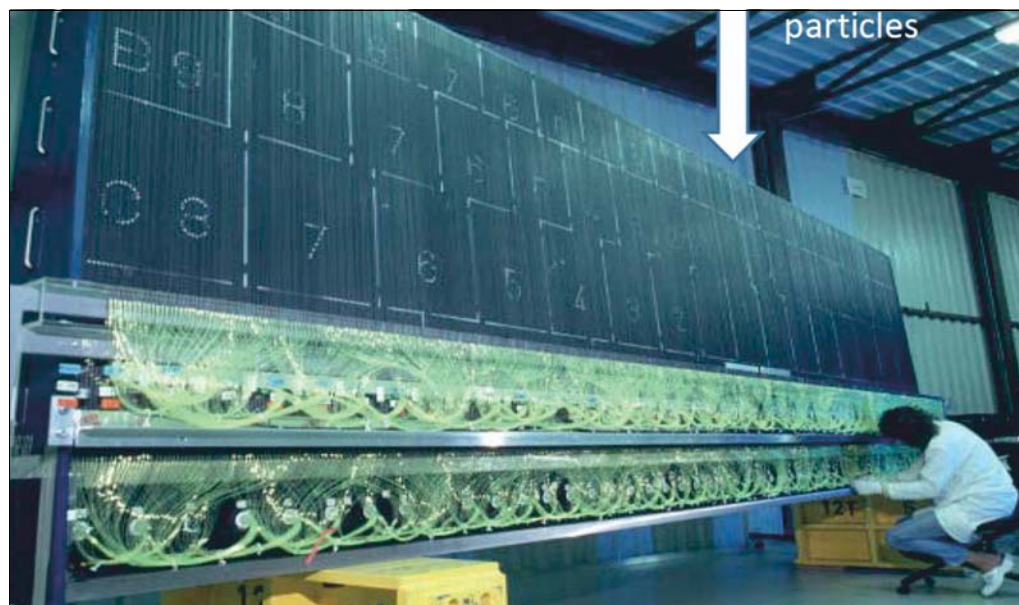


Рис. 3.16. Вверху: один из модулей тайл-калориметра ATLAS, собранных в ОИЯИ. Внизу: А. Н. Тавхелидзе, Ю. А. Будагов и Д. Хуба около дубненского модуля в ЦЕРН

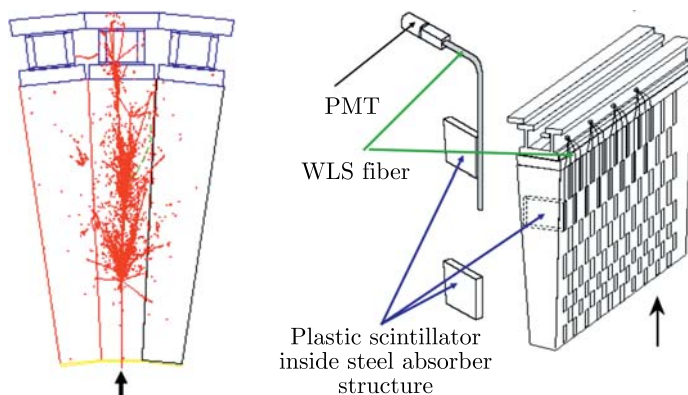


Рис. 3.17. Слева: образование сцинтилляционного света от заряженной частицы. Справа: система сбора этого света в модуле тайл-калориметра

торое должно быть не хуже $50\%/\sqrt{E} + 3\%$, и нелинейность восстановления полной энергии, которая не должна быть более $\pm 2\%$.

Необходимая, согласно физическим задачам ATLAS, структура калориметра требовала новой технологии массового производства отдельных компонентов и сборки как его субмодулей и модулей, так и всего калориметра. Впервые в связи с этим сотрудниками ЛЯП была разработана и использована методика *лазерного метрологического контроля* сборки (в особенности) массивных элементов детектора.

В целом решение поставленных перед НЭОМАП задач было реализовано в три этапа. Во-первых, это высокоточное производство примерно 300 тысяч различных компонентов субмодулей (мастерных и спейсерных пластин). Во-вторых, это прецизионная сборка как субмодулей, так и уже собственно модулей тайл-калориметра из этих субмодулей. И, в-третьих, это разработка и применение уникальной прецизионной методики контроля точности сборки.

3.3.1. Изготовление компонентов и сборка субмодулей калориметра.

В ОИЯИ работы по созданию адронного тайл-калориметра ATLAS начались в 1994 г. с исследования зависимости энергетического разрешения калориметра от выхода света с отдельных тайл-пластин. Помимо этого была изучена работоспособность процедуры подавления электромагнитной компоненты адронного ливня с целью исправления нелинейности отклика в некомпенсированном адронном калориметре, а также предложена и разработана процедура мечения B -мезонов на основе информации с адронного калориметра [107, 108].

В 1995 г. было завершено физико-техническое обоснование и разработан рабочий проект первого прототипа модуля (6 м, 20 т) адронного калориметра [104, 112]. Было начато его изготовление в цехе опытно-экспериментального производства ЛЯП в кооперации с российскими промышленными предприятиями и научными центрами в Протвино, Пизе (см. рис. 3.18), Праге, Братиславе, Минске, Барселоне и Женеве [106]. В 1995 г. была также оптимизирована технология прецизионного лазерного кроя стали, которая обеспечивала необходимую высокую точность производства пластин-поглотителей тайл-



Рис. 3.18. Н. Д. Топилин проверяет качество сборки (слева) и склейки (справа) субмодулей тайл-калориметра на специализированной фирме в Пизе. Фото Tarcisio Del Prete

калориметра. Эти работы проводились на заводах «Универсалмаш» (Санкт-Петербург) и НИЦТЛАН (Шатура), где удалось достичь точности не хуже 45 мкм [113, 114]. Помимо этого была исследована светочувствительность газоразрядных счетчиков с катодом из полупрозрачной алюминизированной лавсановой пленки [115].

В 1996 г. сотрудниками ЛЯП была разработана технология (рис. 3.19) и произведена сборка нулевого модуля адронного тайл-калориметра установки ATLAS [116]. Также они участвовали в анализе данных по взаимодействию мюонов различных энергий с железной мишенью, что было связано с необходимостью изучения процессов прохождения мюонов через железные

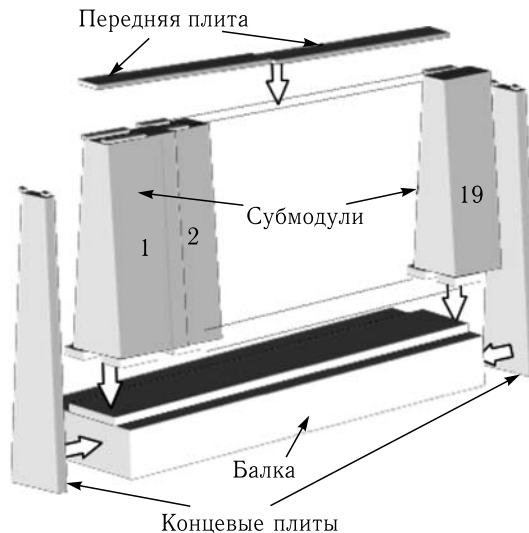


Рис. 3.19. Схема сборки модуля тайл-калориметра

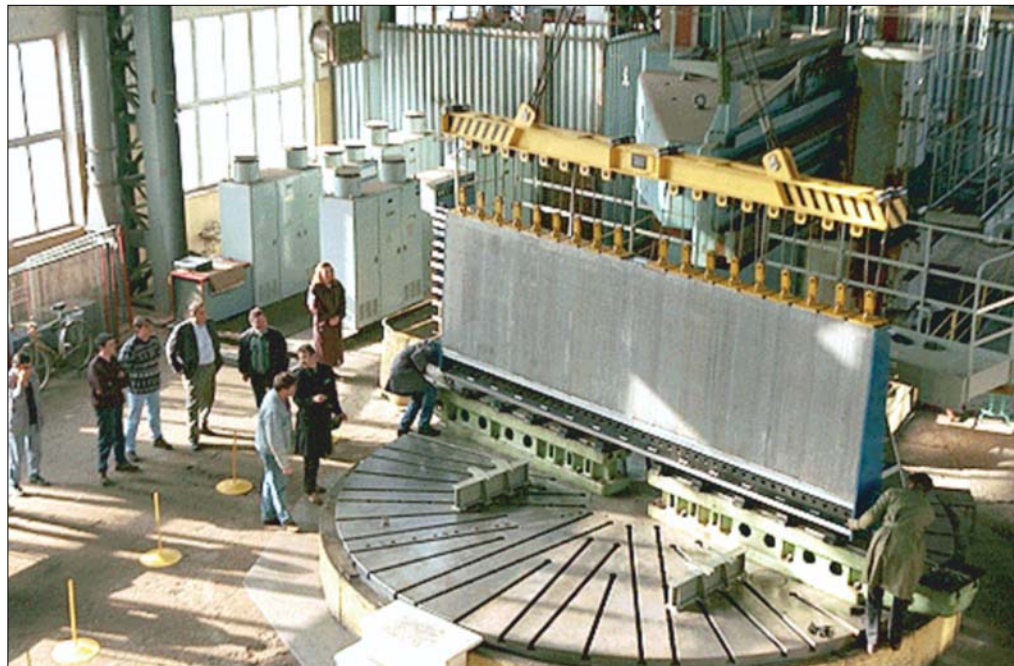


Рис. 3.20. Вверху: группа тайл-калориметра ОИЯИ «в начале пути». Внизу: сборка нулевого модуля тайл-калориметра в 5-м корпусе ЛЯП. Апрель 1996 г.

поглотители калориметра [117–119]. Значимость создания в ОИЯИ нулевого модуля (рис. 3.20) отражена в престижном научном журнале «Nature» [120].

В 1997 г. эта группа [121–123] полностью завершила трудоемкую подготовительную работу для полноценного начала массового производства поглотительных пластин для модулей баррельного тайл-калориметра.

В конце 1998 г., в полном соответствии с графиком работ, было закончено массовое производство пластин-поглотителей тайл-калориметра [124]. Для этого производства была создана и эффективно работала коллаборация со странами-членами ОИЯИ (Белоруссия, Словакия, Чехия). Было разработано программное обеспечение для системы медленного контроля тайл-калориметра. Эти программы были успешно использованы при тестовых испытаниях. Были также полностью подготовлены помещения для сборки 308 субмодулей и 65 модулей калориметра в ОИЯИ, а в декабре 1998 г. начато массовое производство субмодулей.

Главным достижением 1999 г. можно считать успешное начало массового производства в ОИЯИ модулей и субмодулей барреля адронного калориметра ATLAS [125]. В Дубне за этот год было произведено 10 модулей, которые со средней скоростью один модуль в каждые две недели отправлялись в ЦЕРН.

Кроме того, было начато сооружение семи оптико-механических стендов для детального изучения 10 300 фотоумножителей, на каждом из стендов было возможно одновременно проводить измерения с 24 фотоумножителями.

Была разработана система медленного контроля тайл-калориметра, учитывающая функциональные возможности установки и распределения потоков данных, а также запущен пробный вариант (окончательной) версии подсистемы высоковольтного питания (HV).

В 2000 г. были собраны 24 модуля адронного тайл-калориметра, т.е. усилиями сотрудников ОИЯИ были готовы 33 модуля (250 субмодулей) из общего числа 65 модулей (308 субмодулей) по плану. 30 модулей были успешно отправлены в ЦЕРН (рис. 3.21).

В середине 2001 г. было закончено производство всех 308 субмодулей (рис. 3.22), были собраны 24 модуля, и 55 модулей доставлено в ЦЕРН. Оставшиеся 10 модулей были изготовлены и доставлены в ЦЕРН в середине 2002 г.

Как уже упоминалось, каждый из этих модулей представлял собой прецизионную конструкцию длиной 6 м и массой 20 т. Качество сборки модулей контролировалось разработанным в ОИЯИ лазерным комплексом, оборудованным специальным математическим обеспечением, который гарантировал точность 50 мкм [63, 126–128]. Все произведенные модули удовлетворяли налагаемым на них требованиям (фактическое отклонение от идеальной формы было менее 0,3 мм при максимально допустимом отклонении 0,6 мм).

В 2002 г. были произведены тщательные измерения размеров модуля адронного калориметра ATLAS лазерным и фотограмметрическим методами [129]. Высокоточная сборка большой экспериментальной установки принципиально необходима для ее успешной работы на ЛНС. Адекватность метрологического контроля является существенной частью создания современного детектора. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что измерения, проведенные этими двумя методами, согласуются в пределах 70 мкм

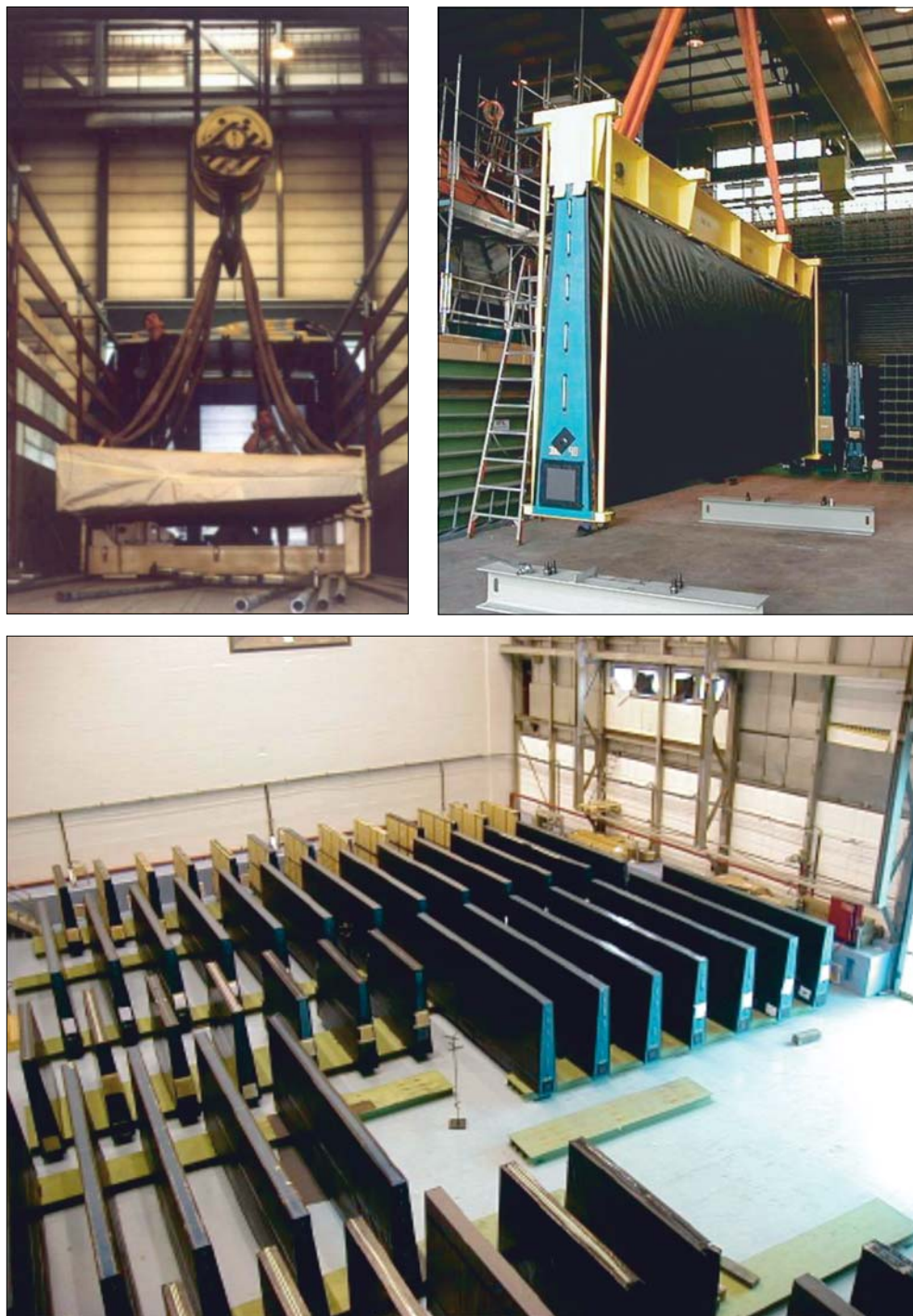


Рис. 3.21. Вверху: этапы транспортировки дубненских модулей в ЦЕРН. Внизу: готовые модули в ЦЕРН — 27 модулей из Дубны и 21 из Барселоны. 2000 г.



Рис. 3.22. Вверху: склеивание мастерных и спейсерных пластин в submodule путем дозированного нанесения клея (способ предложен В. М. Романовым). Внизу: контроль высоты submodule на поворачивной плите

(рис. 3.23). Это означает, что два независимых метода могут быть скомбинированы, что может привести к возникновению нового уровня инженерной культуры — высокоточной метрологии при сборке крупномасштабных массивных объектов.

Итоговое распределение отклонений для всех submodule от номинального положения на собранных в Дубне модулях показано на рис. 3.24. Видно, что неплоскостность (nonplanarity) модулей ОИЯИ находится в пределах 0–0,4 мм, что в целом значительно лучше, чем расчетное значение 0,6 мм. Все 65 модулей ОИЯИ были доставлены в ЦЕРН без повреждений, что было подтверждено путем сравнения записей модуля измерений боковой поверхности до и после доставки.

Итак, в период 1994–2002 гг. в НЭОМАП были выполнены три наиболее важных цикла работ. Была выполнена разработка и осуществлено проектирование концепции основных элементов конструкции калориметра, сопровождавшееся необходимыми исследованиями и разработками, а также изготовлением соответствующих опытных образцов. Далее, было осуществлено промышленное производство 300 тыс. стальных ядерных поглотителей и несущих

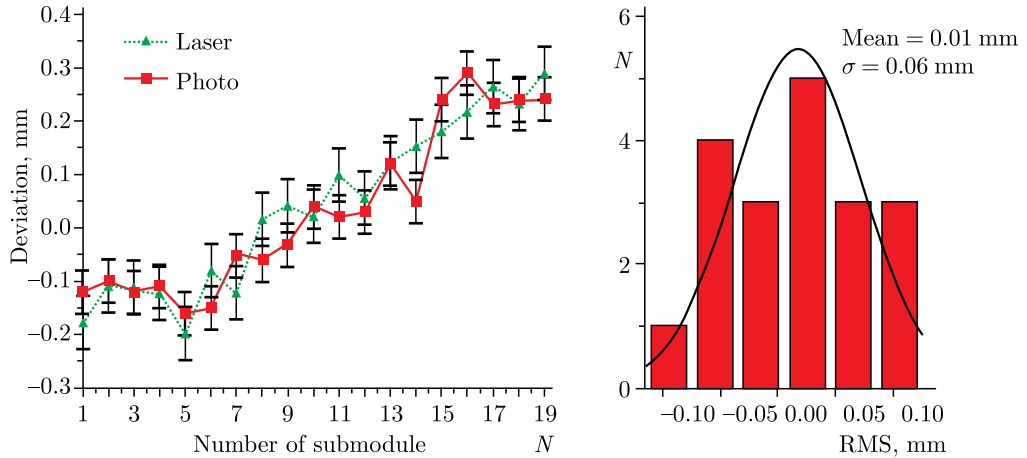


Рис. 3.23. Данные измерений контроля сборки модулей с помощью лазерного и фотограмметрического методов контроля. Из [129]

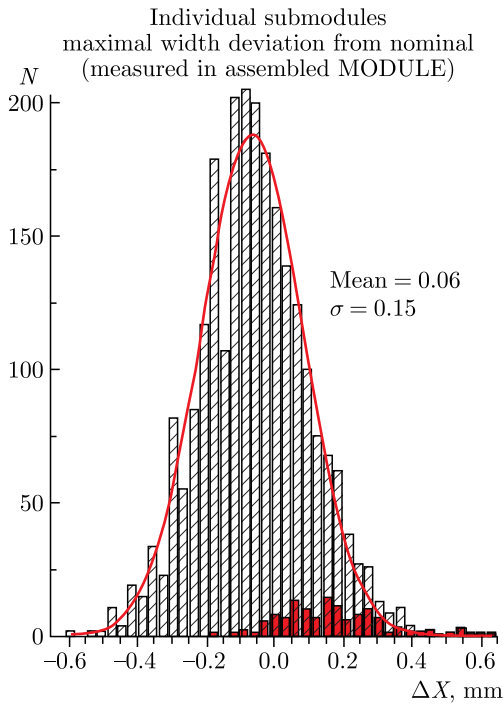


Рис. 3.24. Распределение максимальных отклонений от номинального значения для всех submodule в дубненских модулях. Выделенные красным цветом области отвечают максимальному отклонению в submodule для каждого из 65 модулей. Из [129]

щих (опорных) балок. Наконец, были произведены все запланированные для ОИЯИ submodule и модули. В процессе этого производства была предложена, разработана и успешно применена новая прецизионная технология контроля, в том числе на основе лазерной техники. Следует еще раз подчеркнуть чрезвычайную эффективность совместных усилий рабочих, техников, инженеров и физиков из многих научных центров и промышленных предприятий при решении уникальных технологических проблем, что в конечном итоге привело к успешной сборке модулей и их доставке в ЦЕРН. За эти работы («Разработка и создание модулей адронного тайл-калориметра ATLAS, новой методики лазерного контроля их сборки и исследование характеристик с использованием новых методов») в 2002 г. была присуждена премия ОИЯИ, и на их основе М. В. Ляблиным защищена кандидатская диссертация.

Богатый опыт организационно-методических работ (1994–2002 гг.), проведенных ОИЯИ в рамках круп-

номасштабной международной коллаборации (научных центров и производственных фирм России, Европы и Америки) в сфере создания модулей и субмодулей барреля адронного тайл-калориметра установки ATLAS (см. рис. 3.25 и 3.26), в 2005 г. был обобщен и проанализирован в специальной публикации [130]. Особое внимание сотрудников ОИЯИ было сосредоточено на исследованиях и разработках, на оценке качества методов контроля, на разработанной в ОИЯИ лазерной метрологии, позволившей достичь необходимой высокой точности при сборке основных структурных элементов (субмодулей и модулей) калориметра [131].

Дополнительно в публикации [132] была описана процедура оптической сборки, называемая Optical Instrumentation, а также результаты проверки качества сборки модулей [65]. Всего, как уже упоминалось, было собрано 65 (один резервный) баррель-модулей (LB) и 129 (один резервный) Extended баррель-модулей (EB). Модули LB механически были собраны в ОИЯИ и переправлены в ЦЕРН (рис. 3.27), где процедура оптической сборки была выполнена сотрудниками нескольких институтов — членов коллаборации ATLAS. Модули, составляющие один из двух расширенных баррелей (EBA), были механически собраны в США, а модули другой части расширенного барреля (EBC) — в Испании (см., например, рис. 3.15).

Как известно, «сигнальный свет» в тайл-калориметре (см., например, рис. 3.17) собирается с помощью фотоумножителей (ФЭУ), которые широко используются в различных типах сцинтилляционных и черенковских детекторов (счетчики, калориметры и т. д.) как компоненты, регистрирующие свет. Анализ импульсных спектров от слабых источников света (обычно называемых однофотоэлектронными спектрами) имеет очень большое значение, так как позволяет обнаруживать много характерных особенностей и может быть использован для нахождения существенных параметров ФЭУ и детекторов. Особенно важно измерение внесенной в детекторы энергии в терминах фотоэлектронов, образованных на фотокатоде ФЭУ (абсолютная калибровка). В работах сотрудников НЭОМАП 2000–2001 гг. [133, 134] был представлен метод развертывания для анализа одноэлектронных сверхкомпактных спектров ФЭУ нового типа R5600 и R5900 с металлической канальной диодной системой. Эти ФЭУ в настоящее время широко используются в экспериментах по физике высоких энергий, например коллаборацией ATLAS для нужд модернизации адронного калориметра. Детальный анализ однофотоэлектронных спектров показывает, что метод достоверно описывает процесс умножения заряда в этих фотоумножителях [135]. Он позволяет экспериментально определить «доступ-коэффициент» ФЭУ, нужный для вычисления фактора конверсии энергии в электрический сигнал (количество фотоэлектронов на 1 ГэВ) для калориметров, основанных на этих ФЭУ. Он также может быть использован как инструмент для абсолютной калибровки и мониторинга стабильности во времени. Метод использует только элементарные физические принципы и поэтому может быть легко адаптирован к любым типам фотоумножителей. Этот цикл работ является хорошим примером общезначимой пользы «внутриатласовских» работ.

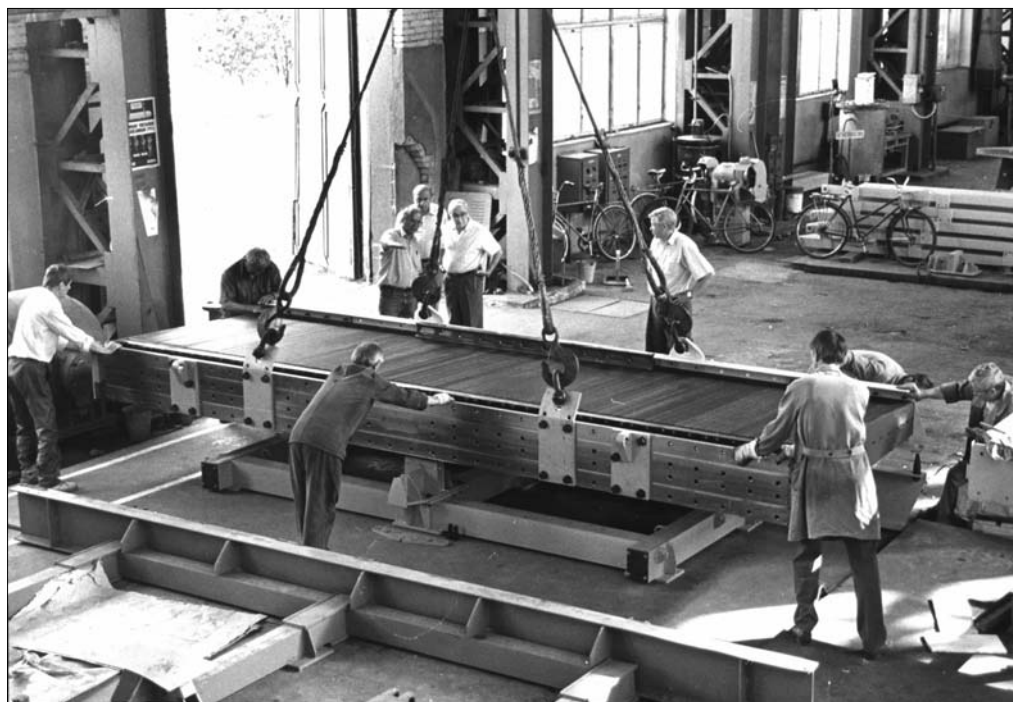


Рис. 3.25. Вверху: подготовка (1999 г.) первого собранного в ОИЯИ модуля тайл-калориметра (TileCal Module-1) для отправки в ЦЕРН. Из [130]. Внизу: завершение монтажа 65-го модуля в ЛЯП ОИЯИ



Рис. 3.26. Первый собранный в Дубне (июль 1999 г.) модуль. Посмотреть на него специально приехал Марцио Несси



Рис. 3.27. «Калориметр сближает народы» — А. Н. Сисакян и П. Йенни у 64-го дубенского модуля в ЦЕРН. 2002 г.

3.3.2. Сборка баррелей адронного тайл-калориметра. Пожалуй, самым важным и самым ярким этапом участия ОИЯИ в создании установки ATLAS была сборка баррелей адронного тайл-калориметра, выполненная, по существу, руками и изобретательностью инженеров и техников ОИЯИ (под руководством Н. Д. Топилина) [136].

Напомним, адронный калориметр ATLAS состоит из трех баррелей (или бочек) цилиндрической формы — одного центрального и двух боковых. Общие размеры калориметра — длина 12 м и масса 2750 т. Внешний и внутренний диаметры калориметра 8470 и 4580 мм соответственно (см., например, рис. 3.15 и рис. 3.28).

Сборка центрального и двух торцевых баррелей полномасштабного калориметра представляла собой уникальную по сложности научно-техническую задачу, не имевшую аналога в практике сооружения крупномасштабного исследовательского оборудования для физики высоких энергий [66]. Требуемая относительная точность вдоль диаметра собранного барреля была $1,2 \cdot 10^{-3}$, а в радиальном направлении необходимо было иметь точность 10^{-4} [109].

Все модули, созданные в Барселоне, Дубне, Аргонне и доставленные в ЦЕРН, перед окончательной сборкой баррелей тайл-калориметра в подземном экспериментальном зале ATLAS (на глубине 100 м) прошли процедуру предварительной сборки на поверхности (рис. 3.30). Задачей этой «предсборки» было выявление всех возможных непредвиденных проблем, которые необходимо было максимально избежать при окончательной сборке под землей в месте штатного расположения детектора. Кроме того, предполагалось отработать технологические процессы подготовки модулей к сборке и установки их в баррель, убедиться в возможности сборки баррелей с заданными жесткими проектными допусками, а также, благодаря полученному опыту, сократить время сборки баррелей в шахте.

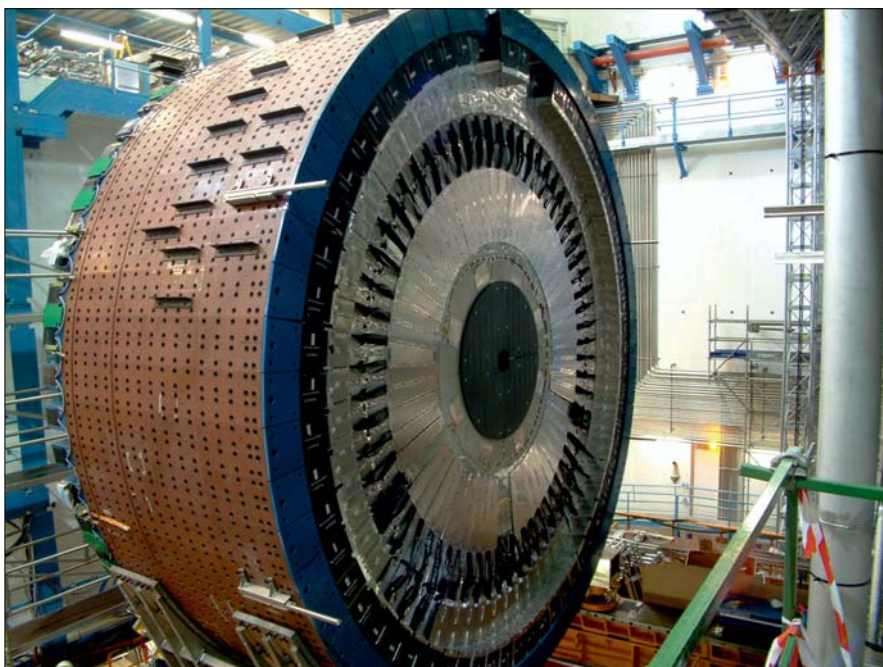
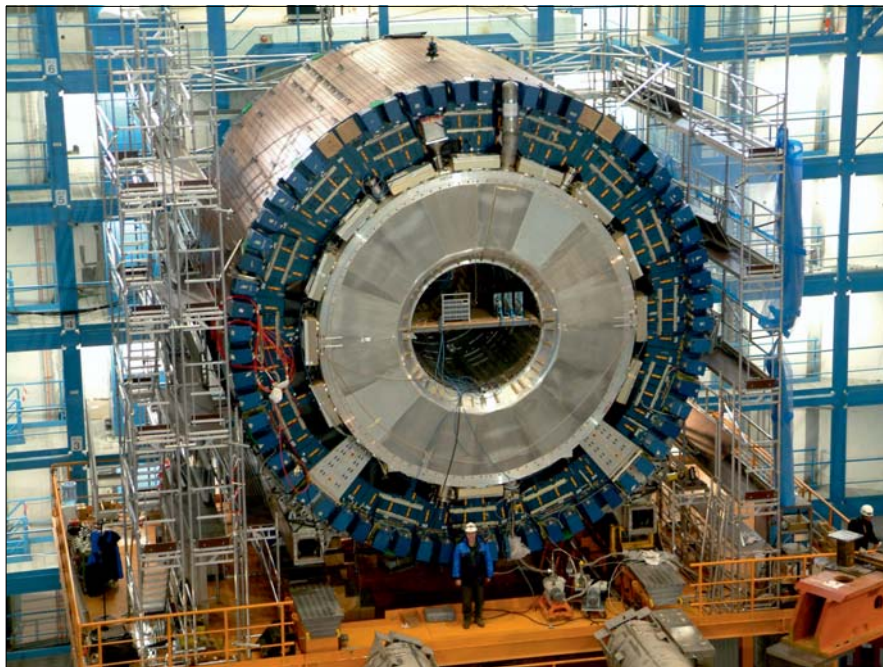


Рис. 3.28. Вверху: центральная (дубненская) секция барреля адронного калориметра (длина — 6,4 м, диаметр — 8470 мм, масса 1300 т, содержит 64 модуля, 7360 болтов, 832 штифта, 512 соединительных плит). Внизу: короткая торцевая секция барреля (состоит из 64 коротких модулей, длина — 3,2 м, диаметр — 8470 мм, масса — 700 т)



Рис. 3.29. Вверху: модуль — 1/64 часть всего барреля, содержит 19 субмодулей на балке (короткий модуль, соответственно, содержит 10 субмодулей), длина — 6,4 м (или 3,2 м), высота 1,95 м, масса 20 т (или 10 т). Внизу: субмодуль, склеенный из 32 мастерных и 200 спейсерных пластин, длина — 1,6 м, толщина 291,7 мм (или 341,2 мм), масса почти 900 кг



Рис. 3.30. Этапы предварительной сборки первого короткого (торцевого) барреля (из барселонских модулей) на поверхности

С целью прецизионного контроля точности сборки баррелей были разработаны сложные метрологические методы (прецизионная метрология), основанные на лазерных, фотограмметрических, теодолитных и других измерениях, были предложены и созданы специальные программы. Их использование позволяло прогнозировать изменение формы барреля по мере его сборки и успешно осуществлять предварительную его сборку с необходимой высокой проектной точностью.

При сборке на поверхности первого барреля с применением специальных защитных стальных прокладок (шимм) между модулями неожиданно была обнаружена весьма заметная пластическая деформация на внутреннем радиусе барреля. На рис. 3.31 показана эволюция этой деформации по мере установки модулей в баррель.

Расчеты, выполненные по разным алгоритмам В. Ю. Батусовым, М. В. Ляблиным (в ОИЯИ) и Дж. Прудфутом (Аргонн, США) и предсказывавшие ожидаемую деформацию барреля по мере установки очередных модулей, показывали наличие зазора для последнего модуля меньше номинального. Это обещало привести к недопустимому изменению формы барреля и было неприемлемо из-за опасности повреждения световых волокон на боковых поверхностях модулей.

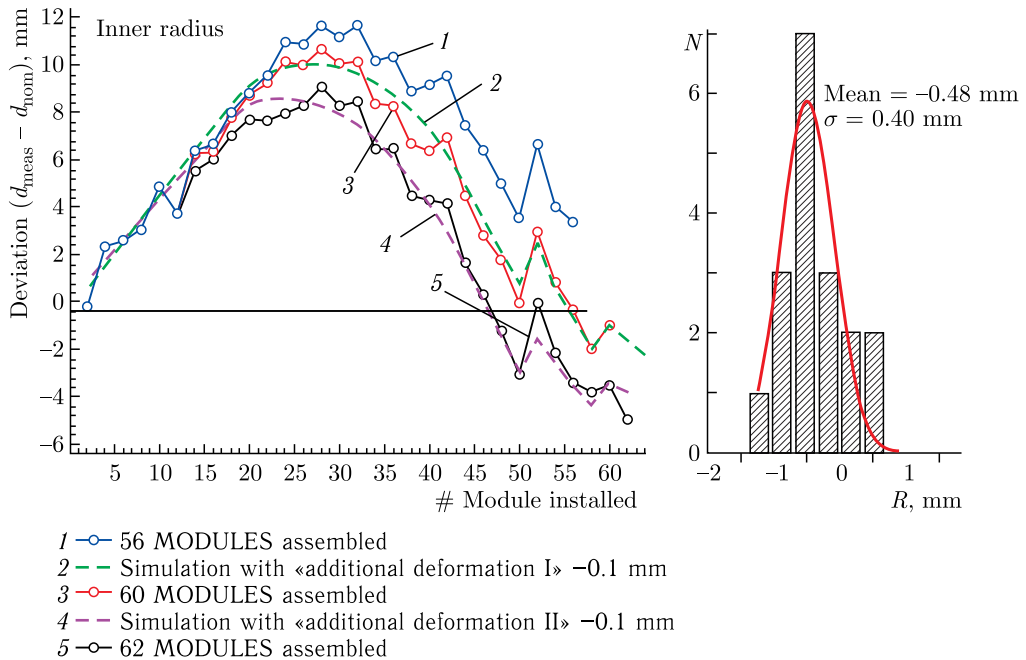


Рис. 3.31. Слева: измеренные и вычисленные значения внутреннего радиуса барреля. Впечатляет согласие между предсказанными (кривая 4) и измеренными (кривая 5) размерами. Справа: распределение разности (R) значений отклонений, измеренных экспериментально теодолитом и предсказанных специальной программой. Согласие в рамках 0,4 мм

Для решения этой проблемы — на основе тщательного расчета — Н. Д. Топилиным был предложен смелый способ собрать баррель при зазоре, меньшем номинальной ширины модуля. Идея состояла в том, чтобы последний модуль барреля, как клин, раздвинул ветви почти полностью собранного барреля, не вызвав нежелательных пластических деформаций. Сохранность световых волокон была обеспечена установкой дополнительных вертикальных прокладок толщиной 0,5 мм. Этот способ был успешно реализован (см. рис. 3.32, внизу). Последний, 64-й модуль легко вошел в баррель под собственным весом и занял свое место 14 апреля 2003 г. [66]. Сравнение расчетных данных и результатов наиболее точных измерений характеристик собранного барреля показало, что точность предсказаний составила 500 мкм. Это действительно впечатляющий результат, если принять во внимание, что работы производились с 64 объектами, каждый из которых был длиной 5,6 м и массой 20 т (центральный баррель).

На основе результатов измерения геометрии первого барреля на всех этапах его сборки была разработана стратегия выбора толщины шимм для последующей корректировки формы барреля в процессе его сборки в шахте, для чего была создана компьютерная программа (В. Ю. Батусов и М. В. Ляблин). Для сборки центрального барреля (рис. 3.33) была несколько изменена стратегия определения толщины шимм и создана другая компьютерная программа.

Помимо этого на этапе предсборки был разработан целый спектр вспомогательного технологического оборудования (рис. 3.34) для подъема и перемещения модулей на разных этапах сборки баррелей. Это оборудование было использовано при окончательной сборке в шахте.

30 октября 2003 г. в ЦЕРН была успешно завершена сборка центрального адронного барреля тайл-калориметра на поверхности земли (см. рис. 3.32, вверху). Возведение 1350-тонного барреля в пределах жестких проектных допусков, с постоянным (on line) контролем механической точности, являлось уникальной технической операцией.

Бесценный опыт, накопленный при монтаже (предсборке) баррелей на поверхности, был в полной мере использован при окончательной сборке всех трех бочек (баррелей) калориметра. Все эти наземные и подземные монтажные работы были выполнены с активным и на многих этапах даже ключевым участием инженеров и техников ОИЯИ под руководством Н. Д. Топилина.

После завершения предварительной (на поверхности) сборки центральная бочка (второй баррель) калориметра (состоящая из 64 модулей) была разобрана, однако не до конца: блок из 8 нижних модулей вместе со всеми вспомогательными механизмами поддержки был перевезен и опущен двумя 140-тонными кранами на экспериментальную площадку под землей (рис. 3.35), где были завершены работы по полной сборке всех 64 модулей.

При этом после сборки первых 30 модулей внутрь центрального барреля был установлен жидкоаргоновый электромагнитный калориметр, затем сборка барреля была продолжена. На рис. 3.36 показаны фрагменты сборки барреля в шахте эксперимента ATLAS.

В декабре 2004 г. дубненский баррель тайл-калориметра был полностью собран в шахте [53]. В 2005 г. он был перевезен на свое рабочее место в



Рис. 3.32. Вверху: сборка барреля из дубненских модулей на поверхности завершена 30 октября 2003 г. Внизу: установка последнего, 64-го модуля при сборке в шахте короткого барреля. 23 мая 2006 г.



Рис. 3.33. Этапы сборки второго (центрального) барреля: на поверхности (вверху) и в шахте (внизу)



Рис. 3.34. Технологическое оборудование для манипулирования модулями

центр экспериментального зала (на нулевую координату установки ATLAS) с помощью специально созданного для этого механизма транспортировки с использованием воздушной подушки. На освободившемся под землей месте его «досборки» была завершена сборка торцевой части калориметра ЕВС, а с противоположной стороны зала — ЕВА, которые также прошли этапы



Рис. 3.35. Этапы транспортировки баррелей в шахту ATLAS

предварительной сборки на поверхности. В середине 2006 г. все работы по полномасштабной сборке калориметра ATLAS были полностью завершены (рис. 3.36). В заключение был произведен расчет положения осей собранных баррелей и осуществлено позиционирование всего адронного калориметра по оси пучка с точностью 1 мм [66].

Итак, при самом непосредственном участии сотрудников ОИЯИ адронный калориметр установки ATLAS массой 2750 т был собран с точностью 0,12 % по внешнему диаметру 8,5 м [68, 109]. Полная готовность тейл-калориметра ATLAS к работе на пучке LHC описана в [64, 137, 138].

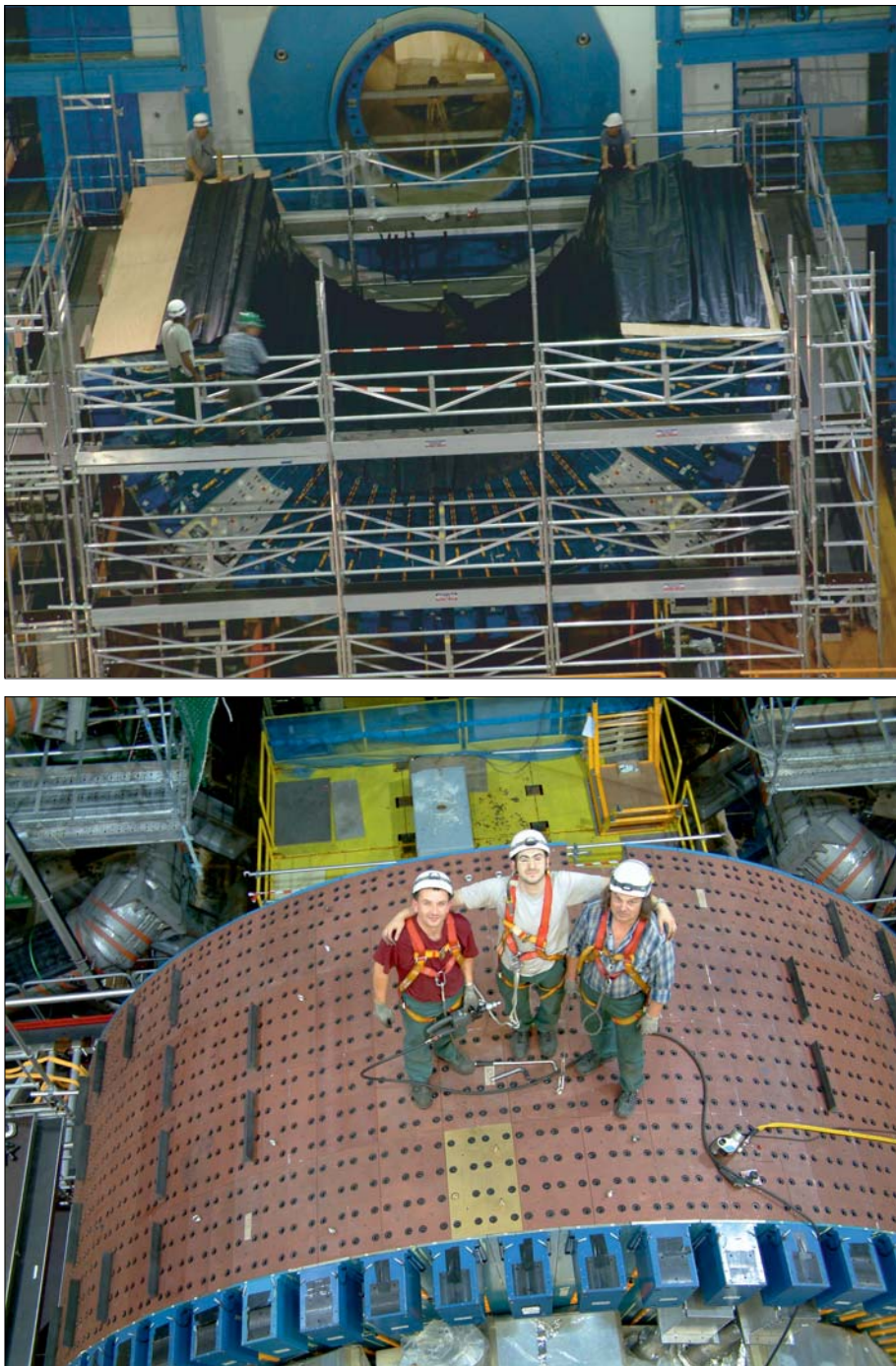


Рис. 3.36. Вверху: начальный этап сборки барреля в шахте. Внизу: сборка последнего, третьего, цилиндра тайл-калориметра в шахте ATLAS успешно завершена 23 мая 2006 г. Из [66]

В 2006–2009 гг., уже после завершения этапа сборки адронного тайл-калориметра, сотрудники НЭОМАП приняли на себя ответственность за поддержание калориметра в рабочем состоянии (Maintenance & Operation). Сюда относилось как on-call экспертное дежурство, так и организация дежурств (shifts) в ATLAS Control Room, проверка и наладка электроники считывания тайл-калориметра, настройка, модернизация и паспортизация источников низковольтного питания для электроники фотоумножителей и т. п. Помимо этого в здании 175 ЦЕРН проводились работы с тестовым фрагментом калориметра (Slice of TileCal), который полностью идентичен тем, что были установлены в детекторе ATLAS. Постоянный контроль за этим фрагментом, его калибровки, исследования его поведения позволяли прогнозировать характер работы соответствующих элементов тайл-калориметра в шахте в условиях реального эксперимента [139–142].

Далее с целью обеспечения надежного штатного функционирования тайл-калориметра установки ATLAS во время набора данных [67, 69, 143, 144] сотрудники ОИЯИ участвовали в модернизации аппаратуры контроля и диагностики работы электроники калориметра, а также в работах по ремонту, наладке и сертификации элементов низковольтного питания.

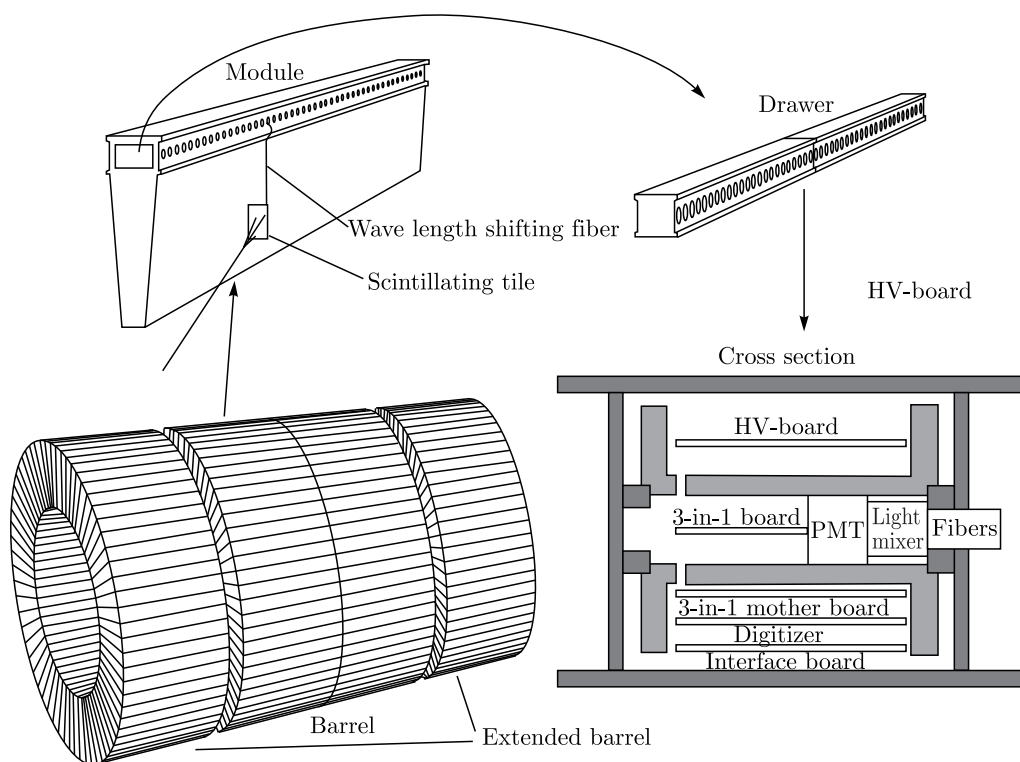


Рис. 3.37. Расположение ящиков с электроникой считывания (drawers) в тайл-калориметре ATLAS

Так, в течение 2007–2008 гг. с их решающим участием был выполнен ремонт электроники считывания (Front End). Все 256 длинных ящиков с электроникой (drawers) были отремонтированы (рис. 3.37). Для этой цели были организованы два рабочих места в здании 171 ЦЕРН, где две группы сотрудников работали параллельно (рис. 3.38). Для этого ремонта были также организованы 4 специализированных рабочих места непосредственно в шахте эксперимента.

Сотрудники ОИЯИ вели контроль работы тайл-калориметра в качестве «экспертов по вызову» (по Detector Control System) и осуществляли техническую поддержку работы всего детектора ATLAS.

ОИЯИ участвовал в разработке и запуске аппаратуры и математического обеспечения для устройства геометрического контроля адронного калориметра ATLAS.

3.3.3. Сцинтилляционные пластины для Minimum Bias Trigger Scintillators. Как известно, большая часть pp -взаимодействий при энергиях LHC на установке ATLAS происходит с малой передачей импульса. Для того, чтобы исследовать такого типа взаимодействие, необходимо в момент его возникновения иметь все детектирующие системы ATLAS полностью готовыми к регистрации и записи характеристик этого взаимодействия (события). Такую роль обеспечивает триггер, который «запускает установку», тем или иным образом реагируя на реальное взаимодействие сталкивающихся частиц.

На начальной стадии работы детектора ATLAS (при малой светимости LHC) такой триггер должен запускать установку при каждом реальном столкновении частиц, минимальным образом завися от конкретной кинематики продуктов столкновения. Такой триггер обычно носит название минимум-байес (minimum bias). Для достижения максимальной эффективности регистрирующие элементы такого устройства должны быть максимально возможного размера и должны быть расположены максимально близко к линии столкновения пучков.

В 2004 г. по просьбе Марцио Несси сотрудники ОИЯИ (А. М. Артиков, Ю. А. Будагов и Д. Чохели) предложили использовать харьковский сцинтиллятор типа UPS 923D для изготовления многометровых сцинтилляционных дисков — главных детектирующих элементов Minimum Bias Trigger Scintillators (MBTS) [145]. Детекторы MBTS было предложено установить на торцах жидкоаргонового калориметра (рис. 3.39).

Большие и малые трапецеидальные сцинтилляторные пластины (рис. 3.39, внизу) были вырезаны из харьковского пластика в Опытном производстве ОИЯИ под руководством А. М. Артикова и Д. Чохели. Затем эти пластины были переправлены в Мичиганский университет (США), где были собраны и налажены 8 секций для MBTS-детекторов. Окончательная сборка двух колец полномасштабных MBTS-детекторов была произведена в ЦЕРН.

В 2005 г. детекторы MBTS были установлены в ATLAS (рис. 3.40) и работали до остановки LHC в 2012 г. Они были использованы при наборе данных на малой интенсивности LHC, в программе столкновений тяжелых ионов и других задачах. Эти детекторы проработали долго, поскольку были сделаны

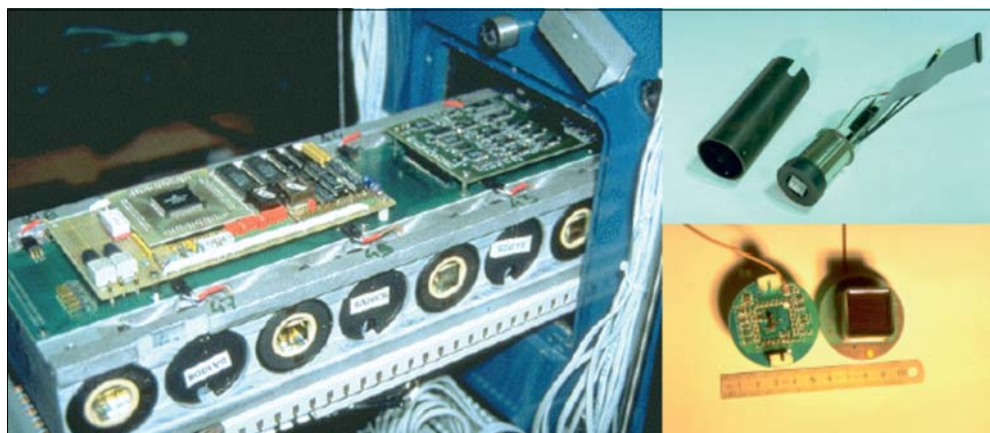


Рис. 3.38. Вверху: ремонт ящиков с электроникой считывания в здании 171 ЦЕРН, где было отремонтировано 29 таких ящиков. Внизу: внешний вид одного из ящиков вместе с элементами электроники

из радиационно стойкого харьковского пластика, созданного при участии ЛЯП и зарекомендовавшего себя в эксперименте CDF.

Эффективная работа детектора MBTS и его крайняя полезность при отборе физических событий явились причиной создания нового детектора — MBTS-II во время модернизации установки ATLAS [148, 149]. Для этой

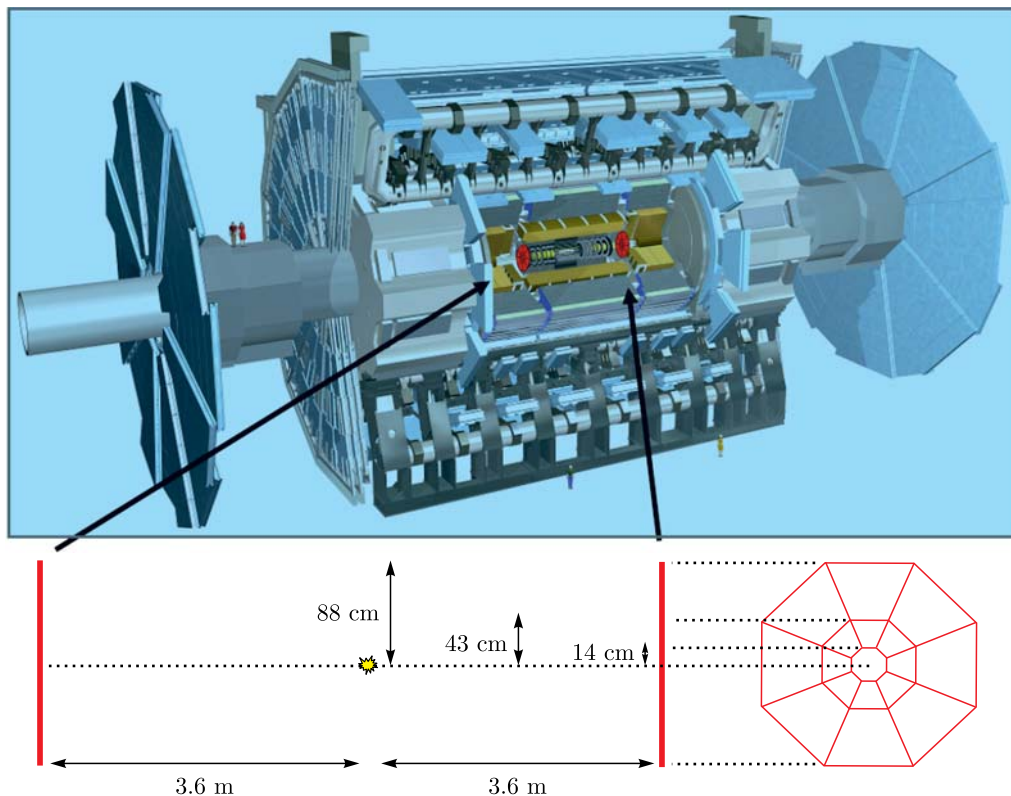


Рис. 3.39. Счетчики MBTS располагались перед жидкоаргоновыми торцевыми криостатами и полностью покрывали радиальный размер внутреннего детектора ATLAS. Из [145, 146]

цели вновь были выбраны хорошо зарекомендовавшие себя сцинтилляторы из Харькова [146], которые были установлены в 2014–2015 гг. (рис. 3.41) и проработали еще почти два года в условиях очень высокой радиационной загрузки (до 10 кГр/год), практически полностью исчерпав свой ресурс [147]. В работах по замене сцинтилляторов принимали участие А. М. Артиков, Д. Чохели и А. В. Симоненко.

3.3.4. Контрольно-измерительные работы на установке ATLAS. Как в ходе предварительной сборки частей адронного калориметра на поверхности, так и во время финальной его сборки под землей ответственность за контрольные измерения и окончательный обмер всей собранной конструкции лежала на сотрудниках НЭОМАП В. Ю. Батусове и М. В. Ляблине. Они вошли в группу измерителей ЦЕРН на основании соглашения «ATLAS Agreement 114/02», подписанного в начале 2003 г. со стороны ОИЯИ А. Н. Сисакяном и Н. А. Русаковичем, а со стороны ЦЕРН — М. Несси и М. Нордбергом.

Иллюстрацией успешной сборки центрального барреля в подземном экспериментальном зале установки ATLAS служит схематичное изображение (рис. 3.42), где точками представлены координаты измеренных на одной из



Рис. 3.40. MBTS-детекторы расположены в центре установки ATLAS

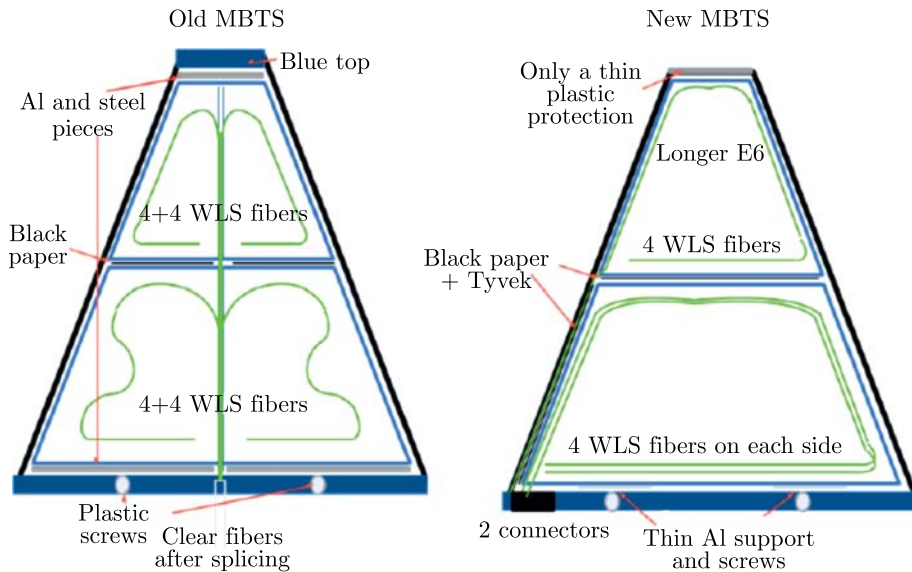


Рис. 3.41. Конфигурации старых и новых сцинтилляционных элементов MBTS-детекторов. Из [147]

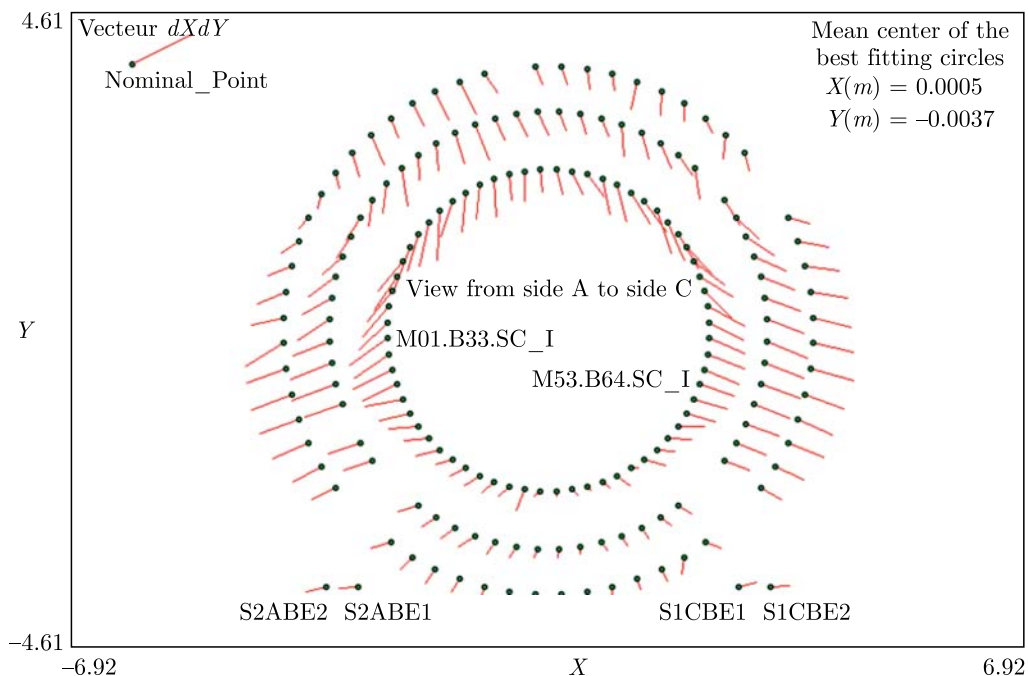


Рис. 3.42. Отклонения от номинальных позиций координат измеренных геодезических меток на одной из сторон собранного барреля

сторон барреля геодезических меток. Красные линии — векторы отклонения координат измеренных точек от номинальных теоретических координат этих точек, т. е. отклонение от идеального круга для трех различных радиусов. Величины отклонений представлены в верхнем левом углу рис. 3.42.

После успешного завершения сборки и контрольных измерений в подземном экспериментальном зале установки ATLAS центрального барреля (рис. 3.43) и двух торцевых баррелей адронного калориметра в рамках НЭОМАП была сформирована группа (рук. Ю. А. Будагов), взявшая на себя ответственность по обеспечению геодезического контроля всей установки ATLAS и по дальнейшему развитию R&D (НИОКР) высокоточных лазерных методов контроля. В 2006 г. дирекциями ОИЯИ и ЦЕРН было подписано первое дополнение к соглашению 114/02 — «Amendment to ATLAS agreement 120-02» («Surveyors»), позволившее сотрудникам НЭОМАП принимать участие во всех стадиях геодезического контроля установки ATLAS и успешно развивать новые высокоточные методы контроля, базирующиеся на лазерной методике.

С самого начала строительства подземного экспериментального зала установки ATLAS в 2003 г. и по настоящее время (2017 г.) сотрудники отдела НЭОМАП В. Ю. Батусов и М. В. Ляблин отвечают за контрольные измерения положения базовых реперных точек на полу и стенах зала. В 2013 г. к ним присоединился Н. С. Азарян, а в 2016 г. — А. А. Плужников. На двух верхних фотографиях рис. 3.44 показано, как измерители из ОИЯИ работают с опти-

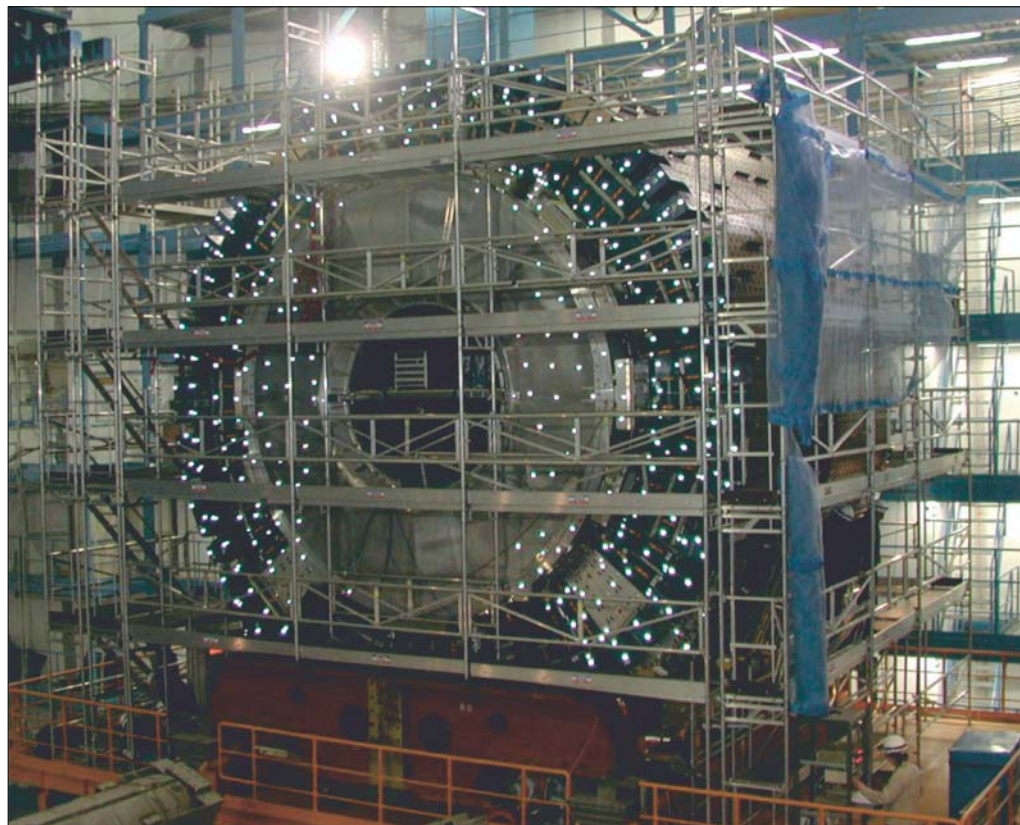


Рис. 3.43. Собранный баррель подготовлен к измерениям с помощью фотограмметрического оборудования

ческими тахеометрами, а на двух нижних — с лазерными трекерами фирмы «Лейка». Контрольные поверки базовых реперных точек проводятся не реже одного раза в год в период остановки ускорителя. На рис. 3.45 красными линиями показаны все связи (около 1800), т. е. измерения расстояний между реперными точками, осуществленные в ходе поверки. Периодическое обновление этих данных необходимо в связи с постоянным изменением как формы подземного зала установки ATLAS, так и пространственного расположения пучка LHC. В среднем можно констатировать, что имеет место непрерывный подъем пола на уровне 0,25 мм в год (графики движения различных точек пола с 2003 по 2015 г. представлены на рис. 3.46) и примерно на 1 мм сближение стен экспериментального зала в средней части. Этот подземный зал — каверну можно представить как пузырь воздуха в воде, и, соответственно, архимедова сила толкает такой пузырь вверх. Актуальная информация о движении базовых реперных точек необходима для корректировки положения всех субдетекторов ATLAS относительно пучка LHC, для обеспечения лучшего акцептанса установки. Она используется также для юстировки относительно пучка ускорителя всех новых элементов детектирующих систем, постоянно добавляемых в ходе эксплуатации установки ATLAS.



Рис. 3.44. Сотрудники НЭОМАП В. Ю. Батусов, М. В. Ляблин, А. А. Плужников и Н. С. Азарян за работой с измерительными приборами

На рис. 3.47 представлены финальные (после окончательной юстировки) координаты центров всех субдетекторов установки ATLAS. Измерения, юстировку и расчет проводила группа инженеров с непосредственным участием сотрудников ОИЯИ. Стоит заметить, что точность позиционирования всех субдетекторов составляет величину не хуже 0,1 мм относительно базовых точек ATLAS и достигает примерно 0,75 мм при учете связи экспериментального зала ATLAS с квадрупольными магнитами фокусировки ускорителя. Смещение координат рассчитанных центров (рис. 3.47), достигающее несколь-

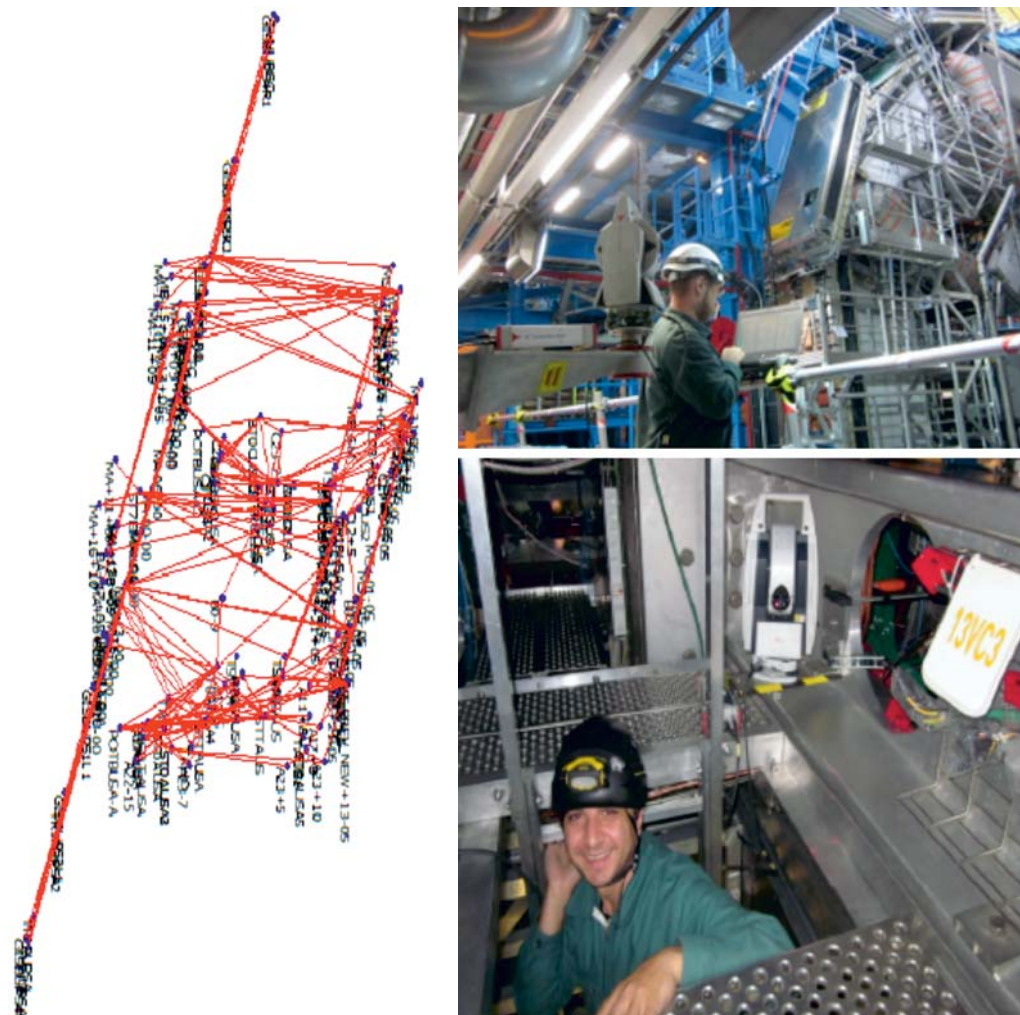


Рис. 3.45. Слева: схема контрольных измерений базовых реперных точек в подземном экспериментальном зале установки ATLAS. Справа: сотрудники НЭОМАП во время измерений

ких миллиметров, указывает на результат юстировки относительно заданного номинала центра, отличающегося зачастую от нулевого значения. Так, например, номинальное значение по координате X для ЕСТА-НО составляет -4 мм. Представленные данные относятся к завершающей стадии большой технической остановки 2013–2015 гг. Информация о расположении субдетекторов использовалась для анализа экспериментальных данных Run-II. Также ежегодно обновляется инженерная база данных установки ATLAS, позволяющая непрерывно следить за текущим расположением субдетекторов и поддерживающих конструкций.

Помимо контроля базовых реперных точек измерительная группа Ю. А. Будагова принимала участие практически во всех метрологических

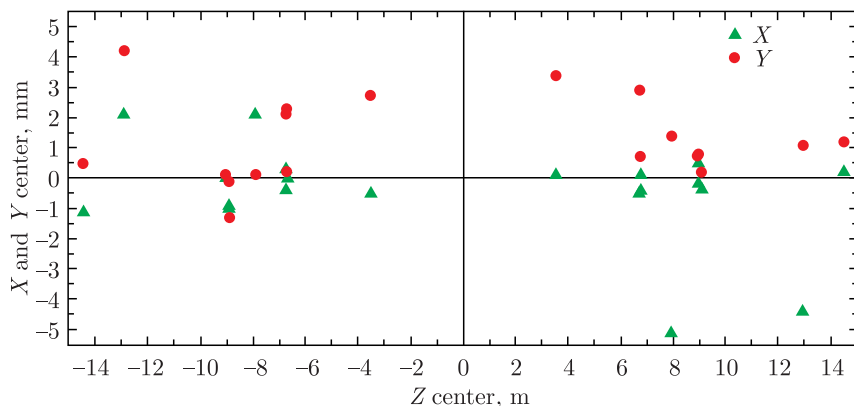


Рис. 3.46. Вертикальное смещение координат базовых реперных точек пола в подземном зале установки ATLAS с 2003 по 2015 г.

	X, mm	Y, mm	Z, m		X, mm	Y, mm	Z, m
ВРА-НО	0.2	1.2	14.4657	EBA-cent	-0.5	2.7	-3.5195
ВРА-IP	-0.4	0.2	9.0482	EBA-flange	0.0	2.3	-6.6691
ЕСТА-НО	-4.4	1.1	12.9017	EBA-backface	0.0	2.3	-6.7459
ЕСТА-IP	-5.1	1.4	7.9114	EBC	0.3	2.1	-6.7459
SWA-НО	-0.2	0.8	8.9267	VA-C	-0.9	-1.3	-8.9114
SWA-IP	0.1	0.7	6.7470	SWC-IP	-0.4	0.2	-6.7434
VA-A	0.5	0.7	8.9146	SWC-НО	-1.0	-0.1	-8.9242
EBA	-0.4	2.9	6.7398	ECTC-IP	2.1	0.1	-7.9092
EBA-backface	-0.5	2.6	6.7398	ECTC-НО	2.1	4.2	-12.9000
EBA-flange	-0.5	2.9	6.6678	ВРА-IP	0.0	0.1	-9.0408
EBA-cent	0.1	3.4	3.5178	ВРА-НО	-1.1	0.5	-14.4600

Рис. 3.47. Координаты центров всех субдетекторов установки ATLAS

работах как во время строительства установки ATLAS, так и в периоды технических остановок. С 2003 г. по настоящее время опубликовано порядка 500 технических отчетов в системе EDMS (Engineering&Equipment Data Management Service).

Коллаборация ATLAS по достоинству оценила вклад сотрудников ОИЯИ в контрольно-измерительные работы на установке. 9 октября 2014 г. в ЦЕРН прошла церемония вручения наград за выдающиеся достижения на установке ATLAS в период первого запуска Большого адронного коллайдера (2009–2012 гг.) во всех областях кроме анализа физических данных. Среди награжденных была группа измерителей НЭОМАП (рис. 3.48) — Николай Азарян, Виталий Батусов, Михаил Ляблин, а также Дирк Мергелькухл (ЦЕРН). Они были отмечены за вклад в метрологические контрольные измерения компонентов детекторов ATLAS и его несущих конструкций, а также за исследовательские работы по развитию прецизионной метрологии нового поколения.



Рис. 3.48. Слева: руководитель коллаборации ATLAS Дэйв Чарлтон и председатель совета коллаборации Говард Гордон с награжденными Михаилом Ляблиным и Виталием Батусовым в ЦЕРН. Справа: Николай Азарян и Юлиан Будагов в ЛЯП



Рис. 3.49. Юстировка реперных точек сборочного стола сектора нового детектора New Small Wheel

Параллельно со всеми текущими измерениями в подземном зале установки ATLAS, выполняемыми измерительной группой отдела НЭОМАП в рамках уже 4-го дополнения к соглашению ОИЯИ–ATLAS «Surveyors», продленного в 2015 г. до 2019 г., дубненские сотрудники принимают участие в работах по

модернизации установки ATLAS. Так, в 2016 г. была начата сборка корпуса центральной части нового внутреннего детектора ATLAS, который должен будет заменить старый во время третьей большой остановки (LS3) ускорителя (2023–2025 гг.).

С 2014 г. сотрудники ОИЯИ принимали участие в подготовке проекта нового малого мюонного колеса (New Small Wheel (NSW)), а в 2017 г. были начаты измерительные работы по подготовке высокоточных столов (рис. 3.49) для сборки секторов NSW, которое заменит старое колесо Small Wheel во время второй большой остановки (LS2) ускорителя (2018–2019 гг.).

3.3.5. Работы по подготовке к приему и обработке данных. Практически одновременно с важнейшими работами по созданию адронного калориметра ATLAS сотрудники ОИЯИ включились в систематическое изучение характеристик как первых макетов, так и полноценных субмодулей и модулей этого прибора. Такие исследования были важны для правильного понимания того, как поступающая по различным каналам считывания информация соответствует тем физическим процессам, которые ее вызывают (Data Preparation).

Уже в 1996 г. были обработаны результаты первых тестовых облучений макетов модулей калориметра в пучках ускорителей ЦЕРН. Была получена детальная информация об энерговыделении электронов, энергетическом разрешении и величине e/h -отношения в зависимости от параметров налетающей частицы [150, 151]. Соотношение e/h характеризует величину различия («нескомпенсированности») отклика калориметра на электромагнитную и адронную компоненты ливня. Если $e/h > 1$, то калориметр считается нескомпенсированным.

Рабочие характеристики тайл-калориметра были изучены при анализе данных от тестовой экспозиции на пучке ускорителя SPS [152–154]. На основе этих результатов был разработан алгоритм реконструкции адронных ливней в калориметре [155–158].

В 1999 г. сотрудники группы тайл-калориметра ОИЯИ провели изучение характеристик комбинированного и адронного тайл-калориметров. В частности, был исследован отклик калориметра на пионы и электроны [159–161] (рис. 3.50). При этом отклик на отдельные заряженные пионы изучался путем полного моделирования [162]. Были исследованы боковые и продольные профили адронных ливней, регистрируемых прототипом железосцинтилляционного адронного тайл-калориметра [163, 164]. Была получена детальная экспериментальная информация об откликах прототипа адронного калориметра (нулевого модуля) на прохождение пионов и электронов [151, 165, 166], и определена его нескомпенсированность, среднее значение $e/h = 1,362 \pm 0,006$ [167]. Результаты были соотнесены с имевшимися данными и с расчетами, выполненными по методу Монте-Карло [168].

В 2000 г. было выполнено восстановление энергии адронов в прототипе комбинированного адронного калориметра ATLAS, включающего в себя свинцово-жидкоаргоновую электромагнитную и железосцинтилляционную адронную части [160, 169–173]. При этом использовались только известные e/h -отношения и калибровочные постоянные. Данный алгоритм приводил

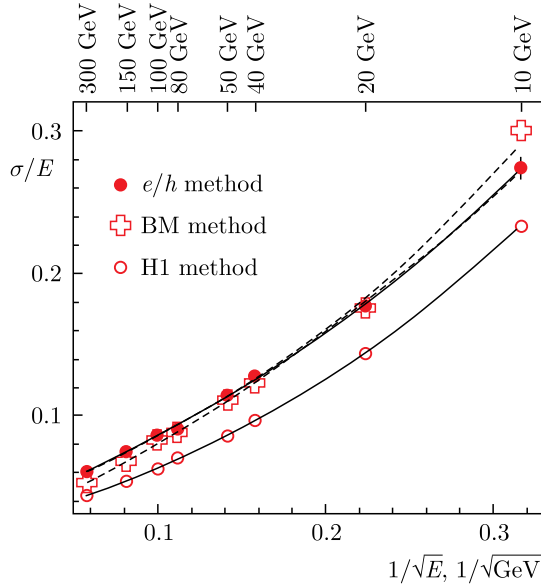


Рис. 3.50. Энергетическое разрешение (для пионов и электронов с энергией 10–300 ГэВ), полученное различными методами. Из [159]

к быстрому восстановлению энергии и мог быть использован в триггере первого уровня. Были исследованы также продольные и поперечные профили адронных ливней [163, 174]. Были изучены возможности адронных (центрального и торцевого) калориметров установки ATLAS при регистрации заряженных пионов [159, 175]. Была предложена новая параметризация профиля продольного адронного ливня, в которой была учтена нескомпенсированность калориметров, а также разработан алгоритм описания этого ливня в комбинированном калориметре [173].

Сотрудники ОИЯИ приняли участие в измерении спектра энергетических потерь мюонов с помощью 5,6-метрового детально сегментированного модуля адронного калориметра на пучке ускорителя SPS ЦЕРН [176]. Среди результатов этой работы можно отметить первое измерение поправки к упругому формфактору железа $\Delta_{\text{Fe}}^{\text{el}} = 1,63 \pm 0,17(\text{стат.}) \pm 0,23(\text{сист.})$ для мюонного тормозного излучения [176].

В 2001 г. была проведена калибровка ячеек модуля адронного тайл-калориметра, при этом использовался пучок с энергией 100 ГэВ, падающий под углом $\theta = 20^\circ$. Получено значение калибровочного коэффициента $1,1 \pm 0,01$ с RMS $0,027 \pm 0,006$ [177].

В 2002 г. был предложен метод определения абсолютной энергетической шкалы отдельно взятого модуля тайл-калориметра. Он был основан на использовании e^- , π^- -пучков с энергией 10–300 ГэВ SPS ЦЕРН. Были определены электронные и пионные калибровочные константы, получены e/h -отношения. Разработанное в ОИЯИ программное обеспечение было успешно применено для энергетической калибровки ячеек модулей тайл-кало-

риметра, а калибровочные константы были включены в его калибровочную базу данных [178].

С участием сотрудников ОИЯИ был разработан и внедрен новый беспараметрический метод реконструкции энергии адронов в комбинированном адронном калориметре [169, 179]. Он использовал только известные величины нескомпенсированностей электромагнитной и адронной частей калориметра и калибровочные константы, определенные при экспозиции калориметра электронами. Линейность реконструкции средних величин энергий была 1%. Относительное энергетическое разрешение — $58\%/\sqrt{E} + 2,5\%$.

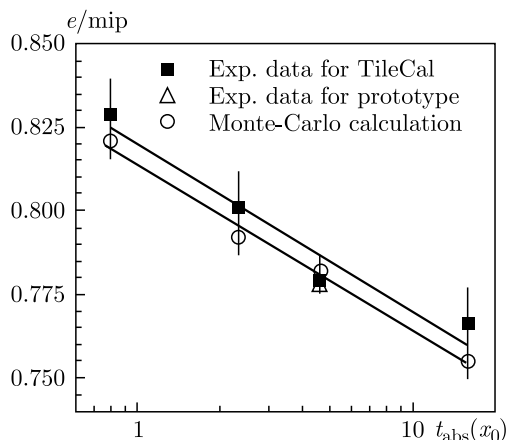
На основе различного пространственного развития электромагнитного и адронного ливней был разработан и опробован новый алгоритм выделения электронных и пионных событий в адронном калориметре. Получена высокая (на уровне 99,8%) эффективность распознавания событий [180]. На базе трехмерной параметризации адронных ливней, полученных из данных с тайл-калориметра, был предложен новый метод быстрого монте-карловского моделирования откликов адронного калориметра [181].

На ускорителе SPS ЦЕРН, используя модули тайл-калориметра ATLAS, сотрудники ОИЯИ участвовали в измерениях энергетических спектров и сечений фотоядерных взаимодействий 180 ГэВ-ных мюонов с железом [179, 180, 182].

С целью детального изучения отклика и определения шкалы электромагнитной энергии тайл-калориметра ATLAS в 2004 г. 12% его модулей были подвергнуты облучению электронными пучками различной энергии под различными углами. Сотрудниками ОИЯИ были проведены измерения e/h -отношения. Был предложен и применен метод пионной калибровки отдельного модуля. Наблюдалась хорошая энергетическая однородность ($\pm 1\%$). Разрешение пионной энергии для одного модуля составляло $(6,0 \pm 0,3)\% \times \sqrt{\text{ГэВ}}$ для 180 ГэВ, что сравнимо со значением $4,8\% \times \sqrt{\text{ГэВ}}$, ожидаемым из общих физических характеристик [183]. Работа группы из ОИЯИ была направлена на определение калибровочных констант электромагнитной энергии модулей калориметра с использованием различных методов [184–186].

В 2006 г. группа ОИЯИ адронного тайл-калориметра ATLAS продолжала активное участие в исследовании свойств адронного калориметра (Data Preparation), что, как уже отмечалось, было необходимо для проведения адекватного анализа данных. В частности, на основе данных, набранных при экспозиции тайл-калориметра в электронном пучке различной энергии, с решающим участием сотрудников НЭОМАП было изучено поведение величины отношения e/mip (mip — минимально ионизирующая частица) как функции толщины поглотителя [187]. Впервые был экспериментально обнаружен так называемый эффект перехода (transition effect), когда $e/mip < 1$ и имеет место явная зависимость от толщины поглотителя (рис. 3.51). Отношение e/mip логарифмически падает с ростом этой толщины, что совпадает с ожиданиями на основе моделирования в пакете GEANT4. Эти результаты были важны для прецизионного определения электромагнитной шкалы энергии тайл-калориметра.

Рис. 3.51. Отношение e/mip как функция толщины поглотителя t_{abs} тайл-калориметра (в радиационных длинах). Квадраты — экспериментальные данные; треугольник — результат, полученный на прототипе; кружки — результаты моделирования. Из [187]



Группой были выполнены детальные расчеты характеристик тайл-калориметра на основе моделирования прохождения через калориметр электронов и пионов [188]. Была изучена чувствительность e/h -отношения тайл-калориметра к протонному загрязнению пучков положительно заряженных пионов. Оказалось, что поправки на такое загрязнение и поправки, связанные с выбором критериев отбора отношения e/π , практически компенсируют друг друга [189].

В 2007 г. было продолжено исследование шкалы электромагнитной энергии тайл-калориметра. Глобальные калибровочные константы, необходимые для электромагнитной калибровки калориметра, равны 1,15 пК/ГэВ при использовании метода плоского фильтра и 1,04 пК/ГэВ — для метода подгоночного фильтра [190]. Показано, что выбор критериев отбора данных имеет заметное, но не ключевое влияние на величину нескомпенсированности калориметра [191].

Как уже упоминалось, полностью оборудованный фрагмент детектора ATLAS в 2004 г. был подвержен облучению тестовыми пучками при энергии 10–350 ГэВ SPS (Super Proton Synchrotron) в ЦЕРН. В 2008 г. дубненской группой на основе анализа результатов этого облучения был разработан и применен метод локальной адронной калибровки калориметрического комплекса ATLAS [191] и был проанализирован отклик центральных калориметров на пионы [69, 192, 193], в том числе и низкой энергии (3–9 ГэВ) [194]. Помимо этого был разработан и применен нейросетевой алгоритм расчета энергетических потерь адронного ливня в мертвом веществе калориметрического комплекса между жидкоаргоновым и тайл-калориметрами. В результате было значительно улучшено энергетическое разрешение для адронов и достигнуто его проектное значение $50\%/\sqrt{E} + 3\%$ [195]. Полученные участниками группы результаты измерения калибровочных констант электромагнитной шкалы для 11% всех модулей тайл-калориметра изложены в [196]. Все источники неопределенностей этих констант были тщательно исследованы. Проведенный анализ основывался на усовершенствованиях в области калибровки калориметра (как с цезиевым источником, так и на основе

системы «впрыска заряда»), а также на использовании метода фитирования для реконструкции энергии.

Таким образом, за период с 1994 по 2008 г. сотрудниками дубненской группы тайл-калориметра был проведен всесторонний и многоплановый анализ (рук. Ю. А. Кульчицкий) базовых характеристик адронного тайл-калориметра и комбинированного калориметра ATLAS. Эти работы проводились методом Монте-Карло с использованием экспериментальной информации, накопленной при облучении как прототипа и реальных модулей тайл-калориметра, так и прототипа и реальных модулей комбинированного калориметра (жидкоаргонового электромагнитного и адронного тайл-калориметров) в пучках пионов, протонов, электронов и мюонов с энергией 10–350 ГэВ на ускорителе SPS (ЦЕРН). В частности, была проведена детальная электромагнитная калибровка модулей адронного тайл-калориметра, что позволило ввести его энергетическую шкалу. Был разработан и применен метод локальной адронной калибровки калориметрического комплекса эксперимента ATLAS, который дал возможность определять энергию одиночных адронов с проектной точностью, и т. п.

Итак, начатые в 1994 г. под руководством Ю. А. Будагова работы по созданию элементов адронного тайл-калориметра в ОИЯИ успешно завершились 3 июля 2002 г., когда последний из 65 собранных в ОИЯИ модулей был доставлен в ЦЕРН без каких-либо повреждений. Эти «дубненские» модули центрального барреля адронного тайл-калориметра были сначала использованы при тестовой полной сборке детектора на поверхности, а потом при окончательной сборке под землей на глубине 100 м, где установка ATLAS успешно проработала в штатном режиме до 2014 г.

Во всех этих важных работах активное, а порой и решающее, участие принимали инженеры и техники ОИЯИ. Одним из ключевых руководителей этих работ был Н. Д. Топилин (рис. 3.52), который в апреле 2009 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности приборы и методы экспериментальной физики «Разработка конструкции и создание модульного ядерного абсорбера адронного калориметра установки ATLAS».

Отметим еще раз, что им были предложены принципиально новые решения ряда ключевых структурных элементов поглотителя адронного тайл-калориметра. Эти решения составили существенную часть раздела «Механика» технического проекта (TDR) ATLAS. При решающем участии Н. Д. Топилина было осуществлено массовое производство 300 000 стальных пластин поглотителя. Были созданы главные структурные элементы калориметра — submodule и модули, для чего были организованы производственные участки и разработана методика контроля, обеспечившая достижение проектных допусков (см., например, рис. 3.29). Под его непосредственным руководством были сконструированы и изготовлены транспортные опоры для перевозки в ЦЕРН 20-тонных модулей и специализированное подъемно-такелажное оборудование (см., например, рис. 3.34). И, наконец, были разработаны технологические схемы и осуществлена сборка трех секций адронного калориметра ATLAS с применением принципа шиммирования, выполнением контрольных измерений и предсказательного расчета эволюции формы баррелей в процессе

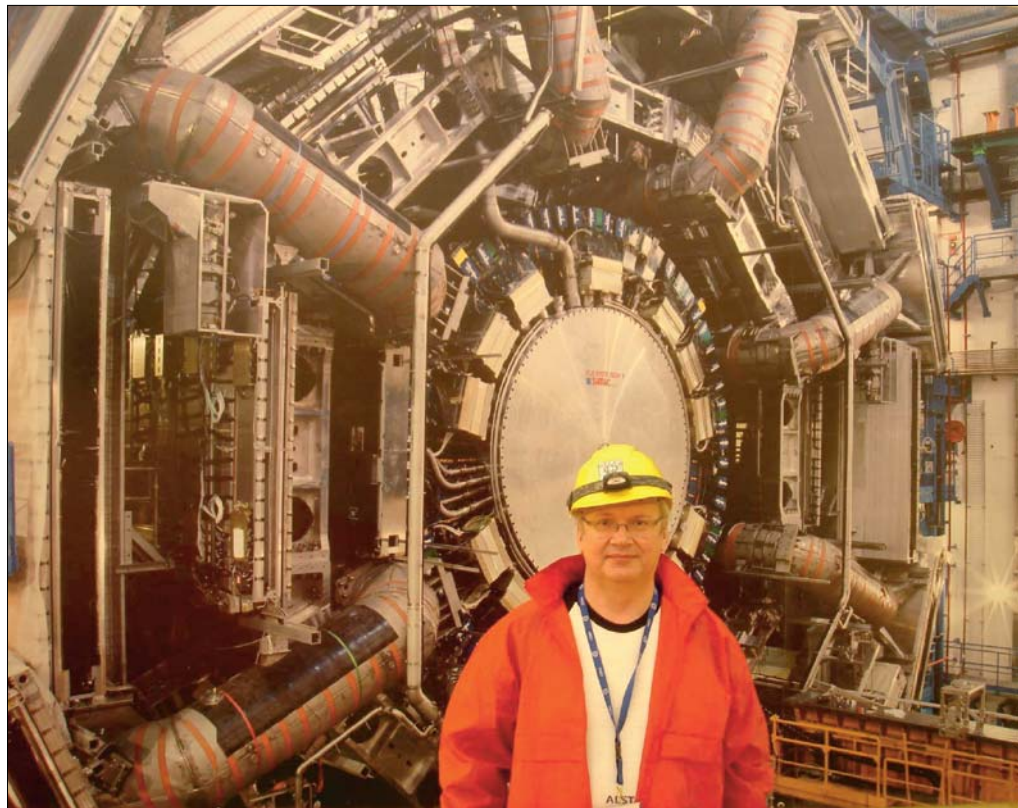


Рис. 3.52. Н. Д. Топилин около тайл-калориметра ATLAS

их сборки (см., например, рис. 3.32). Была предложена и реализована идея решения ключевой проблемы монтажа баррелей — под тяжестью 64-го модуля «ветви» барреля раздвигаются в пределах упругих деформаций (см. рис. 3.32, внизу). Эти работы были самым высоким образом оценены коллаборацией ATLAS.

В целом можно отметить, что разработанные в ОИЯИ методы высокоточной сборки могут найти применение при монтаже крупномасштабного научного оборудования и строительстве ускорителей. Более того, такая метрологическая культура, благодаря своей гибкости, уже используется в других отраслях человеческой деятельности (см., например, [197, 198]), в том числе когда необходима высокая точность сборки или юстировки большого числа очень тяжелых и объемных структурных элементов.

Главный вклад в эти уникальные работы (рук. Ю. А. Будагов, Д. И. Хубуа, Н. А. Русакович, А. Н. Сисакян) внесли сотрудники ЛЯП В. Ю. Батусов, В. И. Коломоец, Ю. А. Кульчицкий, М. В. Ляблин, В. М. Романов, С. Н. Студенов, Н. Д. Топилин, И. А. Минашвили, а также Д. Л. Демин, В. К. Ефимов, Ю. А. Жаднов, А. С. Щелчков, С. А. Юхимчук, А. М. Артиков, С. П. Баландин, Ю. Ф. Ломакин, А. Д. Новиков, Н. Д. Новоженин, В. В. Сазонов, А. В. Сазоно-

ва, И. Е. Чириков-Зорин. Кроме того, на разных этапах в работах принимали участие В. А. Аносов, П. М. Былинкин, В. И. Данилов, В. Г. Сазонов, Ю. А. Со рокина, В. А. Уткин, А. Н. Шалюгин, З. Р. Салуквадзе, Б. А. Аликов и др.

3.4. Жидкоаргоновый адронный калориметр

С 1994 по 2007 г. дубненская группа (рук. В. В. Кухтин) жидкоаргоновой (LAr) калориметрии эксперимента ATLAS (рис. 2.3) внесла существенный вклад в разработку концепции LAr адронного торцевого калориметра (ЕС, End-Cap A и End-Cap B, см. рис. 3.53) детектора ATLAS, а также его механических характеристик и электронной аппаратуры считывания информации. Эта группа, в состав которой входили сотрудники четырех лабораторий ОИЯИ (ЛФЧ, ЛЯП, ЛНФ и ЛВЭ), приняла полноценное участие в создании этого калориметра. Группа провела разносторонние исследования радиационной стойкости холодной электроники жидкоаргонового адронного калориметра и конструкционных материалов, примененных в жидкоаргоновых калориметрах, платиновых температурных датчиков, выбранных для измерения температуры детекторов и жидкого аргона в криостатах, загрязнения жидкого аргона при облучении материалов нейтронами большого флюенса. Были тщательно отобраны и прокалиброваны с точностью лучше 10 мК 700 температурных датчиков, которые используются во всей системе жидкоаргоновой калориметрии.

Ядро этой группы (главным образом сотрудники ЛФЧ и ЛВЭ) начало исследования и разработки в области новых методов электромагнитной калориметрии на основе жидкого аргона, по существу, еще до официального формирования эксперимента ATLAS (1992–1994 гг.) в рамках коллаборации RD33 [199, 200] и коллаборации ASCOT. В частности, была исследована воз-

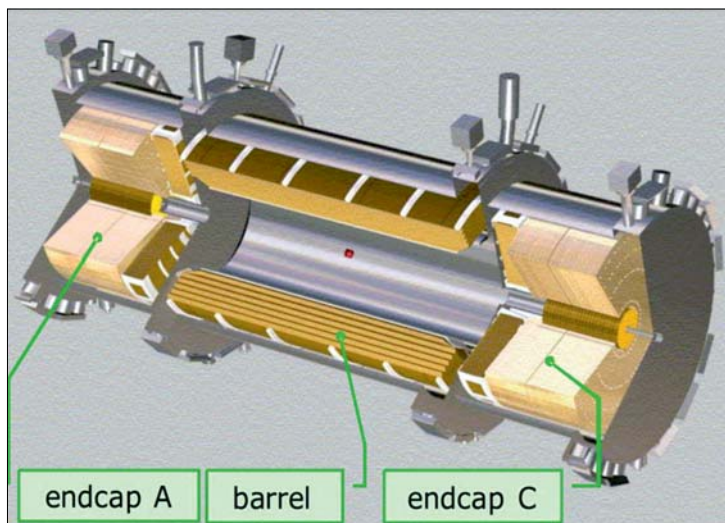


Рис. 3.53. Жидкоаргоновый электромагнитный адронный калориметр установки ATLAS

возможность создания высокосегментированного, компактного TGT-калориметра (Thin Gap Turbine) для экспериментов на LHC на основе LAr [47, 201, 202]. Этот опыт лег в основу решения об участии сотрудников ОИЯИ в работе группы жидкоаргоновой калориметрии эксперимента ATLAS. И гарантировал дальнейший успех в создании детектора.

Как отметил Ф. Дидак (25 апреля 2017 г.), этот «мюнхенский» высокосегментированный жидкоаргоновый калориметр, после объединения ASCOT и EAGLE, «возродился» в виде секции адронного торцевого калориметра ATLAS под названием HEC и также стал важнейшим вкладом ОИЯИ в эксперимент ATLAS.

На начальном этапе создания установки ATLAS (см. п. 3.1) интересы этой группы (JINR-LAr) включали в себя, главным образом, построение адронного LAr-калориметра, исследование радиационной стойкости электроники и различных конструкционных материалов, изучение изменения свойств жидкого аргона под воздействием облучения детектора нейтронами и гамма-квантами, разработку и создание элементов HEC front-end электроники считывания, разработку и создание системы измерения температуры жидкого аргона в криостате и др. Предполагалось, что ресурсы ОИЯИ будут потрачены этой группой в основном на покупку 80 т медных пластин для производства поглотителя переднего колеса калориметра, толщина пластин которого составляла 25 мм, на сборку 1/3 от общего числа модулей калориметра, а также на тестирование этих модулей и транспортировку их в ЦЕРН и т. п.

3.4.1. Изготовление модулей жидкоаргонового калориметра. С 1994 по 1998 г. сотрудники ОИЯИ занимались изготовлением полномасштабного прототипа модуля (рис. 3.54) и нулевого модуля LAr адронного калориметра установки ATLAS. Оба модуля были испытаны на пучках вторичных частиц ускорителя SPS ЦЕРН также с участием дубненских специалистов.

В 1995 г. была завершена проработка прототипа жидкоаргонового калориметра. Были изготовлены все составные элементы модуля этого прототипа, и осуществлена их подготовка к сборке для проведения испытаний на пучке частиц с целью изучения физических характеристик детектора [200].

В 1996 г. в ЦЕРН был испытан собранный в ОИЯИ модуль (прототип) адронного калориметра в составе сборки из четырех аналогичных модулей, которые все вместе составляли 1/16 полномасштабную часть всего жидкоаргонового торцевого калориметра. Исследования его однородности, энергетического и пространственного разрешения были проведены в пучках пионов (рис. 3.55), электронов и мюонов в диапазоне энергии 20–200 ГэВ [203, 204].

В 1997 г. были изготовлены медные поглотители и осуществлена сборка полномасштабного серийного модуля LAr-калориметра. Были проведены испытания его механических и электрических свойств. Анализ результатов испытаний этого прототипа на пучках мюонов и электронов ЦЕРН показал, что разработанный детектор полностью отвечает предъявленным к нему требованиям, например, энергетическое разрешение калориметра соответствует зависимости от энергии адрона, E , как $50\%/\sqrt{E} + 3\%$ [205].

В 1998 г. сотрудниками ОИЯИ было завершено создание полномасштабного прототипа и нулевого модуля торцевого (End-Cap) LAr HEC-калориметра.

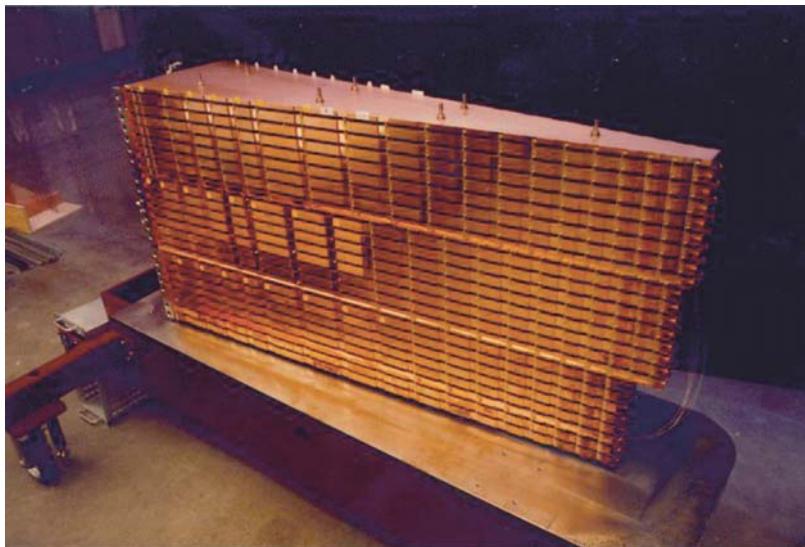


Рис. 3.54. Полномасштабный прототип модуля жидкоаргонового адронного калориметра

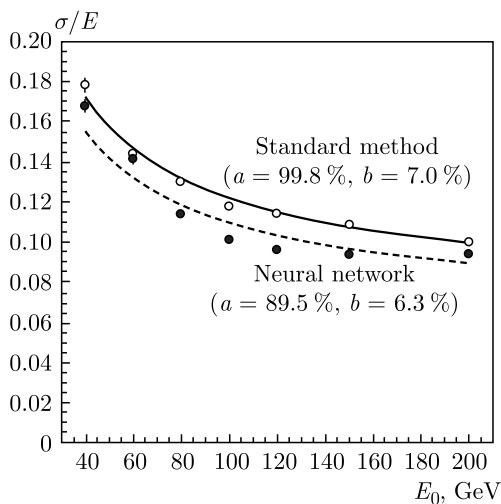


Рис. 3.55. Энергетическое разрешение модуля калориметра в стандартном подходе (сплошная линия) и подходе, основанном на нейронных сетях (штриховая). Из [204]

минском заводе МЗОР в Белоруссии с 1999 по 2002 г. Сборка модулей проводилась в ОИЯИ. Требования на механическую точность изделий (50 мкм на расстоянии в 2 м) были выдержаны обоими производителями.

В 1999–2000 гг. в Опытном производстве ОИЯИ также были изготовлены сборочные элементы из нержавеющей стали для серийных модулей переднего

После сборки и проверки в «теплых» условиях в Дубне этот модуль был транспортирован в ЦЕРН и помещен в жидкоаргоновый криостат для дальнейших исследований на пучке ускорителя SPS. Свойства модуля как детектора элементарных частиц исследовались в пучках пионов [204], электронов и мюонов, и было показано, что характеристики детектора согласуются с ожидаемыми, полученными при моделировании установки.

В 1998 г. на территории ЛЯП ОИЯИ была создана «чистая комната» для серийной сборки модулей торцевого адронного калориметра (рис. 3.56 и 3.57). Поглотители для НЕС-калориметра, выполненные из чистой меди, производились в Опытном производстве ОИЯИ и на

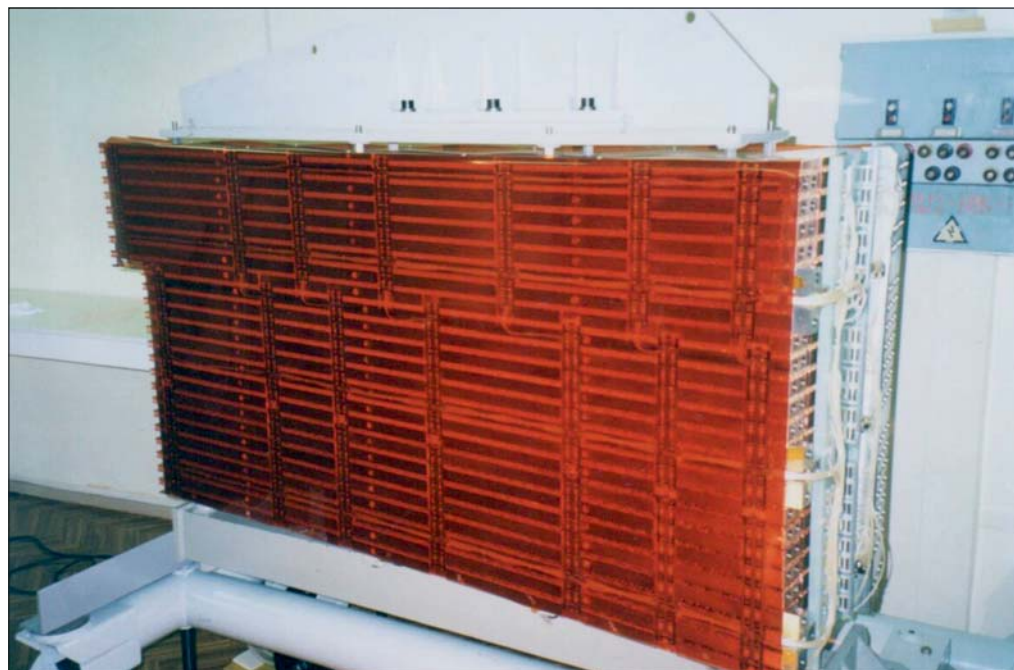


Рис. 3.56. Сборка модулей LAr-калориметра ATLAS шла в чистой комнате ЛЯП. Вверху: вид собранного модуля. Внизу: Н. А. Русакович и М. Ю. Казаринов в чистой комнате

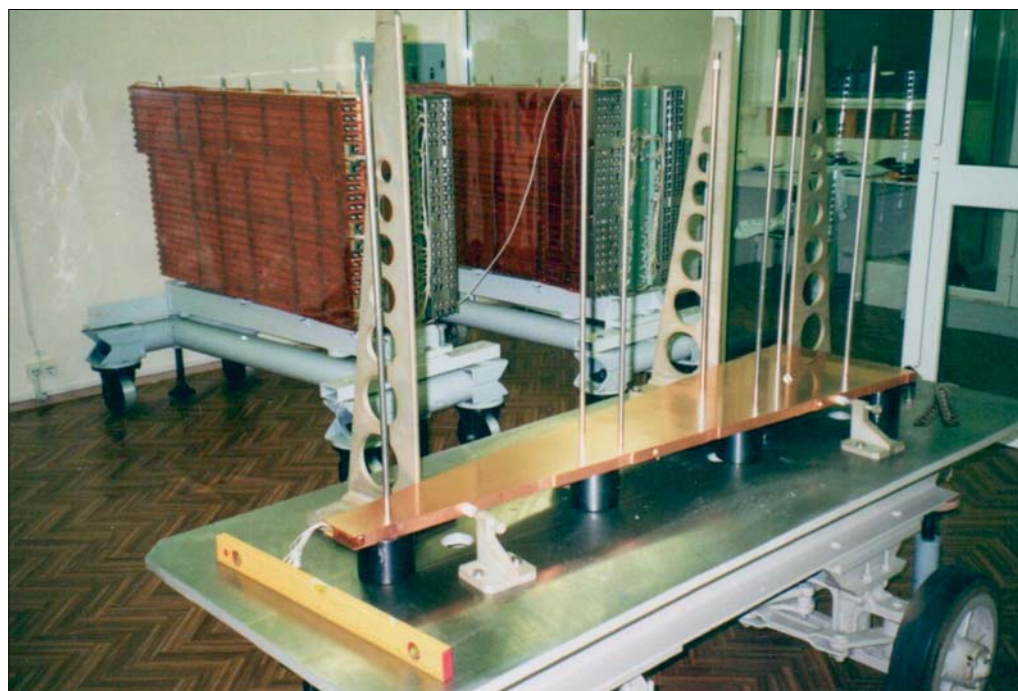


Рис. 3.57. Чистая комната ЛЯП. Вверху: М. Ю. Казаринов и А. И. Лазарев за сборкой модуля. Внизу: устройство для сборки модулей

кольца адронного калориметра. Первый серийный модуль, изготовленный в ОИЯИ, был отправлен в ЦЕРН в 1999 г. Все собранные в ОИЯИ модули были проверены в ЦЕРН либо на пучках пионов, электронов и мюонов, либо без пучка в криостате с жидким аргоном. Сотрудники группы ОИЯИ участвовали в обработке информации, полученной в сеансах работы на вторичных пучках ускорителя SPS, с целью изучения различных физических характеристик изготовленных модулей калориметров. Анализ экспериментальных данных показал хорошую работоспособность модулей.

В 2002 г. при участии дубненских специалистов в ЦЕРН были смонтированы два колеса модулей НЕС-калориметра вместе с датчиками контроля температуры. Проводился анализ экспериментальных данных, полученных во время испытаний модулей калориметра на тестовом пучке в ЦЕРН [206].

В 2003 г. была успешно завершена основная часть работ по серийному производству торцевых модулей адронного калориметра. Были собраны последние два из четырех колес адронного калориметра.

Всего в период с 2000 по 2003 г. в ОИЯИ были собраны 25 серийных модулей НЕС-калориметра, что составляет 38 % от общего числа всех модулей адронного калориметра ATLAS. Все они успешно прошли проверку в «холодных» условиях.

Наличие «высоковольтных» проблем было отмечено на разных стадиях проверки у пяти модулей. Количество неработоспособных элементов (отключенных зазоров) равно 20, что составляет величину менее процента от их общего числа.

В 2004 г. на пучке SPS в тестовом криостате были проведены совместные испытания модулей, представляющих оба колеса адронного калориметра (рис. 3.58, слева), и получены первые важные результаты, характеризующие полномасштабный НЕС-калориметр (рис. 3.58, справа) [207].

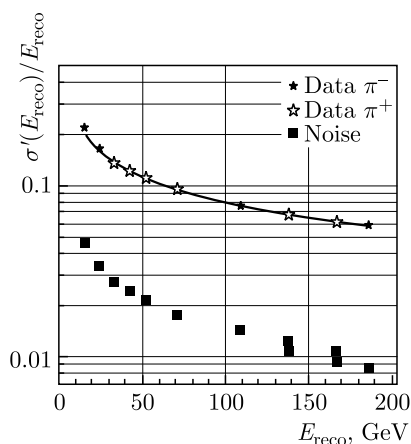
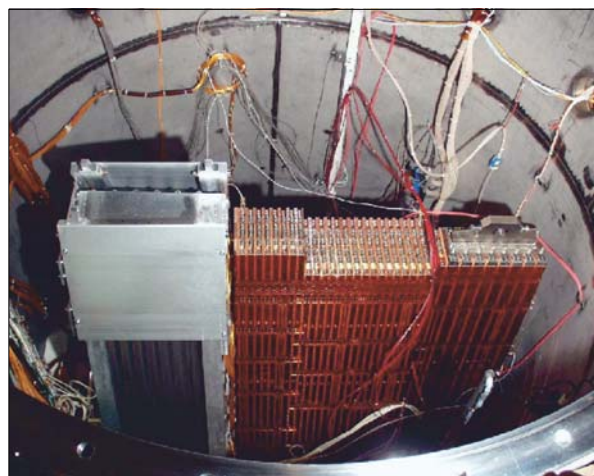


Рис. 3.58. Слева: вид на криостат, где показаны (слева направо) ЕМЕС-модуль, три НЕС1-модуля и два НЕС2-модуля (укороченные в продольном направлении). Справа: энергетическое разрешение для пионов как функция энергии. Шумы электроники показаны на рисунке отдельно. Из [207]

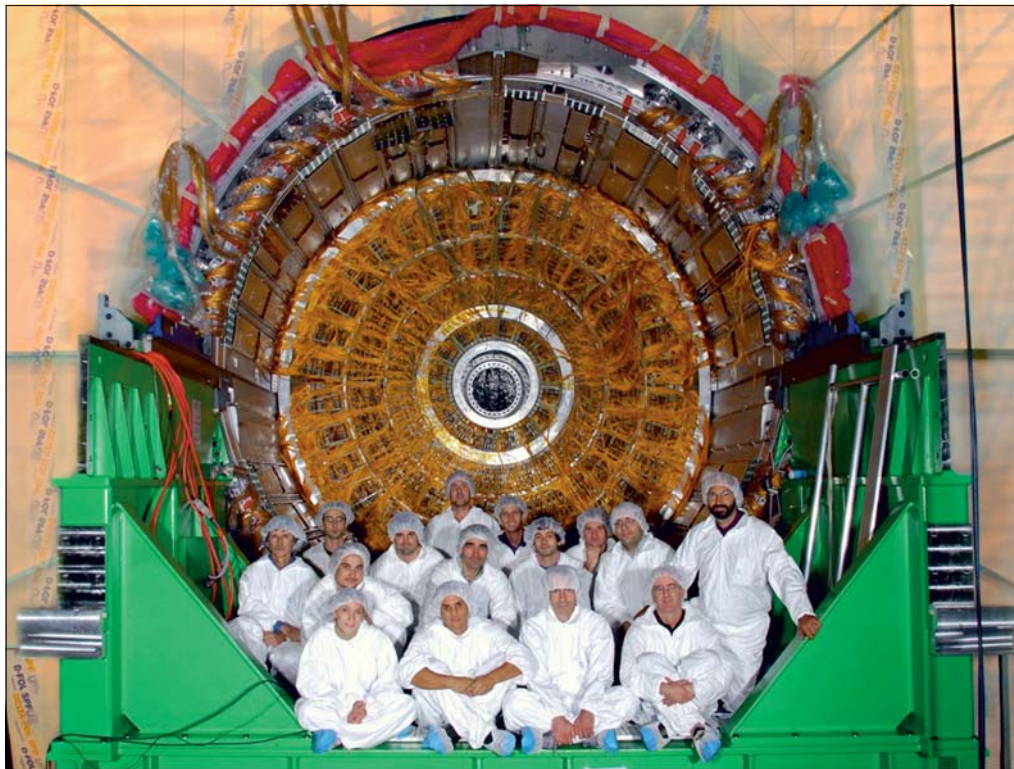


Рис. 3.59. Команда LAr и End-Cap в сборе. 2003 г.

В 2005 г. на экспериментальной площадке ATLAS в месте расположения LAr HEC-калориметра проводилось всестороннее испытание двух криостатов (криостат «С» и криостат «А»). Каждый из них содержал внутри три калориметра: электромагнитный, адронный и передний. Оба криостата успешно прошли испытания, которые показали, что относительное число элементов подсистем, которые не совсем удовлетворительно функционировали, было всегда меньше 1%. Физики ЛФЧ участвовали в окончательной сборке и установке LAr HEC-калориметра детектора ATLAS (рис. 3.59).

В 2007–2008 гг. был выполнен многоплановый анализ результатов тестовых измерений различных характеристик LAr HEC-калориметра [208–210]. В 2007 г. работы LAr-группы были сфокусированы на обработке результатов тестирования электроники HEC на установке ATLAS [211] и на анализе данных, полученных в сеансах с космическими мюонами [212]. Было также продолжено участие в калибровке LAr-калориметров.

В 2010 г. интегральная светимость, набранная на установке ATLAS в штатном режиме, составила 45 пб^{-1} . Все детекторы и подсистемы, за которые отвечала группа ЛФВЭ эксперимента ATLAS (в том числе и элементы жидкоаргонового адронного калориметра), работали стабильно и эффективно [144].

Кроме того, группа принимала участие в мониторинговании качества отклика калориметра и проведении калибровки детекторов [213, 214], а также в исследованиях по программе модернизации LАг-калориметра [215–217].

В частности, при активном участии группы жидкоаргоновой калориметрии ОИЯИ было показано (в 2010 г.), что измерение светимости LHC можно осуществить путем анализа токов в цепи высокого напряжения источников питания электромагнитных секций переднего (торцевого) калориметра ATLAS. Этот метод был опробован с помощью небольшого фрагмента переднего калориметра ATLAS, который был облучен протонным пучком с известной энергией и переменной интенсивностью на ускорителе У-70 в ИФВЭ в Протвино. Сравнение измеренных токов высокого напряжения с эталонными значениями от мониторов интенсивности пучка продемонстрировали линейную зависимость их величин от интенсивности пучка. Измеренная нелинейность этой зависимости составляет не более 0,5%, что вполне отвечает допустимым статистическим и систематическим неопределенностям метода [70].

3.4.2. Изучение радиационной стойкости электроники и материалов. Совместно с Институтом физики Макса Планка (Мюнхен, Германия) (рис. 3.60) участниками группы жидкоаргоновой калориметрии ОИЯИ (рук. Е. А. Ладыгин) были разработаны специальные предусилители сигналов для

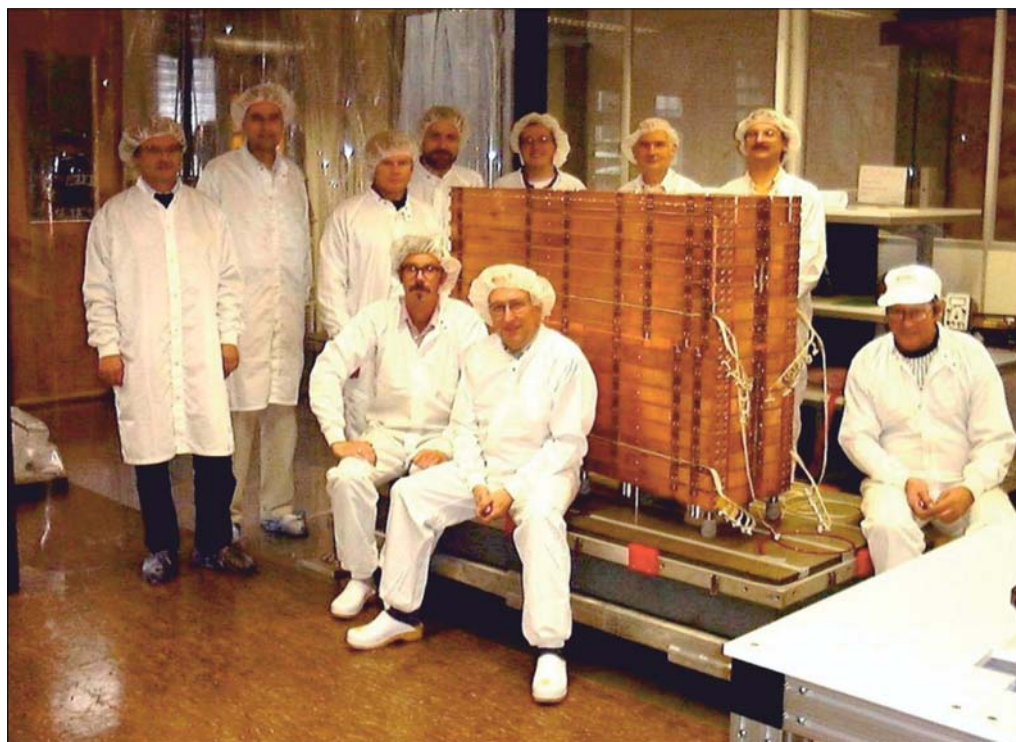


Рис. 3.60. Сотрудники ОИЯИ в LАг-команде. Институт физики Макса Планка (Мюнхен, Германия), 2001 г.

работы в содержащем калориметры криостате при температуре жидкого аргона.

Особенно жесткие требования к надежности этой электроники обусловлены высоким радиационным фоном и отсутствием свободного доступа к ней. Исследования в данном направлении выполнялись на высокоинтенсивном пучке нейтронов, энергетический спектр которого с хорошей точностью соответствовал ожидаемому спектру нейтронов, образующихся при развитии ливней частиц, инициированных вторичными адронами от pp -взаимодействий ЛНС.

В 1993 г. сотрудниками ЛФЧ (рук. А. П. Чеплаков) на базе реакторов Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) были начаты исследования радиационной стойкости электроники, созданной на основе GaAs-технологии [218]. На реакторе ИБР-2 ЛНФ (рис. 3.61) была проведена серия исследований радиационной стойкости элементов электроники считывания информации с калориметров, а также радиационной стойкости конструкционных материалов, которые могли быть использованы в жидкоаргоновой калориметрии детектора ATLAS.

Эти исследования показали, что ожидаемые за 10 лет работы установки суммарные потоки нейтронов и дозы гамма-квантов не вызовут существенных (более 20 %) изменений характеристик электроники и механических свойств электродов калориметра [219–221]. Данные результаты попали в основополагающие документы ATLAS (Liquid Argon Calorimeter TDR) [222].

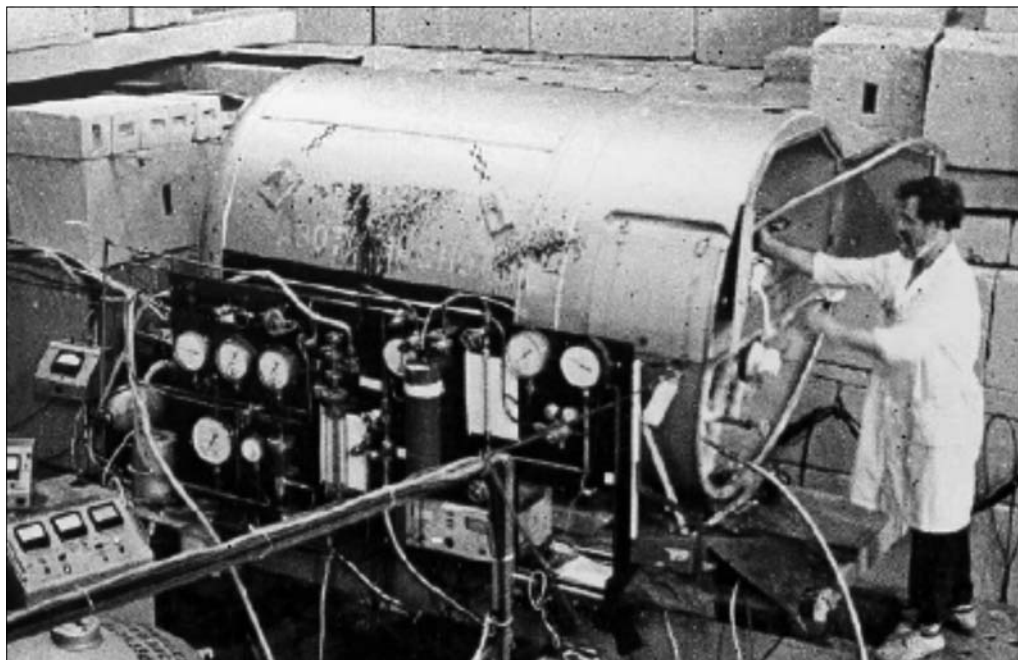


Рис. 3.61. 1998 г. Часть установки для испытаний радиационной стойкости элементов жидкоаргоновой калориметрии ATLAS на реакторе ИБР-2. Сотрудник Лаборатории нейтронной физики Е. Н. Кулагин проверяет криогенные коммуникации. Из [219]

В 1993–2001 гг. на реакторе ИБР-2 был выполнен большой объем работ по исследованию свойств материалов и электроники при воздействии мощных флюенсов нейтронов (до 10^{16} см $^{-2}$). Окончательная версия GaAs-предусилителей продемонстрировала стабильность и устойчивость к облучению потоками нейтронов (до $3 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$) и гамма-квантов (до 31 кГр) таких характеристик, как время нарастания сигнала, линейность и передаточная функция предусилителя [223].

Различные компоненты электроники считывания для LAr-калориметров ATLAS были подвергнуты интенсивному облучению потоком нейтронов и гамма-излучения на специальном стенде для тестирования на реакторе ИБР-2. В частности, был исследован вопрос об измерении электроемкости и импеданса коаксиальных кабелей (рис. 3.62). Испытания на предмет отслаивания медных полос, ламинированных на печатных платах, выявили 6%-е ухудшение их свойств после воздействия потока нейтронов $7 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ и γ -дозы 67 кГр. Кроме того, 2%-я деградация емкости каптонового коаксиального кабеля была зарегистрирована после его облучения нейтронами высокой интенсивности ($1,8 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$) и сопутствующей гамма-дозой (300 кГр). Тем не менее обнаруженные изменения параметров при ожидаемых на LHC дозах оказались на приемлемом уровне, что допускает применение испытанных материалов в эксперименте ATLAS [223].

В 2002 г. LAr-группа продолжила исследование радиационных свойств материалов и электронных компонентов на реакторе ИБР-2. В целом, в результате серии измерений сопротивления, емкости, импеданса, токов утечки и напряжений пробоя было показано, что после проведенного облучения потоком нейтронов 10^{16} см $^{-2}$ лишь некоторые из этих параметров претерпевают незначительные изменения своих номинальных значений (или значений,

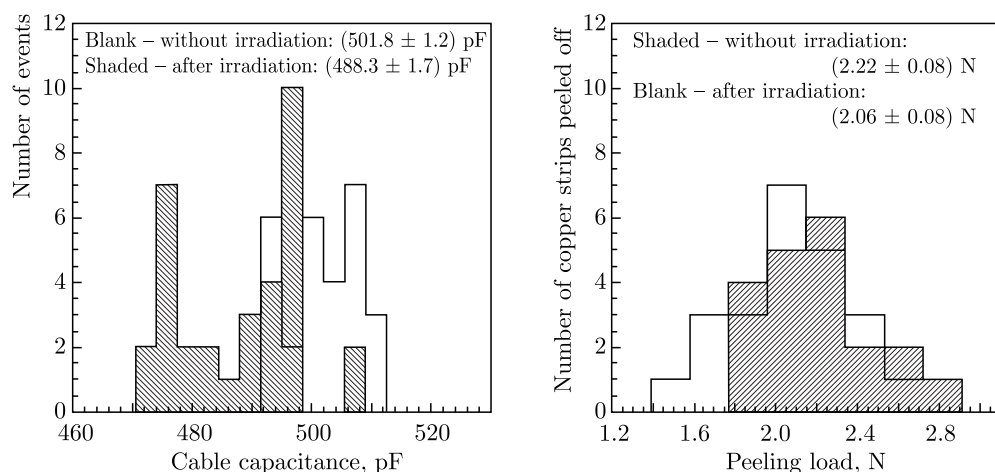


Рис. 3.62. Слева: электроемкость для группы кабелей, облученных потоком нейтронов $1,8 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ (заштрихованная гистограмма), и для необлученной группы (открытая гистограмма). Справа: степень отслаивания, измеренная для группы печатных плат, облученных интенсивным потоком нейтронов (открытая гистограмма), и для контрольной группы (заштрихованная гистограмма). Из [223]

измеренных перед облучением) [224]. Эти наблюдения послужили важным обоснованием возможности длительного применения испытанных материалов в жидкоаргоновом калориметре при энергиях и интенсивностях ЛНС.

В 2011 г. в группе были начаты работы по исследованию деградации электроники жидкоаргонового калориметра ATLAS, связанной с высокой светимостью ЛНС.

3.4.3. Изучение уровня возможного загрязнения жидкого аргона.

В 1997 г. были выполнены первые исследования при комнатной температуре, относящиеся к изучению влияния нейтронного облучения на чистоту аргона в криостате. Загрязнение аргона может возникнуть при выделении электроотрицательных примесей в результате радиационных повреждений конструкционных материалов калориметров детекторов ATLAS нейтронами (флюенс около 10^{16} см⁻²), возникающими при развитии ливней вторичных частиц от адронов, образованных в протон-протонных взаимодействиях на ЛНС.

В специально поставленном эксперименте на реакторе ИБР-30 откачанный контейнер с 700 г «таблеток» из вольфрама для поглотителя переднего калориметра был подвергнут воздействию потока нейтронов с флюенсом $1,5 \cdot 10^{16}$ см⁻². Остаточный газ был проанализирован с помощью масс-спектрометра VS-25 («Вакуум-Прага»), который позволял измерять состав газовой смеси в интервале атомных масс от 2 до 200. Было показано, что облучение не вызывало изменения скорости газоотделения с вольфрамовой поверхности, что позволило оценить верхний предел загрязнения жидкого аргона на уровне 10^{-4} [225].

Эти исследования были продолжены в 1998–2002 гг. уже при низких температурах (холодный тест) на реакторе ИБР-2, где была создана спе-

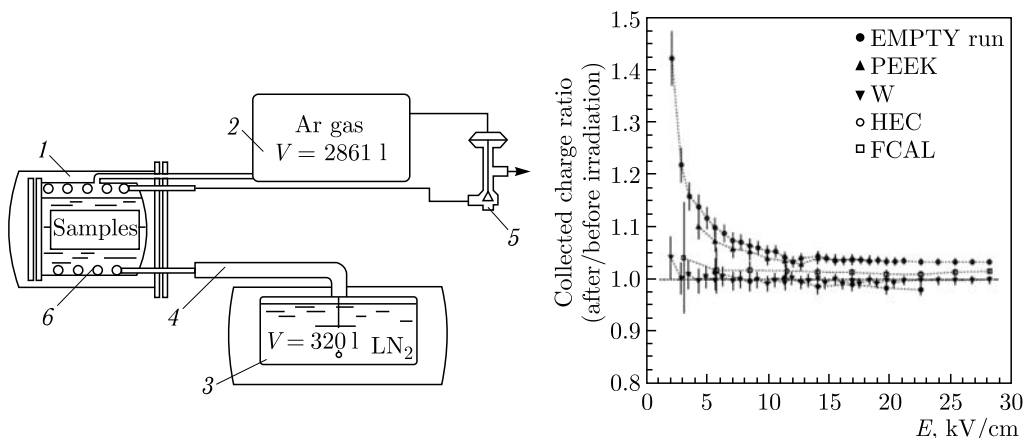


Рис. 3.63. Слева: схема криогенной установки: 1 — криостат; 2 — сборник газообразного аргона; 3 — дьюар для жидкого азота; 4 — линия транспортировки жидкого азота; 5 — автоматический регулятор; 6 — конденсатор аргона. Справа: отношение накопленных зарядов после и до облучения для пяти различных образцов в зависимости от величины электрического поля в зазоре ионизационной камеры.

Из [226]

циальная криогенная установка (рис. 3.63, слева). Чистота жидкого аргона до и после облучения измерялась с помощью ионизационной камеры. Тесты показали, что облучение потоками нейтронов той же интенсивности не вызывает выделения в жидкий аргон с поверхности конструкционных материалов электроотрицательных примесей, уменьшающих собранный заряд (рис. 3.63, справа). Уровень загрязнения жидкого аргона не превышает 2 ppm [226, 227].

3.4.4. Создание аппаратуры для измерения температуры жидкого аргона. Среди работ ЛАг-группы следует также отметить важную разработку и изготовление (в 1996–2003 гг.) системы измерения температуры жидкого аргона (рук. Ю. А. Усов). Задача состояла в том, чтобы отобрать и установить внутри криостата детектора ATLAS 700 температурных сенсоров-датчиков с точностью измерения температуры лучше 10 мК, которые бы минимальным образом реагировали на рабочее значение магнитного поля в 1,1 Тл, а также обладали максимальной радиационной стойкостью.

Сначала был сформирован (совместно со специалистами из ЦЕРН) список кандидатов из фирм-производителей температурных сенсоров для использования в условиях детектора ATLAS. В него вошли изготовители платиновых сенсоров — фирмы «Эталон» (Россия) и «Degussa» (Швейцария) и изготовители углеродных сенсоров — ТВО (Россия), «Au-Ge» (Германия) и SDL (Великобритания). Все датчики были подвергнуты всесторонним магнитным и радиационным испытаниям на специально созданных для этого установках (рис. 3.64 и 3.65). Важно отметить, что для всех отобранных кандидатов

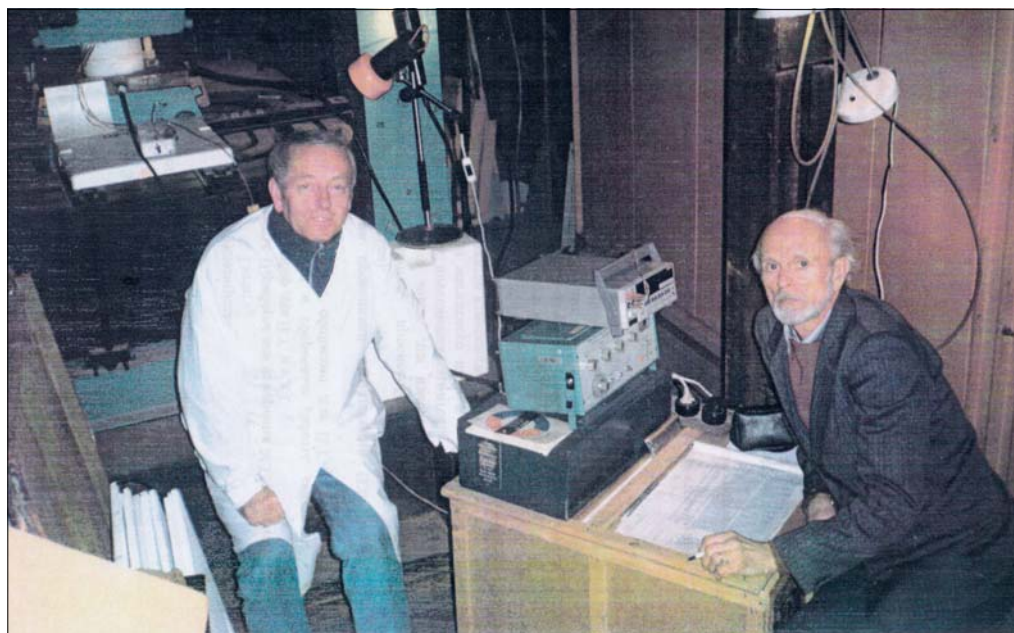


Рис. 3.64. Сотрудники ЛФВЭ В.И. Дацков и В.М. Дробин во время измерения зависимости сопротивления от приложенного магнитного поля у различных температурных датчиков

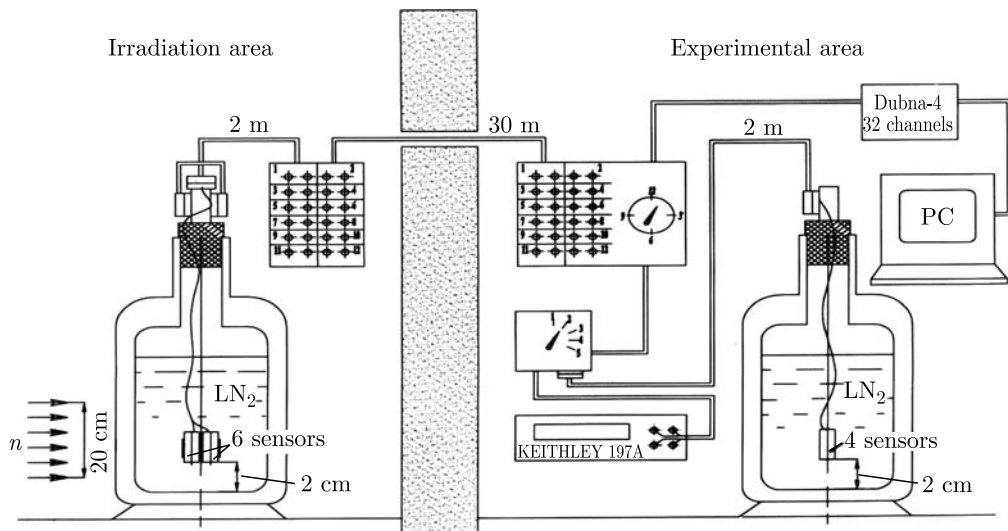


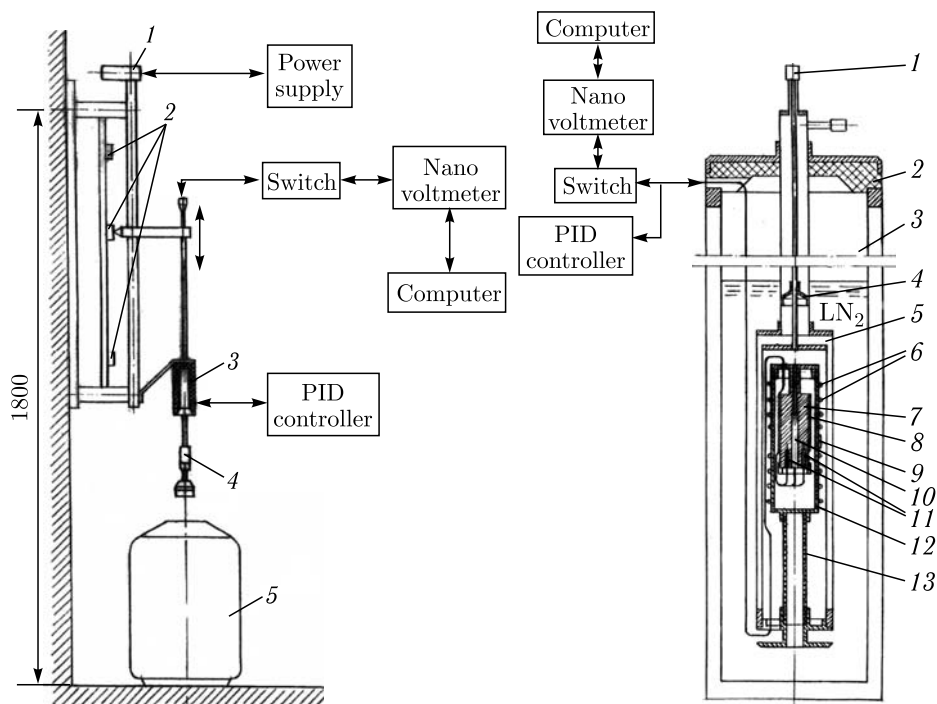
Рис. 3.65. Схема установки для испытаний различных типов термометров на радиационную стойкость на реакторе ИБР-2



Рис. 3.66. Платиновые термометры PT100, которые используются в эксперименте ATLAS

радиационные испытания на ИБР-2 (рис. 3.65) проводились с нарастающей дозой облучения при температуре жидкого азота (77 К), т.е. в условиях, близких к рабочим (температура жидкого аргона 87 К). По ходу накопления радиационной дозы (при постоянной температуре) было видно, как постепенно менялись показания некоторых термометров. Таким образом была выявлена зависимость показаний каждого типа сенсоров от накопленной дозы облучения. В результате всех испытаний лучшие показатели оказались у платиновых сенсоров, и было решено использовать в эксперименте ATLAS температурные сенсоры PT100 от «Degussa» (рис. 3.66).

После калибровки всех 700 платиновых термометров PT100 (ЦЕРН–ОИЯИ контракт K631/EP/ATL) на специальном стенде ЛФВЭ в 2000–2002 гг. (рис. 3.67, справа) группа ОИЯИ смонтировала около 200 температурных датчиков на задней поверхности обоих колес НЕС-калориметра для обоих торцевых криостатов. Остальные из 700 прокалиброванных



1 — electric motor; 2 — electrical contacts;
3 — thermostat 30 ± 0.1 °C; 4 — block cryo-
genic thermometers; 5 — liquid nitrogen
Dewar

1 — valve; 2 — flange; 3 — liquid nitrogen
bath; 4 — thermal shunt; 5 — upward Dewar;
6 — heater; 7 — copper block; 8 — electrical
contact-thermal shunt; 9 — platinum resis-
tance thermometer; 10 — reference platinum
resistance thermometer; 11 — calibrated sen-
sors ABB; 12 — copper block; 13 — tube
from insulation material

Рис. 3.67. Слева: схема установки для термоциклирования и селекции датчиков температуры. Эта процедура необходима для повышения стабильности параметров и отбора дефектных датчиков. Справа: схема установки для калибровки платиновых термометров с точностью не хуже 5 мК. Из [228]

в ОИЯИ датчиков были переданы группам электромагнитных калориметров и общей криогеники ATLAS, которые разместили их в криостатах.

С учетом результатов проделанной работы было предложение возложить на ОИЯИ всю ответственность за создание системы измерения температуры в эксперименте ATLAS (главный разработчик А. Б. Неганов), но по целому ряду не зависящих от ОИЯИ причин это не произошло. Результаты работ по созданию криогенной аппаратуры в ОИЯИ опубликованы в [228].

3.4.5. Создание электроники считывания калориметрической информации. В 1996 г. были разработаны, изготовлены и испытаны первые образцы усилителей-формирователей для электроники адронного калориметра. В 1997 г. была разработана электронная схема компенсации изменения емкости считывающих электродов жидкоаргонового калориметра. Эта схема —

составной элемент цепи электроники считывания информации с калориметра [229].

Как элемент цепи электроники в 1999–2001 гг. была разработана принципиальная схема и изготовлена группа из 64 предварительных формирователей электроники считывания НЕС. Их качество, электрические и функциональные характеристики были исследованы на тестовом пучке SPS ЦЕРН для сборки из 6 серийных модулей адронного калориметра, в результате разработка и исполнение электроники были признаны успешными [206, 223].

В 2004 г. было изготовлено 200 каналов электронных схем предварительных формирователей, которые были смонтированы на платах, размещенных по периметру НЕС-калориметра. В 2005 г. была начата окончательная сборка и общее тестирование 1500 передних печатных панелей, которые необходимы для считывания сигналов с НЕС-калориметра. Вся сделанная в ОИЯИ электроника успешно прошла соответствующее тестирование и сертификацию [208, 209]. По результатам этих работ в 2015 г. Е. А. Ладыгин защитил кандидатскую диссертацию.

Итак, сотрудники дубненской жидкоаргоновой группы полностью выполнили обязательства перед коллаборацией ATLAS (1994–2009 гг.):

- почти 40 % жидкоаргонового адронного End-Cap калориметра и связанных с ним подсистем детектора ATLAS было сделано в ОИЯИ;
- успешно проведены всесторонние исследования радиационной стойкости материалов и электроники для жидкоаргоновой калориметрии ATLAS;
- изучен уровень загрязнения жидкого аргона из-за облучения материалов;
- разработана и создана система измерения температуры жидкого аргона, с точностью лучше 10 мК прокалиброваны 700 термометров, использованных в системе жидкоаргоновой калориметрии;
- разработаны и созданы элементы электроники считывания калориметрических сигналов, учитывающие различие емкостей электродов НЕС-калориметра;
- внесен вклад в физическую программу исследований на установке ATLAS, моделирование физических процессов и анализ экспериментальных данных.

В этих работах (которые были оценены коллаборацией ATLAS в 1,2 млн швейцарских франков, из которых 0,7 млн — вклад ОИЯИ) наиболее активное участие принимали В. В. Кухтин, А. П. Чеплаков, М. Ю. Казаринов (рис. 3.68), Е. А. Ладыгин, Ю. А. Усов, Р. Р. Мехтиев, Н. А. Джавадов, Н. Г. Фадеев, А. Б. Лазарев, Л. А. Меркулов, А. А. Карев. Весомый вклад внесли также С. И. Какурин, С. М. Голубых, Е. В. Серочкин, З. Метревели, Д. Салихагич (ЛФВЭ), А. Б. Неганов, С. Н. Шилов, И. Л. Писарев, А. Н. Федоров (ЛЯП), В. В. Голиков, В. И. Лущиков, Е. П. Шабалин, Е. Н. Кулагин (ЛНФ), В. И. Дацков, В. М. Дробин, Л. В. Петрова (ЛВЭ).

3.4.6. Подготовка LAr НЕС-калориметра к работе ЛНС на большей светимости. В 2006 г. жидкоаргоновой группой ОИЯИ на протонном пучке с энергией 70 ГэВ в Протвино были начаты исследования возможности использования модулей торцевых жидкоаргоновых калориметров в условиях



Рис. 3.68. Руководители группы жидкоаргоновой калориметрии ОИЯИ на одной из конференций в Германии. 2002 г. Фото Ф. Дидака

10-кратного увеличения светимости коллайдера LHC. Для этого было изготовлено и установлено специальное оборудование. Первый сеанс был проведен уже в декабре 2006 г.

В 2007 г. данный цикл работ был продолжен в рамках проекта INTAS. Согласно разделению обязанностей в рамках данного проекта в ОИЯИ были изготовлены 2 мини-модуля адронного калориметра, прокалиброваны с точностью 50 мК и установлены в криостаты 20 датчиков измерения температуры жидкого аргона, разработана и изготовлена система обеспечения жидким азотом трех криостатов (рис. 3.69, слева) с мини-модулями калориметров (рис. 3.70). Все изготовленное оборудование было доставлено в ИФВЭ и смонтировано на канале ускорителя У-70.

В 2011 г. сотрудники ЛФВЭ завершили обработку накопленных данных и проанализировали границы допустимой радиационной нагрузки на жидкоаргоновые калориметры установки ATLAS — до какой степени они могут функционировать как приборы с линейным откликом. Было показано, что электромагнитный и адронный торцевые калориметры не изменяют своих рабочих характеристик (см., например, рис. 3.69, справа) и могут применяться при светимости HL-LHC коллайдера [215, 216]. Эти выводы были подтверждены и в последующих сеансах в 2014 г.

В 2013 г. было проведено моделирование характеристик LAg торцевого калориметра ATLAS с учетом деградации электроники считывания при

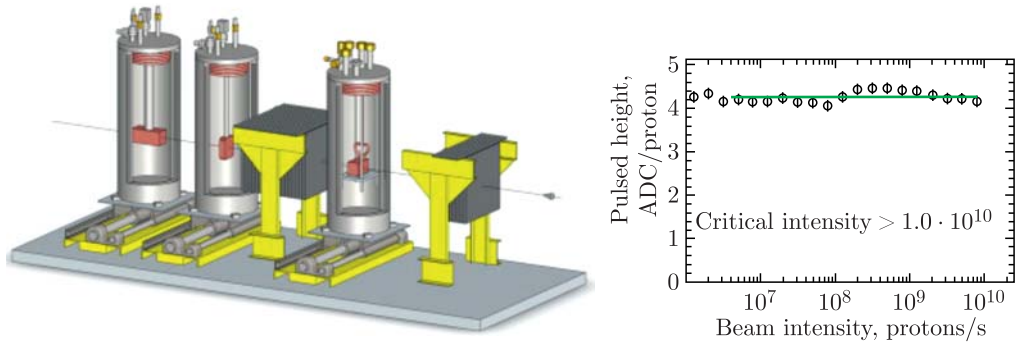


Рис. 3.69. Слева: три криостата и два поглотителя в измерительной зоне, пучок протонов направлен справа. Справа: зависимость сигнала в переднем калориметре FCal от интенсивности пучка. Сплошная линия — фит данных. Из [216]

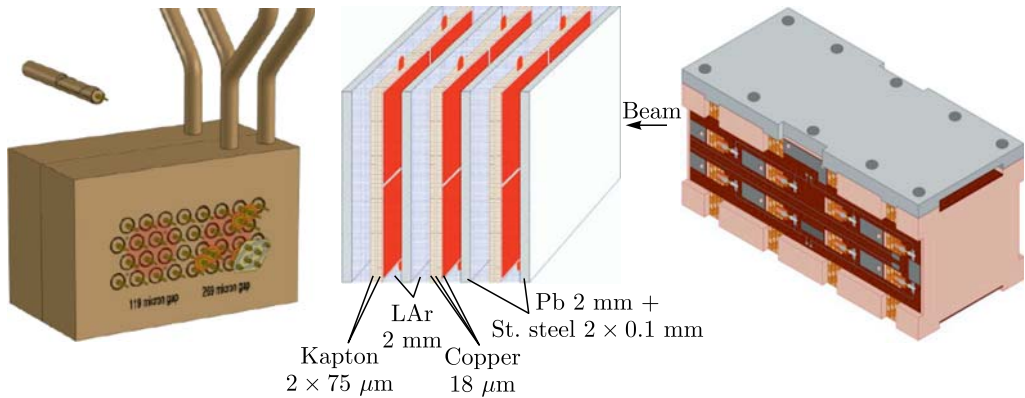


Рис. 3.70. Слева: секция электромагнитного модуля FCal. В центре: схематический вид трех продольных слоев ЕМЕС-модуля. Справа: модуль NES в сборке. Из [216]

наборе полной интегральной светимости 3000 fb^{-1} . В качестве исходных параметров были использованы экспериментальные данные, полученные при радиационных испытаниях электроники на пучке протонов (Цюрих) и на пучках нейтронов (Дубна и Ржеж). Ухудшение коэффициента усиления предусилителя и искажение его линейности были параметризованы в зависимости от полученной радиационной нагрузки, которая зависит от положения электронной платы в криостате установки ATLAS. Было проведено полное Монте-Карло моделирование (GEANT-4) двухструйных событий с учетом и без учета ожидаемой деградации предусилителей. Полученные результаты показывают, что радиационные повреждения предусилителей приводят к искажениям калориметрической информации при работе на HL-LHC (LHC с большей светимостью) на приемлемом уровне — менее одного процента для линейности отклика и энергетического разрешения [217].

Это очень важный результат, позволивший коллаборации ATLAS избежать необходимости проведения весьма дорогостоящих и рискованных работ по вскрытию торцевых криостатов. Правильность такого решения подтверди-

ли проведенные позднее сотрудниками ЛФВЭ исследования сигнатуры процесса рождения тяжелого бозона Хиггса (массой до 2 ТэВ) в реакции слияния векторных бозонов (VBF) в зависимости от степени деградации переднего FCal-калориметра, показавшие умеренные потери сигнала при ожидаемых повреждениях переднего сектора FCal в области больших псевдобыстрот.

Программа радиационных испытаний на реакторе ИБР-2М была продолжена в 2014–2015 гг. для проверки различных сценариев проекта модернизации передней калориметрии ATLAS. В целях исследования радиационных свойств многослойных печатных плат на канале реактора ИБР-2М [230] в 2014 г. был проведен сеанс облучения на пучках нейтронов высокой интенсивности, в ходе которого получен накопленный на поверхности облучаемых объектов суммарный поток нейтронов, равный интегральному потоку через установку ATLAS за 10 лет ее работы при светимости коллайдера, на порядок большей номинальной. После сеанса были исследованы электрические и механические характеристики облученных объектов и сделаны выводы о возможности их использования в полях высоких радиационных нагрузок. Сеанс показал необходимость радиационных испытаний плат в реальной конфигурации, особенно при высоком (10^{17} см⁻²) уровне флюенса [231]. В этот период были проведены сеансы облучения прототипов сенсоров, составляющих мозаичную структуру проектируемого переднего калориметра ATLAS. Исследовались два типа сенсоров, изготовленных из цельных кристаллов (Нанкинский университет, Китай) и поликристаллов алмаза (TRIUMF, Канада). Цельные кристаллы показали значительно бóльшую стойкость к радиационным нагрузкам (порядка 10^{17} см⁻²) и лучшие перспективы для применения в физических экспериментах в области высоких энергий.

Участие ОИЯИ в программе модернизации детектора ATLAS было поддержано Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках специального соглашения (грант RFMEFI61014X0005).

Заслуги жидкоаргоновой группы были отмечены в 1999 г. премией ОИЯИ за цикл работ «Установка для радиационных исследований на ИБР-2». Доклады от имени коллаборации ATLAS были представлены на ряде престижных конференций [215, 217, 232, 233] и т. д.

3.5. Мюонная система

Работы в ОИЯИ по программе создания мюонного спектрометра установки ATLAS фактически начались уже в 1992 г., когда в ЛЯП (совместно с ЦЕРН, Германией и США) были разработаны и исследованы на пучках ОИЯИ, ИФВЭ (Протвино) и ЦЕРН несколько прототипов новых дрейфовых трубок повышенного давления (рук. Г. Д. Алексеев). При повышенном давлении рабочего газа в отдельном детекторе (рис. 3.71) было достигнуто разрешение 25 мкм [235, 236]. Идея использования дрейфовых трубок с повышенным давлением рабочего газа в качестве основного прецизионного детектирующего элемента мюонной системы ATLAS была, таким образом, предложена и успешно опробована в ОИЯИ. Именно этот вариант (из трех предложенных) был выбран в качестве основного для детекторов мюонной системы ATLAS (рис. 3.72).

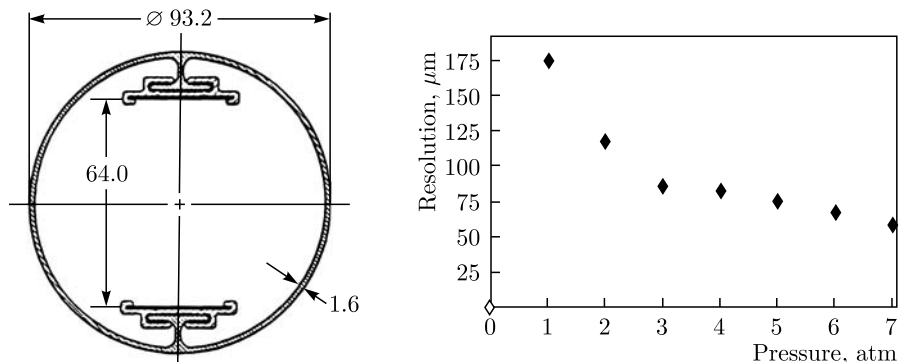


Рис. 3.71. Слева: поперечное сечение секции дрейфовой трубки повышенного давления (Pressurized drift tubes) [234]. Справа: среднее разрешение по координатам как функция давления для 15 ГэВ-ных электронов. Из [235]

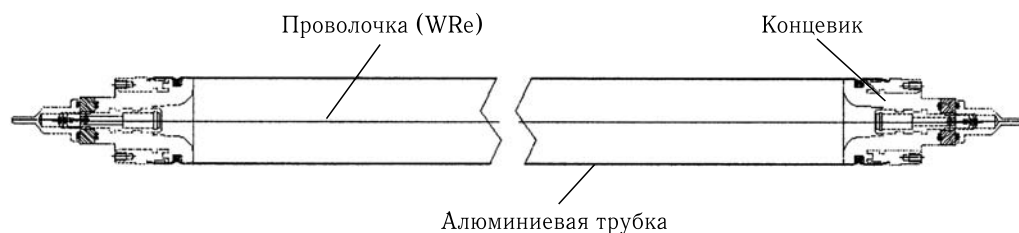


Рис. 3.72. Дрейфовая трубка с повышенным давлением рабочего газа (использованная в эксперименте ATLAS) — алюминиевая трубка диаметром 30 мм и длиной 6 м, вдоль оси которой с высокой точностью (10 мкм) натянута 50-мкм позолоченная вольфрамовая нить (27% Re). Из [237]

Высокое качество измерений характеристик (траекторий, треков) вторичных мюонов (наравне с прецизионной калориметрией) было одним из основных требований эксперимента ATLAS. Поскольку из напрямую регистрируемых частиц эти мюоны являются самыми слабозаимодействующими и по этой причине способными проникать максимально далеко от точки взаимодействия, мюонный спектрометр (рис. 2.4) представляет собой внешнюю наружную часть детектора ATLAS. Его средние размеры — 22 м в высоту и 44 м в длину. Для реконструкции траектории мюона необходимо зафиксировать акты его взаимодействия как минимум в трех различных точках мюонной системы, которая имеет площадь 5500 м², что соответствует 400 000 отдельным дрейфовым трубкам, собранным в 1200 камер. Принимая во внимание внушительные размеры мюонного спектрометра, необходимо было разработать достаточно дешевый, но точный прибор. В мюонной системе используется несколько типов координатных детекторов. Детекторы MDT (Monitored Drift Tube Chamber) покрывают 98,6% общей площади установки.

Принятая коллаборацией ATLAS конструкция мюонного спектрометра является результатом работы многих лабораторий России, ОИЯИ, Германии, Италии, Голландии и США. «Мюонная» группа из ОИЯИ отвечала за изготовление так называемых BMS-BMF камер и дрейфовых трубок для BOS-

камеры (Barrel Outer Small Chamber), или за 20 % всех мюонных дрейфовых трубок ATLAS.

Процесс изготовления MDT-камер и их тестирования был строго определен [238, 239]. Он включал в себя монтаж и тестирование трубок, сборку из них MDT-камеры и окончательное тестирование собранной камеры. Характеристики всей MDT мюонной системы установки полностью определялись работой дрейфовых трубок, при этом не было никакой возможности замены или переделки отдельных неисправных элементов. Отсюда высокие требования к надежности и стабильности именно дрейфовых трубок.

Фактически все работы по созданию мюонной системы ATLAS проводились в ОИЯИ (рук. Г. А. Шелков) в три ключевых этапа. Первый этап (до 2000 г.) — это участие в разработке проекта мюонной системы установки ATLAS и создание в ЛЯП ОИЯИ участка для производства мюонных камер. Второй этап (2000–2004 гг.) включал в себя массовое производство и проверку соответствия техническим требованиям 84 мюонных камер типа BMS-BMF. Задача третьего этапа (2004–2006 гг.) состояла в доставке (проверенных в ОИЯИ) мюонных камер в ЦЕРН и окончательном монтаже их в мюонную систему установки ATLAS.

С 1994 по 2000 г. в сотрудничестве со специалистами из Института физики Макса Планка (Мюнхен), ЦЕРН и Румынии в ЛЯП был создан участок для производства мюонных детекторов. Участок был оснащен современным (в ряде случаев уникальным) оборудованием, которое позволяло производить в соответствии со стандартами ATLAS дрейфовые трубчатые координатные детекторы и собирать из них мюонные камеры для установки ATLAS. С 2000 по 2004 г. на этом участке, в полном соответствии с технической спецификацией на мюонные детекторы ATLAS, было изготовлено и проверено свыше 70 тыс. дрейфовых трубок. Из этих детекторов были собраны 84 мюонные камеры. В 2004–2005 гг. происходила транспортировка готовых мюонных камер из Дубны в Женеву. Перед установкой в шахту ATLAS все камеры прошли дополнительную тщательную проверку и были собраны в полномасштабные детектирующие блоки установки. В конце января 2005 г. первая камера мюонной системы ATLAS, изготовленная в ОИЯИ, была установлена на свое рабочее место. К концу 2006 г. (в соответствии с планом сборки детектора ATLAS) была полностью завершена установка всех дубненских мюонных камер и началось их комплексное тестирование и подготовка к работе на пучках LHC.

3.5.1. Разработка прототипов мюонных камер в ОИЯИ. В 1993 г. были начаты совместные работы с Институтом физики Макса Планка (Мюнхен, Германия), главной целью которых была разработка мюонной системы, включающей детекторы для прецизионного измерения координат (дрейфовые трубки высокого давления — HPDT). На тестовом пучке SPS (Super Proton Synchrotron) ЦЕРН были испытаны прототипы детекторов для мюонной системы, изготовленные в Дубне и Мюнхене. Для изготовленных в Мюнхене детекторов в Дубне была также разработана и сконструирована специальная front-end электроника (около 700 каналов). Результаты испытаний оказались успешными. Для прототипа размером 1×1 м было получено пространствен-

ное разрешение 50–60 мкм. На нейтронном пучке ИБР-30 была исследована эффективность трубок высокого давления для регистрации нейтронов [240].

Совместно с Санкт-Петербургским институтом точной механики и оптики в 1993 г. был разработан и сконструирован первый прототип оптической системы прецизионного определения взаимного расположения детекторов установки ATLAS. Он был испытан в Институте физики Макса Планка.

В 1994 г. мюонной группой ОИЯИ был создан рентгеновский томограф для контроля пространственного положения сигнальных нитей внутри дрейфовых трубок высокого давления [234]. Было показано, что пространственное расположение проволочек можно определить с точностью лучше 1 мкм по координатам их теней или путем нахождения максимума в зависимости скорости счета самой трубки от координаты положения рентгеновского пучка [241]. При сканировании с шагом 50 мкм была получена точность примерно 3 мкм. Было также показано, что существенное улучшение в отношении сигнал–фон удается получить путем введения в газовую смесь электроотрицательных добавок [242].

В 1995 г. в конструкторском отделе ЛЯП были разработаны полномасштабный прототип BOS-камеры (Barrel Outer Small Chamber) мюонной системы площадью $3,2 \times 1,8$ м и технологическая оснастка для ее сборки.

Были исследованы свойства MDT-детекторов. На пучке нейтронов ИБР-2 были измерены спектральная чувствительность и отклик MDT к тепловым нейтронам, получен отклик MDT к гамма-квантам различной энергии в магнитном поле [243], а также измерена температурная зависимость общего времени дрейфа в газовой смеси $\text{Ar} + 5\% \text{CO}_2 + 3\% \text{CH}_4$ [244]. Были изу-

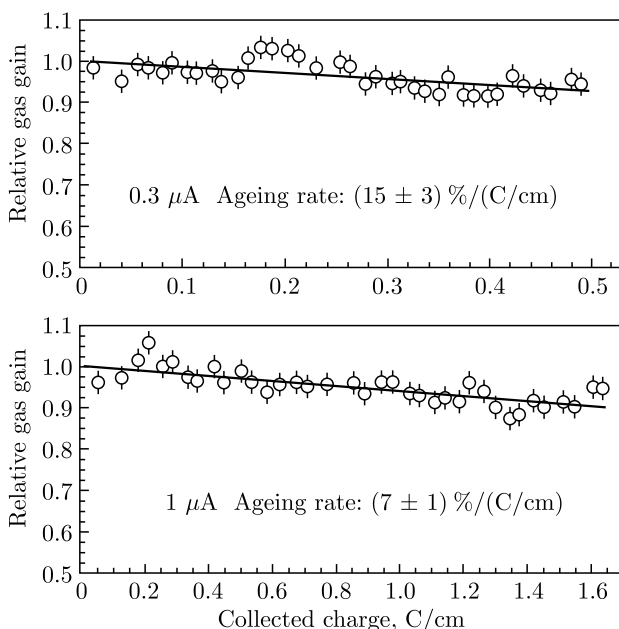


Рис. 3.73. Зависимость коэффициента газового усиления MDT-детектора от величины аккумулированного детектором заряда. Из [245]

чены эффекты старения (рис. 3.73) в MDT, наполненных этой газовой смесью [245]. Также были продолжены работы по развитию метода рентгеновской томографии для точного определения положения анодных нитей в дрейфовых трубках MDT [246–248]. При определяющем участии дубненской группы в ЦЕРН был создан действующий прототип установки сканирования MDT-камер. В составе группы моделирования коллаборации ATLAS сотрудниками ЛЯП был создан и включен в пакет базовых программ общего пользования важный блок программ оцифровки сигналов с MDT-камер мюонной системы.

3.5.2. Подготовка к производству мюонных камер в ОИЯИ. В 1995 г. совместно с ВИЛС (Москва) были начаты работы по организации производства высокоточных алюминиевых трубок для MDT-детекторов. В 1996 г. были выполнены проектные и строительные работы по организации в ЛЯП ОИЯИ сборочных линий мюонных камер. Помимо этого был выполнен большой объем работ по анализу результатов испытаний прототипов детекторов установки ATLAS, а также по моделированию эксперимента [244, 249, 250].

В 1997 г. главным достижением мюонной группы ATLAS в ОИЯИ было создание первого полномасштабного ($3,2 \times 2,0 \times 0,5$ м) прототипа (рис. 3.74) мюонной камеры установки ATLAS (BOS MDT). Для этого на основе расчетов, проведенных методом конечных элементов, была полностью спроектирована вся мюонная камера, был собран спейсер (поддерживающая конструкция) камеры, создана, протестирована и прокалибрована с точностью 1 мкм внутренняя система измерения деформаций (RASNIK). Эта система была вмонтирована в структуру спейсера. Был собран и прошел тестирование согласно требованиям контроля качества мюонного проекта ATLAS детектор-прототип, состоящий из 384 отдельных дрейфовых трубок (длиной 3200 мм и диаметром 30 мм) [251].

В 1998 г. участниками мюонной группы ATLAS было завершено создание в ЛЯП условий для массового производства мюонных камер и изготовления нулевого модуля. Для этой цели была выполнена основная часть работ по перестройке помещения для изготовления камер, включая монтаж двух кранов. Был изготовлен во Франции, перевезен в Дубну и смонтирован

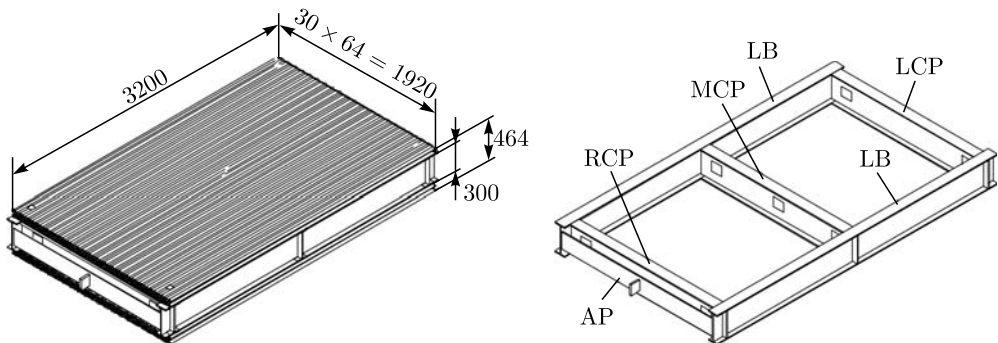


Рис. 3.74. Слева: дизайн прототипа BOS MDT камеры. Справа: структура спейсера камеры, где AP — дополнительная плоскость, RCP, LCP и MCP — правая, левая и средняя поперечные пластины, LB — длинные боковые плоскости. Из [251]

высокопрецизионный гранитный стол для сборки мюонных камер размером $3,5 \times 2,5 \times 0,5$ м и высокой степенью гладкости (отклонение не более 8 мкм по всей плоскости стола). Помимо этого в тесном сотрудничестве с экспертами из INOEL (Бухарест) был спроектирован, собран в Бухаресте, а потом смонтирован на месте работы в ЛЯП и прошел испытания современный прибор для контроля утечки (leak test device), основанный на радиочастотном масс-спектрометре [252, 253]. Согласно договоренности с Институтом Макса Планка и LMU (Мюнхен), в ЛЯП было начато создание единого помещения для производства и тестирования дрейфовых трубок, и в качестве первого шага в реализации данной договоренности в этом помещении была создана «чистая комната» размером $14 \times 4,5$ м.

Главной задачей дубненской мюонной группы проекта ATLAS в 1999 г. было завершение оборудования в ОИЯИ специального помещения (рис. 3.75) для полного цикла производства и испытания мюонных камер (MDT-камер) установки ATLAS. Для решения этой задачи были созданы высокотехнологичные устройства и приспособления. В их число входили две «чистые комнаты» с поддержкой заданных климатических условий, полная инфраструктура (с кранами, компрессорами, вакуумными насосами, газовыми трубами, компьютерным обеспечением, полуавтоматической линией и т. д.) для массового производства детекторов на дрейфовых трубках (DDT). Кроме того, был разработан и установлен полный набор приспособлений для различного рода тестирования этих DDT-детекторов [254], в том числе с учетом рентгеновского контроля положения проволочек внутри детектора, а также полный комплект приспособлений для прецизионной сборки мюонных камер,

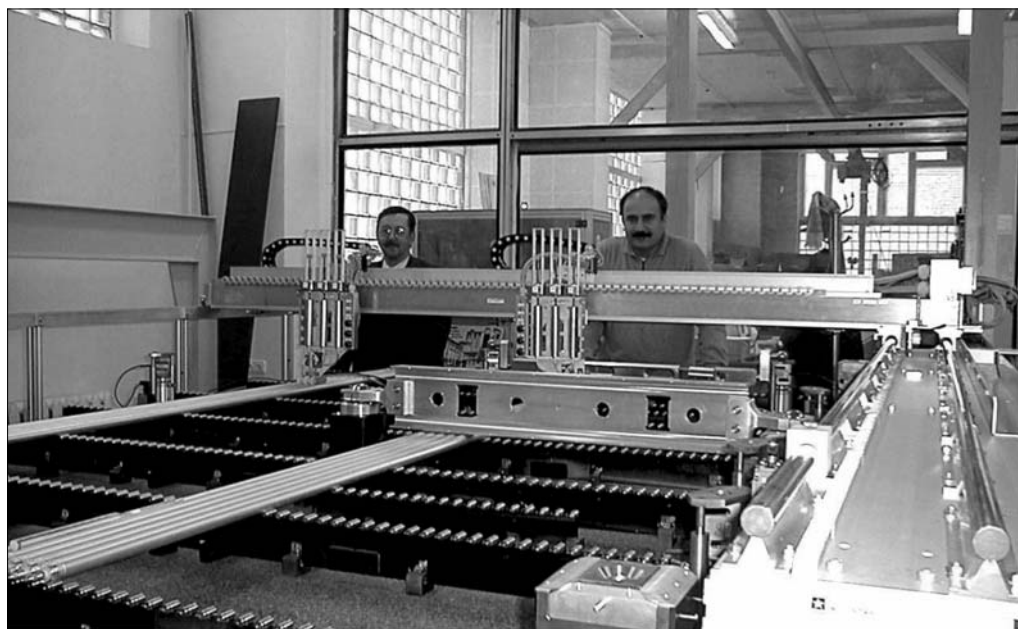


Рис. 3.75. Г. А. Шелков и Э. Цхададзе в помещении ЛЯП для полномасштабного производства и тестирования мюонных камер установки ATLAS

который включал в себя гранитный стол большого размера и ряд специальных устройств для высокоточного позиционирования DDT-детекторов, компьютерной компенсации провисания проволоочек, автомат для склеивания и т. д.

В 2000 г. мюонной группой ОИЯИ было изготовлено, установлено и налажено оборудование участка сборки и испытания мюонных детекторов. В состав участка входили установка для измерения наружного диаметра и эллиптичности алюминиевых трубок до сборки детекторов (точность 2 мкм), полуавтоматизированная линия (рис. 3.76) для сборки детекторов (производи-

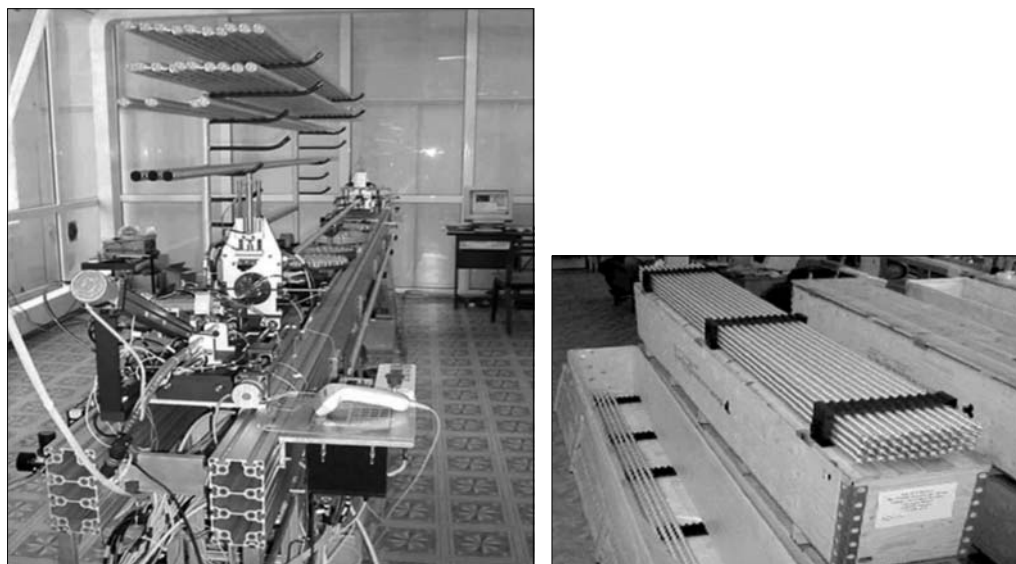


Рис. 3.76. Слева: полуавтоматизированная линия для сборки детекторов в ЛЯП. Справа: готовые камеры. Из [237]

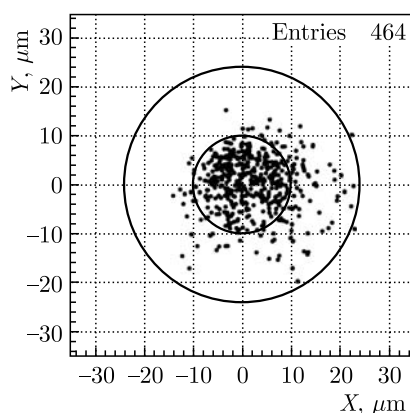


Рис. 3.77. Слева: измерительный узел прибора для определения положения нити относительно оси трубки (на базе рентгеновских трубок и рентгеночувствительных CCD-матриц). Справа: результаты измерения координат анодной проволоочки в собранных детекторах. Из [237]

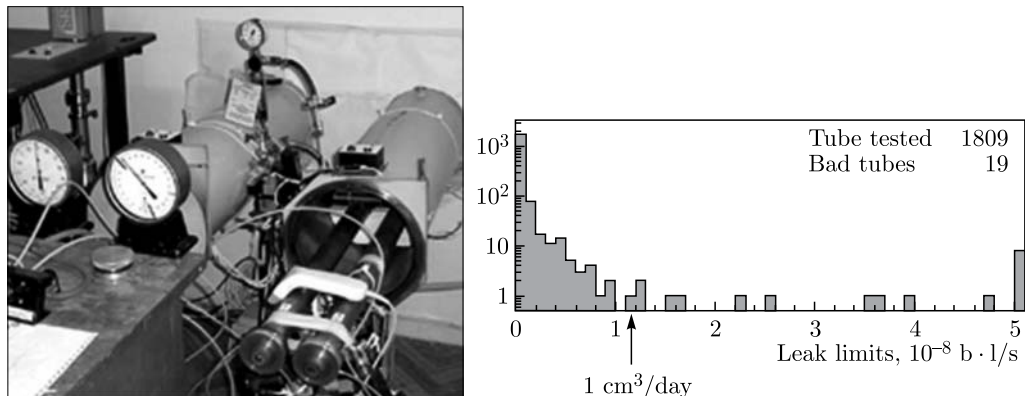


Рис. 3.78. Слева: установка для быстрого измерения величины негерметичности собранного детектора. Справа: результаты измерений

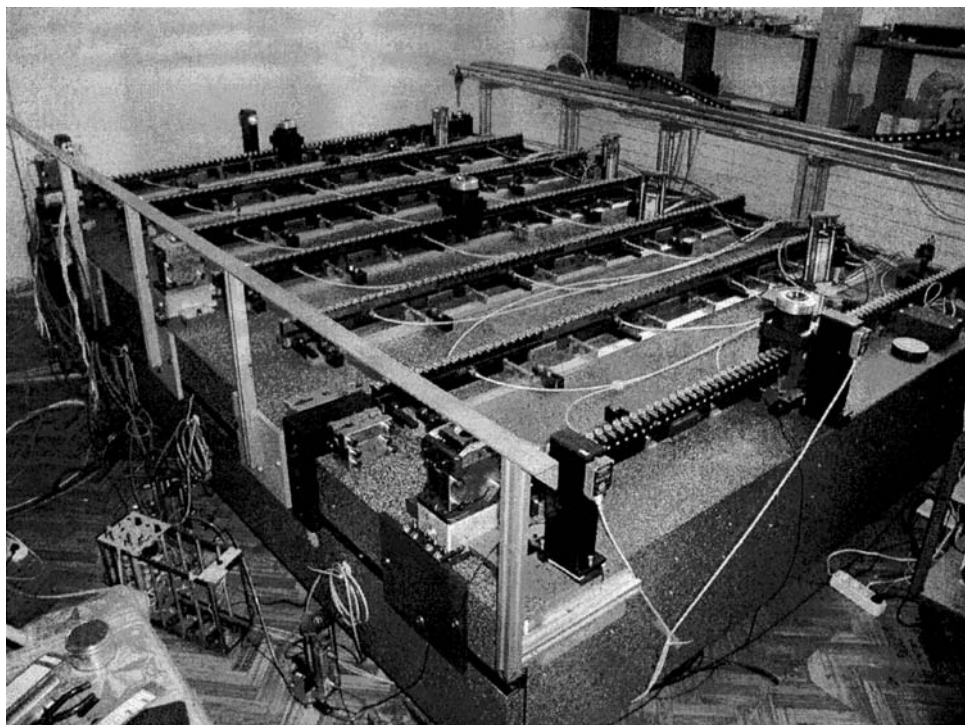


Рис. 3.79. Гранитный стол с семью опорными линиями для сборки камер. Из [255]

тельность до 20 детекторов в час), приборы для измерения величины натяжения анодной нити в собранном детекторе (точность 1%) и для измерения положения нити относительно оси трубки с точностью 3 мкм (рис. 3.77). Кроме того, была собрана установка для быстрого (за 5 мин) измерения величины негерметичности собранного детектора на уровне 10^{-8} бар · л/с (рис. 3.78) и стенд для высоковольтной «тренировки» и проверки уровня



Рис. 3.80. Визит руководителей ЦЕРН в ЛЯП на участок сборки MDT-трубок для мюонной системы детектора ATLAS. ОИЯИ, июнь 2000 г.

темнового тока (с точностью 1 нА) собранных и заполненных рабочей газовой смесью детекторов.

В 2000 г. были завершены монтажные и юстировочные работы на втором участке ЛЯП, предназначенном для сборки мюонных VMS-камер. В состав этого участка входили высокоточный гранитный стол (рис. 3.79) размером $2,7 \times 3,6 \times 0,6$ м, набор из семи высокоточных (3 мкм) эталонных «линеек» длиной 2,2 м каждая (для прецизионной установки горизонтального слоя детекторов), оптическая система для юстировки «линеек» на гранитном столе с точностью 0,3 мрад [255, 256], набор устройств (башен) для взаимного позиционирования склеенных слоев детекторов по вертикали и горизонтали, пневматическая система с обратной связью для компенсации прогиба камеры в процессе сборки, оптико-электронная система контроля точности (5 мкм) взаимного расположения элементов камеры в процессе сборки, а также автомат для нанесения эпоксидного клея при сборке слоев детекторов [255].

В июне 2000 г. была проведена успешная сдача (рис. 3.80) обоих участков (сборки и испытания детекторов и сборки камер) приемной комиссии коллаборации ATLAS [257].

Одновременно с этим было начато массовое производство и испытание детектирующих трубок. Был достигнут проектный уровень производительности участка 500 трубок за две недели, и было произведено более 2700 трубок-детекторов (рис. 3.81). В 2000 г. вклад западных участников сотрудничества

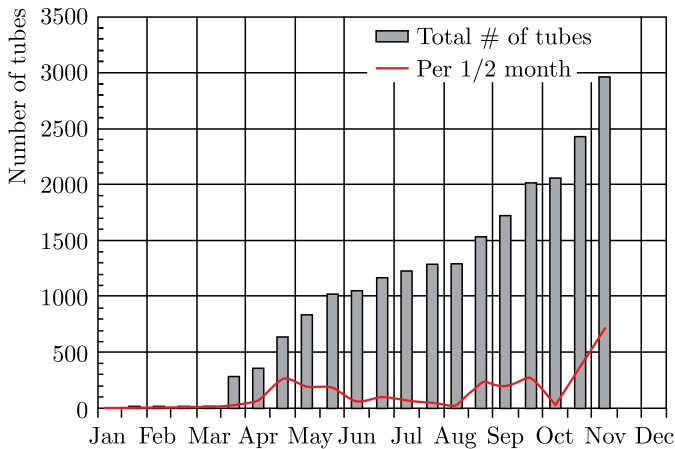


Рис. 3.81. Скорость сборки и испытания детектирующих трубок и суммарное их число на ноябрь 2000 г.

в виде поставки оборудования и приборов для оснащения участка составил более 87 тыс. швейцарских франков. Тем не менее на этом этапе был ряд трудностей, связанных с несвоевременной поставкой коллаборацией алюминиевых труб и комплектующих материалов. Например, задержка в четыре месяца при сборке нулевого модуля VMS-камеры была вызвана несвоевременной поставкой группой Сакле элементов для системы прaksiальной юстировки (alignment system).

3.5.3. Производство мюонных камер в ОИЯИ. В 2001 г. по плану мюонной коллаборации дубненская группа обязана была изготовить 26 BMS-камер. Эта работа оценивалась в размере 4,15 млн руб. Фактически в том году данной группой было произведено 11 800 дрейфовых трубок для BOS-камер и 2500 трубок для BMS-камер. Все эти детектирующие элементы прошли проверку на отклонение положения сигнальной проволоочки от центра трубок (рис. 3.82), на герметичность, а также высоковольтные испытания с рабочим составом газа на космических лучах [258]. Количество не удовлетворявших требованиям трубок не превышало 1%. Описание всей процедуры производства дрейфовых трубок для эксперимента ATLAS в Дубне дано, например, в [259].

В 2001 г. была также отработана и освоена методика сборки MDT-камер (рис. 3.83). Были проведены все необходимые испытания и введены в эксплуатацию система для юстировки опорных линий на гранитном столе и полуавтоматизированная машина для нанесения клея при склеивании дрейфовых трубок. Была организована обработка алюминиевых профилей для спейсеров камер на предприятии МЗОР (Минск). Подробнее о всей процедуре сборки и испытаниях детекторов мюонной системы ATLAS в Дубне изложено в цикле из 11 сообщений ОИЯИ и обзорах [237–239].

По результатам этих важных работ сотрудники дубненской мюонной группы (Д. В. Дедович, А. С. Жемчугов, В. Г. Кручонок, Е. Н. Ильюшенко, Г. Л. Глонти, А. Л. Гонгадзе, М. И. Госткин, С. А. Котов, С. В. Татаринов, В. В. Журавлев, И. Н. Потрап, Е. В. Рогалев, Г. Д. Столетов, Д. В. Харченко) сделали 6 докладов на Шестой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2002).

В 2002 г. мюонная группа ОИЯИ продолжила работы по изготовлению дрейфовых трубок, сборке мюонных MDT-камер, их тестированию и метрологическому контролю. Была изготовлена первая BMS мюонная камера — на рис. 3.84 она показана готовой для транспортировки в ЦЕРН для прохождения рентгеновского теста.

В 2003 г. было завершено производство и испытание всех дрейфовых трубок (24 800 трубок) и продолжена сборка и тестирование мюонных камер [238]. На рис. 3.85 приведена мюонная камера VMF-типа, изготовленная в ОИЯИ.

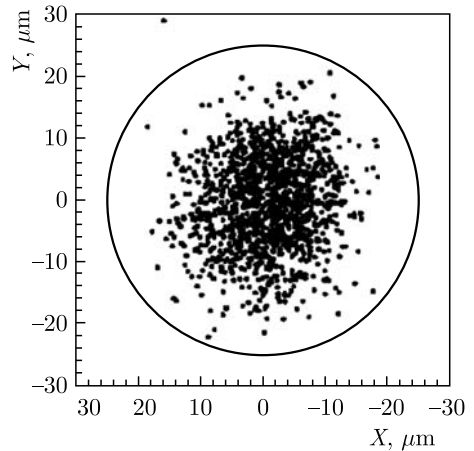


Рис. 3.82. Отклонения положения сигнальных проволоочек от оси алюминиевых трубок по результатам измерений на рентгеновском стенде. Кругом обозначен 24-микронный радиус допустимых отклонений, определенный критериями качества для производства детекторов

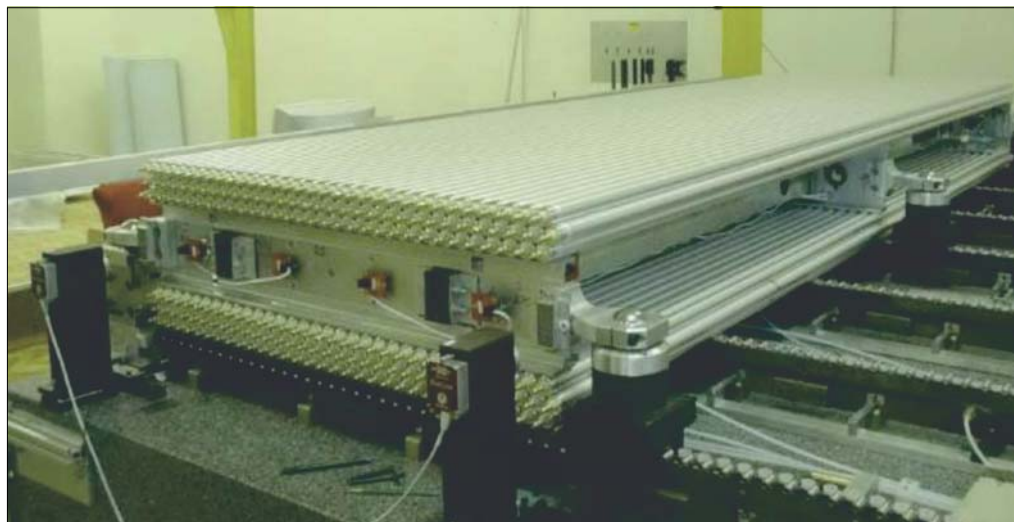


Рис. 3.83. Дрейфовая камера BMS-5 на гранитном столе после окончания склейки шести слоев дрейфовых трубок (3 слоя под несущей фермой и 3 слоя над ней). Камера поддерживается боковыми блоками с помощью сферических опор. На переднем плане видны элементы оптической системы внешней (2 башни) и внутренней (4 блока светодиодов) юстировок



Рис. 3.84. Дрейфовая камера BMS-типа, готовая для отправки в ЦЕРН

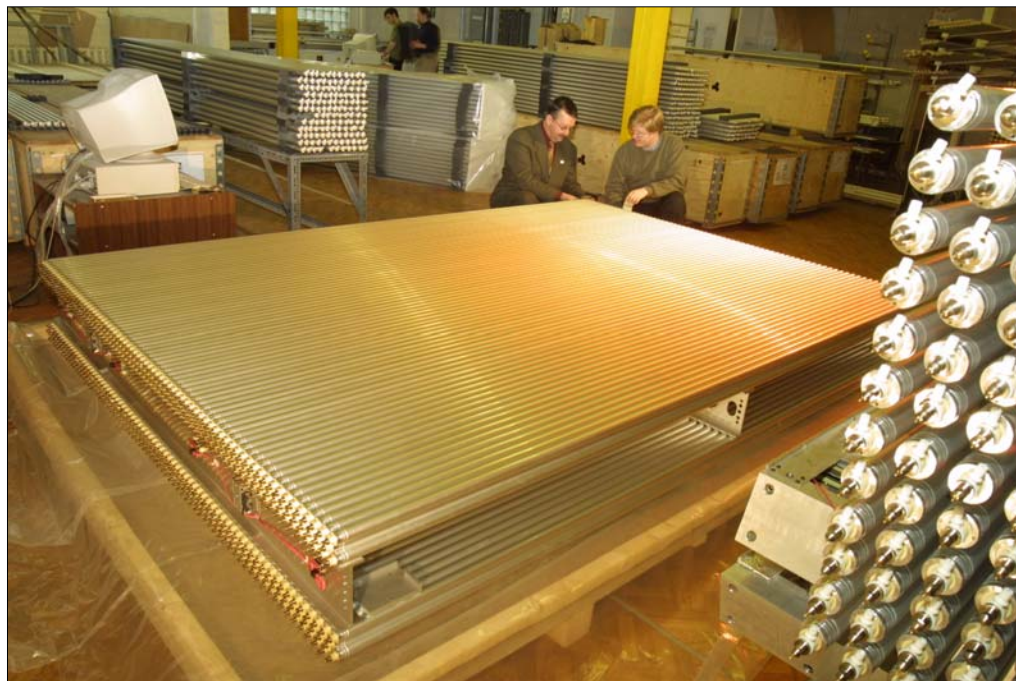


Рис. 3.85. Г. А. Шелков и А. В. Гуськов у одной из первых мюонных камер ВМФ-типа, изготовленных в ОИЯИ

В 2003 г. коллаборацией ATLAS было проведено крупномасштабное испытание всей системы мюонных детекторов на пучковом канале Н8 SPS ЦЕРН. В частности, был выполнен полный тест функционирования MDT-камер с учетом систем юстировки и управления детектором, а также системы сбора данных ATLAS. Была запущена полномасштабная сборка из MDT-камер, которая работала в стабильном режиме в течение нескольких месяцев с наиболее передовыми прототипами интерфейсной электроники. Полученные рабочие характеристики удовлетворили необходимым требованиям [260]. В 2004 г. в течение нескольких месяцев на том же канале SPS были проведены испытания части мюонного спектрометра ATLAS, состоящей из трех секций мониторируемых дрейфовых трубок (MDT). Полномасштабный анализ полученных данных показал стабильность основных параметров для всех камер (калибровочных констант, оптической системы юстировки и т. п.). Эти параметры были измерены и признаны соответствующими в пределах проектных спецификаций [261].

3.5.4. Монтаж мюонных камер в установку ATLAS и их испытания. В 2005 г. с участием специалистов ОИЯИ начался монтаж под землей непосредственно в установку ATLAS изготовленных в ОИЯИ мюонных ВМС-камер. В течение 2006 г. продолжалось их подключение к рабочим коммуникациям ATLAS. Здесь уместно напомнить, что обязательства дубненцев по доставке в ЦЕРН собранных и проверенных в ОИЯИ мюонных камер были полностью и досрочно (на полгода раньше первоначального графика) выпол-

нены. Подключение и тестирование камер велось по общему плану-графику с учетом реальных возможностей доступа и очередности подвода кабелей. В 2005 г. по газу было подключено 75 % всех MDT-камер. В октябре 2006 г. начались испытания на космических мюонах камер 13-го сектора мюонного спектрометра [262].

В 2007 г. было завершено подключение к рабочим коммуникациям 84 мюонных камер типа BMS-BMF, которые были установлены в детектор ATLAS в течение 2005–2006 гг. Все эти камеры успешно прошли предварительную проверку в составе полностью собранной установки ATLAS [262, 263]

Результаты испытания мюонного спектрометра ATLAS в течение 2008 и 2009 гг., когда было собрано несколько сотен миллионов событий в космических лучах (см. также [263]), показали, что детектор практически полностью удовлетворял необходимым требованиям и был готов к регистрации мюонов от протон-протонных столкновений при высоких энергиях LHC [262]. Характеристики мюонной системы при штатной работе детектора ATLAS на основе самых первых данных LHC были описаны в [144]. Исследования системы реконструкции мюонов детектора ATLAS на базе данных работы LHC в 2011–2012 гг. при энергии 7 ТэВ показали высокую эффективность реконструкции (близкую к 99 %) и хорошее импульсное разрешение и стабильность энергетического масштаба [264].

Все результаты этих испытаний подтвердили высокое качество исполнения работы дубненской мюонной группы по изготовлению дрейфовых трубок и сборке их в MDT-камеры.

3.5.5. «Компьютерные» работы дубненской мюонной группы. Здесь следует особо отметить участие мюонной группы (рук. А. С. Жемчугов) в освоении и распространении программных продуктов ATLAS. Группа занималась установкой и поддержкой функционирования текущих версий программного обеспечения на компьютерах фермы общего пользования Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ, а также на специализированной ферме ЛЯП. Пользовательские программы физического анализа были адаптированы для работы с данными в форматах ESD и AOD, в программной среде ATHENA. Данное программное обеспечение и вычислительные мощности ферм в 2004–2009 гг. активно использовались при проведении работ по подготовке к физическим исследованиям.

Второе направление — освоение методики и программного обеспечения распределенной обработки данных с использованием Grid (подробнее см. в п. 3.6). В рамках участия в консорциуме EGEE-RDIG — российском узле сети Grid — ОИЯИ выполнял в эксперименте ATLAS роль одного из центров моделирования и анализа данных (Tier-2). В течение 2006 г. ОИЯИ принимал участие в проведении комплексных испытаний системы распределенной обработки данных и массового моделирования событий ATLAS (Computing System Commissioning and Service Challenge). Кроме того, в контакте с разработчиками были начаты работы по освоению программ распределенного анализа данных ATLAS (GANGA). Постоянно велась адаптация пользовательских программ физического анализа для работы с широким использованием возможностей Grid. Все достигнутые результаты и план дальнейших работ постоянно об-

суждались на рабочих совещаниях российской части коллаборации ATLAS «Физика и компьютеринг в эксперименте ATLAS», например, в Протвино 18 сентября 2006 г. (см. также пп. 3.6 и 5.3).

Работы мюонной группы ОИЯИ по подготовке физической программы эксперимента ATLAS обсуждаются в разд. 4.

Итак, вклад ОИЯИ в создание, сборку и эксплуатацию мюонной детектирующей системы установки ATLAS трудно переоценить. Почти 20% всех детекторов мюонной системы эксперимента были сделаны в ОИЯИ, они показали стабильную и надежную работу во время всего первого этапа набора данных на LHC (Run-I).

Мюонная группа ОИЯИ (рис. 3.86) в коллаборации ATLAS была удостоена в 2001 г. премии ОИЯИ за цикл работ «Автоматизированная линия сборки и испытания детекторов мюонной системы установки ATLAS». Успех работы этой группы определили Г. А. Шелков (как руководитель), А. С. Жемчугов, Э. Цхададзе, А. Гонгадзе, М. И. Госткин, Д. В. Дедович, С. А. Котов, И. Н. Потрап, Д. В. Харченко, В. Ф. Чепурнов, Т. О. Руденко, И. Р. Бойко. Заметный вклад внесли Г. Глonti, Т. И. Котова, В. Н. Жмыров, Г. Д. Столетов, В. Г. Кручонок, Н. К. Кузнецов, Н. Н. Хованский, Т. А. Молоканова, З. В. Крумштейн, С. Ю. Подкладкин, А. В. Барашков, Е. Н. Илюшенко, П. Г. Евтухович, Л. Глonti, Ю. Е. Павлов, Ю. П. Мерексов, М. А. Демичев, М. Шиякова и др.

В настоящее время дубненская мюонная группа принимает участие в модернизации мюонной системы ATLAS, в частности, в создании новых детектирующих систем на базе перспективной технологии MicroMegas (см., например, [265]).

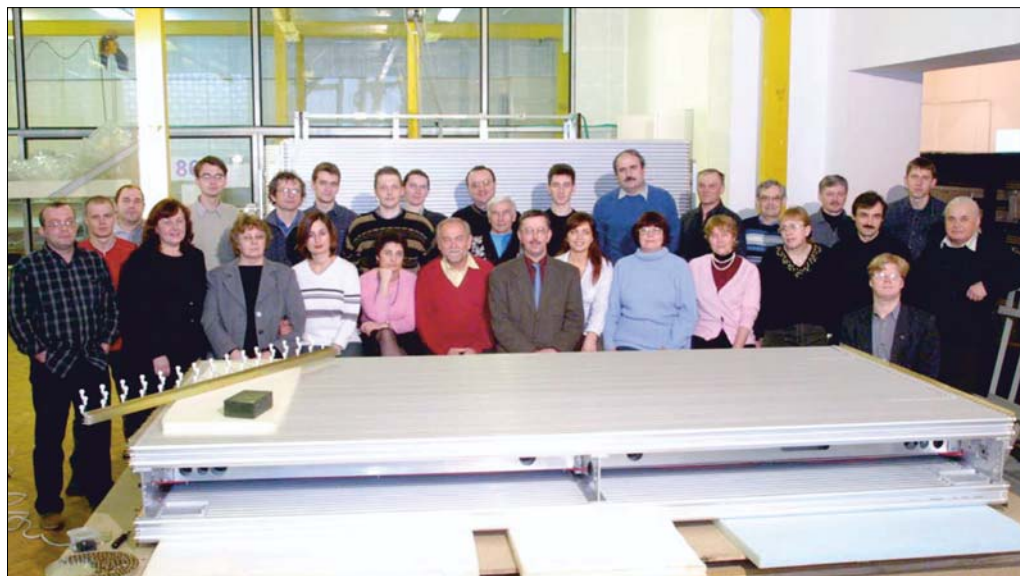


Рис. 3.86. Создатели мюонных MDT-трубок. В центре Ф. Дидак и Г. А. Шелков

3.6. Компьютинг и системы обработки и передачи данных

Безусловно, никакое адекватное участие дубненских ученых и инженеров в создании, эксплуатации, обработке (в том числе и первичной) экспериментальных данных и получении уникальных физических результатов на установке ATLAS было бы невозможно без высокопрофессиональной работы информационно-коммуникационных служб ОИЯИ в лице Лаборатории информационных технологий (ЛИТ, до 2000 г. Лаборатория вычислительной техники и автоматизации). Эта работа началась еще в 1990-х гг. и была весьма многогранной, например, участие ОИЯИ в TDAQ ATLAS обсуждается отдельно в п. 3.7.

Следует отметить, что для полноценного участия в экспериментах на коллайдере LHC нужно было обеспечить доступ к беспрецедентному объему экспериментальных данных тысячам физиков, работавших во многих институтах и университетах по всему миру. Каждая международная коллаборация, нацеленная на проектирование и создание новых уникальных детекторов для проведения экспериментов на LHC, уже тогда насчитывала по несколько тысяч физиков из сотен лабораторий и институтов. Это уникальное явление в научной практике было, по существу, наиболее сложным обстоятельством для проектирования новой компьютерной системы, адекватной задачам LHC. Результатом моделирования такой системы в рамках международного проекта MONARC, осуществленного в конце 1990-х гг., стала распределенная модель вычислительно-коммуникационной архитектуры. Весь объем информации с детекторов LHC после первичной обработки и реконструкции в реальном времени должен был направляться для последующей обработки и анализа в региональные центры. Был обоснован иерархический принцип организации информационно-вычислительной системы LHC, предполагавший создание центров разных ярусов (tier): Tier-0 (ЦЕРН) → Tier-1 → Tier-2 → Tier-3 → компьютеры пользователей (рис. 3.87). Ярусы должны были различаться по масштабу вычислительных и архивных ресурсов и по выполняемым функциям. Так, задачей Tier-0 была первичная реконструкция событий, их

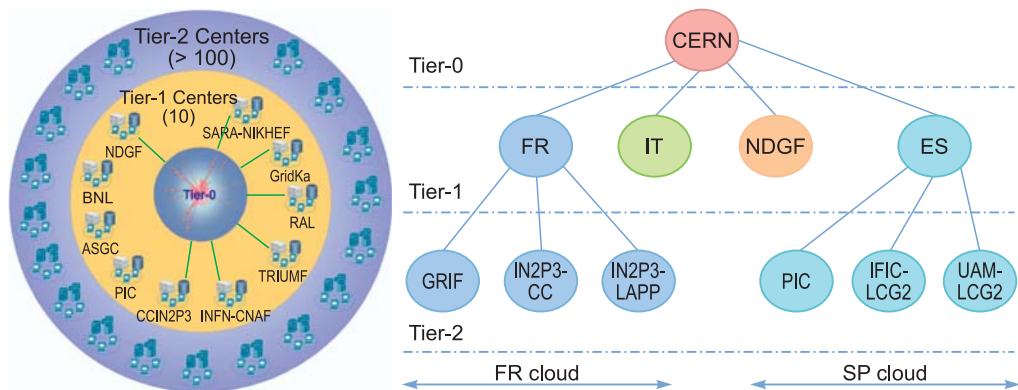


Рис. 3.87. Схема иерархической информационной системы Tier-0–Tier-1–Tier-2 для эксперимента ATLAS. См., например, [266, 267]

калибровка, хранение копий полных баз данных. Tier-1 был предназначен для полной реконструкции событий, хранения актуальных баз данных по событиям, создания и хранения наборов анализируемых событий, для моделирования и анализа. На Tier-2 должны были храниться части полных данных с Tier-1 (реплики) и наборы анализируемых событий, а также должны были проводиться моделирование и физический анализ данных. Ярусы Tier-3 представляли собой кластеры отдельных исследовательских групп.

В конце 1999 г. учеными ОИЯИ и девяти ведущих российских физических институтов — участников экспериментов ALICE, ATLAS и CMS на LHC был сформирован совместный проект под названием «Российский информационно-вычислительный комплекс для обработки и анализа данных экспериментов на Большом адронном коллайдере (РИВК–БАК)». Целью проекта было создание регионального комплекса для обработки и анализа этой экспериментальной информации непосредственно в России. Менее чем за год в ИТЭФ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ и ОИЯИ были созданы фермы персональных компьютеров, ориентированные на LHC. Программное окружение этих ферм было унифицировано и полностью соответствовало специализированному программному обеспечению ЦЕРН. Таким образом, было положено начало для отработки прототипа российского регионального центра. Сотрудники ЛИТ участвовали в работах в рамках соглашения ОИЯИ–ЦЕРН [268].

Новые масштабные задачи физики на LHC требовали новых подходов к моделированию и методам обработки данных. Эта деятельность традиционно была в сфере первоочередных интересов сотрудников ЛВТА ОИЯИ. Поэтому не удивительно, что именно здесь (в 1998 г. и далее) было уделено особое внимание развитию новых перспективных математических методов, основанных на клеточных автоматах, искусственных нейронных сетях, фракталах и вейвлет-преобразовании, и их применению в эксперименте ATLAS и в других областях для решения проблем, возникающих в обработке данных (см., например, [269, 270]). Заметная часть этих работ нашла свое применение в дальнейшем.

В 1998 г. сотрудниками ЛВТА в рамках заключенного соглашения с ЦЕРН было установлено, протестировано и введено в эксплуатацию программное обеспечение BridgeVIEW для широкого круга потенциальных пользователей экспериментов ATLAS и CMS, а также для систем контроля и управления коллайдером LHC. В 2000 г. эти работы были продолжены путем установки, тестирования и сопровождения новых версий систем LabVIEW (вер.6i) и BridgeVIEW (v.3.0).

В 2001 г. в ЛИТ было осуществлено обновление, запуск в эксплуатацию и поддержка базы данных и информационной системы для контроля работы по подготовке элементов установки ATLAS в ОИЯИ. В рамках этого проекта было создано приложение OAS (Oracle Application Server) для представления текущего состояния этой базы данных в глобальной сети. Был также разработан и включен в систему специализированный модуль для еженедельного архивирования этой базы. Помимо этого в сотрудничестве с ЦЕРН и Брукхейвенской национальной лабораторией была разработана объектно-ориентированная программная среда (в рамках ROOT) для решения широкого класса научных задач с использованием рабочих станций и персональных компью-

теров. В частности, на этой основе была создана объектно-ориентированная система ввода-вывода для эксперимента ATLAS.

В 2002 г. в ЦЕРН были начаты работы по проекту LCG (LHC Computing Grid) с целью создания глобальной информационно-вычислительной инфраструктуры для обработки, хранения и анализа данных, полученных во время экспериментов на LHC. Для реализации этой грандиозной задачи была построена масштабная глобальная грид-инфраструктура на основе региональных центров различного уровня (рис. 3.87), обеспечившая моделирование, хранение, передачу и обработку данных LHC.

В 2002 г. были начаты полномасштабные работы по созданию грид-сегмента ОИЯИ и включению его в общемировую грид-структуру LCG [271]. Было начато создание системы глобального мониторинга ресурсов первой крупномасштабной виртуальной организации GRID-LHC в составе локальных сегментов нескольких институтов (НИИЯФ МГУ, ОИЯИ, РИЦ «Курчатовский институт», ИПМ РАН). В 2002 г. эта система уже работала в тестовом режиме и исследовалась возможность применения ее для моделирования и анализа данных экспериментов CMS, ALICE и ATLAS.

В 2002 г. на стадии подготовки коллаборации ATLAS к набору данных LHC (начало ожидалось в 2007 г.) была начата серия так называемых тестов данных (Data Challenge). Их задачей была всесторонняя проверка принятой компьютерной модели LHC, всего программного обеспечения, моделей приема и первичной обработки данных, а также правильности выбора технических решений для окончательной организации компьютерного оборудования. Главная цель первого теста данных (DC1) — как деятельности глобального уровня — была подготовка и установка программного обеспечения, необходимого для производства очень больших наборов данных [272]. Действительно, очень непростой задачей было организовать и провести такого рода крупномасштабную генерацию данных одновременно на значительном числе различных сайтов, распределенных по всему миру. ОИЯИ активно принимал участие как в данном DC1, так и во всех последующих.

В 2003–2004 гг. были продолжены работы ЛИТ по созданию вычислительного сервиса и внедрению грид-технологий в обработку данных, а также продолжена разработка технической и программной поддержки и математического обеспечения для эксперимента ATLAS и других LHC-проектов. В то же время начали проводиться работы в рамках проекта LCG. В частности, было выполнено тестирование данных, передающихся в соответствии с GridFTP-протоколом, был установлен сервер для мониторинга российских сайтов LCG, были изучены различные возможности систем мониторинга (GridICE и MapCenter), разработана система GoToGrid для автоматической установки и настройки пакета LCG-2 и т. п. [273].

Поскольку ресурсы Центрального информационно-вычислительного комплекса (ЦИВК) ОИЯИ (рис. 3.88) постоянно использовались для моделирования и анализа экспериментальных данных участниками экспериментов CMS, ALICE, ATLAS (а также многими другими), то их наращивание велось постоянно. Например, в 2006 г. в составе ЦИВК было 160 процессоров, дисковых массивов объемом 56 Тбайт. Суммарная производительность комплекса составляла около 100 kSI2K [275].

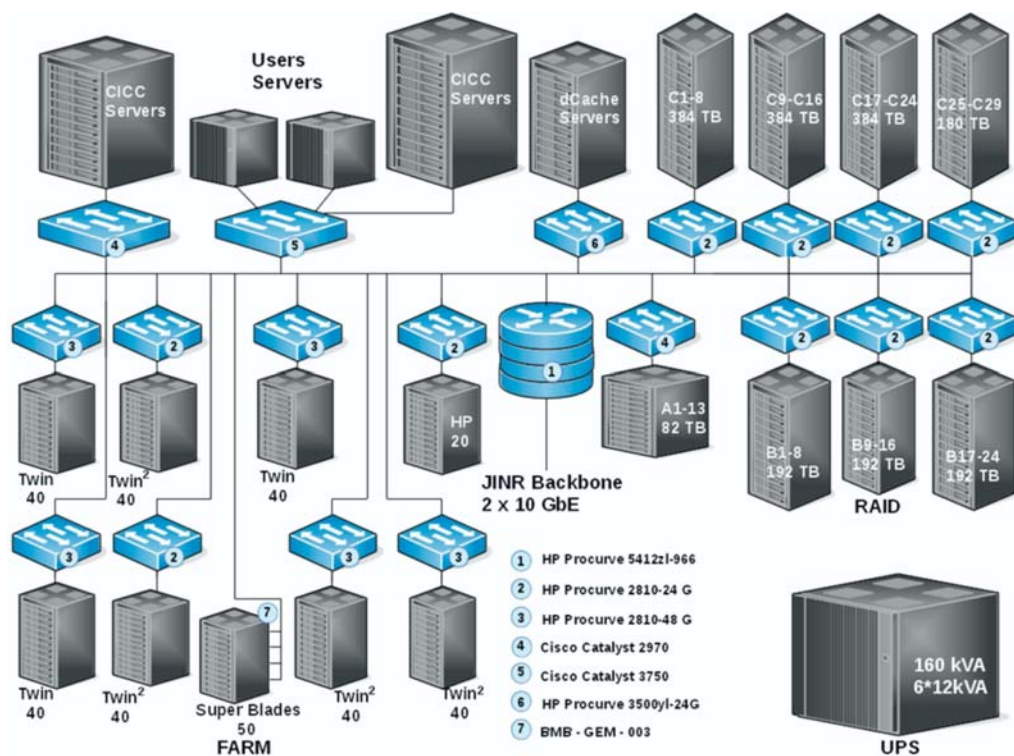


Рис. 3.88. Схема (вверху) и вид (внизу) Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ. Из [274]

С 2004 по 2010 г. ОИЯИ участвовал в проекте EGEE (Enabling Grid for E-sciencE). В рамках этого проекта были выполнены работы по созданию вычислительных сервисов и внедрению грид-технологии в обработку данных. В их числе была поддержка и развитие сегмента LCG ОИЯИ (инсталлировано программное обеспечение для экспериментов на LHC), мониторинг грид-инфраструктуры LCG в ОИЯИ и других сайтов российского кластера Tier-2, модернизация веб-портала LCG/EGEE в ОИЯИ, развитие сервера генераторов физических процессов HEPWEB; участие в Data и Service Challenges для экспериментов CMS, ATLAS и ALICE, а также организация обучения по LCG для пользователей ATLAS и т. п. [276].

В 2007 г. конфигурация JINR-LCG-2 включала в себя 251 вычислительный узел и 82 Тбайт дискового пространства. Эти ресурсы активно использовались в экспериментах ALICE (90 441), ATLAS (15 643), CMS (52 249) и LHCb (10 484). В скобках показано количество пользовательских задач, выполненных на вычислительной ферме JINR-LCG-2 во второй половине 2007 г. Узлами уровня Tier-1 для ОИЯИ служили компьютерные центры FZK (Карлсруэ, Германия) — для ALICE, SARA (Амстердам, Нидерланды) — для ATLAS, ЦЕРН — для CMS и LHCb. Качество связи ЦИВК ОИЯИ с узлами Tier-1 всегда находилось под постоянным наблюдением. Первые пробные сеансы передачи данных с помощью системы FTS между ОИЯИ и узлом Tier-1 (FZK) состоялись в июле–августе 2007 г. [277, 278].

В результате участия ОИЯИ в проектах WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) и EGEE грид-сайт ОИЯИ был полностью интегрирован в глобальную грид-инфраструктуру и обеспечил все необходимые аппаратные, организационные и программные ресурсы для полноценного участия Института в экспериментах ALICE, ATLAS и CMS [279].

В 2008 г. ЛИТ в сотрудничестве с центрами уровня Tier-1 в Карлсруэ (FZK), ЦЕРН и Амстердаме (SARA) участвовала в крупномасштабных сеансах массового моделирования, обработки и анализа физических событий в распределенной среде с использованием грид-технологий (Service, Data, Software and Analysis Challenges, MC Production) для экспериментов ALICE, CMS и ATLAS [280].

В 2007 г. грид-сайт ОИЯИ был полностью интегрирован в ATLAS DDM сервис (Distributed Data Management system), поэтому в 2006–2008 гг. для поддержки пользователей и стимулирования активного использования WLCG-ресурсов в ОИЯИ были организованы специализированные образовательные курсы и лекции, целью которых было освоение программ распределенного анализа данных эксперимента ATLAS (GANGA и PanDA). Пользовательские программы физического анализа были адаптированы для работы с широким использованием возможностей грид.

Для обеспечения успешного участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS на первый план выдвигалась задача подготовки квалифицированных специалистов, способных эффективно использовать официально сертифицированное программное обеспечение, обрабатывать с его помощью в грид-среде беспрецедентные по объему потоки данных и получать физические результаты. С этой целью было организовано специальное обучение сотрудников ОИЯИ на базе ЛИТ, где уже была подготовлена Грид-лаборатория, которая со-

держала оборудованные рабочие места для участников практических занятий, специализированные серверы с необходимым программным обеспечением и аппаратуру для презентаций.

Самые первые практические курсы по распределенному грид-анализу данных (в рамках пакета GANGA) на кластере ATLAS Tier-2 в Дубне были проведены в апреле 2007 г. Поскольку этот кластер был в то время единственным в России полноценно работающим, то в этих занятиях приняли участие многие российские ученые — участники эксперимента ATLAS. В январе 2008 г. прошли аналогичные занятия по использованию пакета GANGA в грид-анализе данных ATLAS. С этих курсов начался новый важный этап участия ЛИТ в работах по эксперименту ATLAS (подробнее в п. 5.3).

В 2008 г. было завершено создание компьютерного кластера Лаборатории ядерных проблем (рук. Ю. П. Иванов), на котором был реализован второй в ОИЯИ вычислительный элемент грид-системы LCG-2 [281]. На нем была установлена конфигурация системы, позволявшая эффективное совместное использование кластера как локальными пользователями ЛЯП, так и другими в рамках грид-вычислений коллаборации ATLAS [282]. В 2008 г. также интенсивно велась настройка вычислительного центра ОИЯИ для приема и обработки данных (с использованием грид), была начата работа по подготовке к грид-анализу данных, а также было практически завершено создание пункта мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ.

В рамках участия в консорциуме EGEE-RDIG ОИЯИ выполнял в эксперименте ATLAS роль одного из центров моделирования и анализа данных (Tier-2). В конце 2005 г. на компьютерах фермы общего пользования Центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ было установлено, затем постоянно поддерживалось и обновлялось программное обеспечение эксперимента ATLAS. В начале 2007 г. элемент хранения данных ЦИВК был интегрирован в систему управления данными ATLAS (ATLAS DDM). В августе 2007 г. ОИЯИ принял участие в проведении комплексных испытаний данной системы. Испытания показали надежную работу ЦИВК и, в первую очередь, элемента хранения ОИЯИ в составе системы управления данными ATLAS. Была продемонстрирована готовность ОИЯИ к приему первых данных с установки.

В 2009 г. в ЛИТ ОИЯИ были выполнены все работы по подготовке среды для приема и обработки данных экспериментов ALICE, ATLAS и CMS в соответствии с компьютерными моделями этих экспериментов. Они включали обеспечение компьютерными ресурсами согласно запросам, возможность использования этих ресурсов в глобальной грид-инфраструктуре, установку и сопровождение в ОИЯИ необходимого промежуточного программного обеспечения, специальных грид-сервисов и прикладного программного обеспечения. Помимо этого сотрудники ОИЯИ участвовали в централизованном Монте-Карло моделировании событий и их анализе, в проведении функциональных проверок распределенной системы управления данными, в так называемых стресс-тестах компьютерной инфраструктуры ATLAS, в комбинированных проверках LHC Computing System (STEP09), в разработке и наладке распределенного компьютерного математического обеспечения, а также проводились работы в рамках так называемого SARA cloud по подготовке

к приему и обработке данных в рамках ADC (ATLAS Distributed Computing) группы.

Коллаборации ATLAS в 2009 г. грид-инфраструктура ЦИВК ОИЯИ предоставила возможность выполнить 777 996 заданий, задействовав при этом 5 204 620 kSi2K-4 процессорного времени, что составило более 1/3 всех использованных в 2009 г. ресурсов. На основании всего этого уже в 2010 г. был выполнен большой объем работ по приему и обработке реальных данных экспериментов ALICE, ATLAS и CMS в ОИЯИ. Грид-сайт ОИЯИ являлся тогда лучшим из всех сайтов на территории России.

В 2009–2011 гг. сотрудники ЛЯП ОИЯИ, находившиеся в ЦЕРН, в рамках группы централизованной поддержки, были заняты обеспечением устойчивой работы ADC-системы. В данную систему входил набор серверов, расположенных в ЦЕРН и осуществлявших как рассылку вычислительных задач по 11 компьютерным центрам (Tier-1), так и саму передачу данных с установки ATLAS. На ADC-машинах работали основные сервисы: Distributed Data Management system (DDM), Tier-0 system, PanDA, GANGA, pAthena и ADC Monitoring. Эти сервисы должны были работать непрерывно, возникавшие проблемы с компьютерами должны были решаться оперативно (в течение часа). В зоне ответственности этой группы находилось более 220 компьютеров, а также успешная взаимосвязь членов коллаборации ATLAS с IT-подразделением ЦЕРН.

В 2010 г. возникла проблема обеспечения целостности распределенного хранения информации эксперимента ATLAS. Совместно с ЦЕРН в рамках DDM-ATLAS сотрудниками ЛИТ была проведена разработка одного из центральных сервисов системы управления данными эксперимента ATLAS (DQ2) — сервиса удаления данных (Data Deletion Service), который предназначен для централизованного удаления ненужных и/или поврежденных данных эксперимента ATLAS на сайтах Tier-0–Tier-1–Tier-2 (см. рис. 3.87). Сервис удаления данных является одним из основных в системе управления распределенными данными ATLAS. Он обслуживает запросы на удаление данных, организует балансировку нагрузки, обеспечивает масштабируемость и отказоустойчивость системы, а также определяет стратегию повтора операций в случае возникновения отказов. Была разработана новая архитектура сервиса, ядро системы, интерфейс между компонентами, создана новая схема базы данных и интерфейс к системам хранения данных, модернизирована система мониторинга. Созданный сервис надежно обеспечивает целостность хранения информации в географически распределенной среде при очень большой нагрузке. На рис. 3.89 представлены архитектура, компоненты и схема взаимодействия созданного сервиса удаления данных в системе управления распределенным хранилищем эксперимента ATLAS.

Использование веб-сервисных технологий позволило создать гибкую и масштабируемую систему, а также обеспечить интеграцию сервиса удаления данных с другими сервисами DQ2. Были также реализованы подсистемы мониторинга сервиса и интерфейс просмотра и поиска ошибок. С ноября 2010 г. все сайты уровней Tier-0–Tier-1–Tier-2 эксперимента ATLAS стали обслуживаться обновленным сервисом удаления данных. В сутки в рамках всей грид-инфраструктуры ATLAS удалялось около 1 миллиона файлов об-

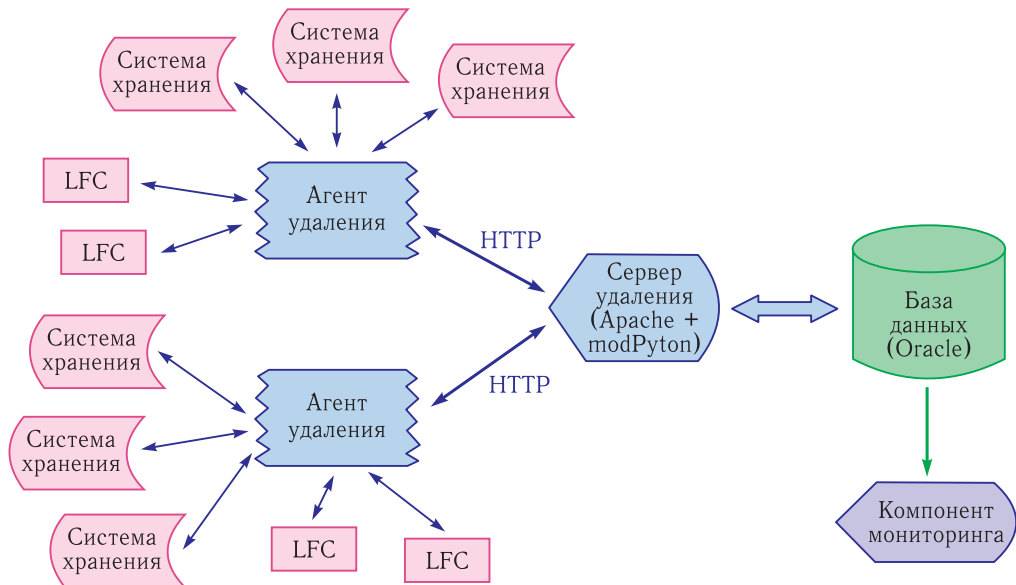


Рис. 3.89. Архитектура, компоненты и схема взаимодействия сервиса удаления данных

щим объемом 300 Тбайт [283]. Эти работы были продолжены в 2011 г., в них были достигнуты заметные успехи, которые были высоко оценены коллаборацией ATLAS. Создание и поддержка сервиса удаления данных, отвечающего за репликацию, доступ и учет данных эксперимента в более чем 100 распределенных грид-сайтах, стали одним из важных вкладов команды ЛИТ в эксперимент ATLAS [283].

В 2011 г. грид-сайт ОИЯИ был лучшим среди сайтов RDIG (Russian Data Intensive GRID) и успешно выполнял большой объем работ по приему и обработке данных экспериментов LHC [284, 285]. На рис. 3.90 показан вклад ОИЯИ в обработку заданий RDIG и экспериментов ALICE, ATLAS и CMS.

В 2010 г. ОИЯИ включился в тогда новую и быстроразвивавшуюся компьютерную деятельность коллаборации ATLAS по созданию грид-узлов уровня Tier-3. Задачей узла Tier-3 было проведение физического анализа, дополнительного к тем, которые изначально планировались на узлах уровня Tier-2, с целью разгрузки этих общих узлов. Наличие таких узлов Tier-3 позволяло отдельным ученым выполнять интерактивный анализ данных на базе локальных компьютерных ресурсов [287]. Считалось удобным проводить ускоренную обработку данных путем распараллеливания вычислительных процессов с помощью пакета PROOF (Parallel ROOT Facility) [288], а также путем использования доступа к данным с помощью распределенного их хранилища Xrootd (см., например, [289]). Прототип ATLAS Tier-3 был успешно запущен в 2010 г. на компьютерной ферме ЛЯП [281].

В 2011 г. началось создание системы мониторинга сайтов уровня Tier-3 эксперимента ATLAS [288], которые уже были запущены или планировались в институтах и организациях коллаборации ATLAS. Эти сайты не всегда

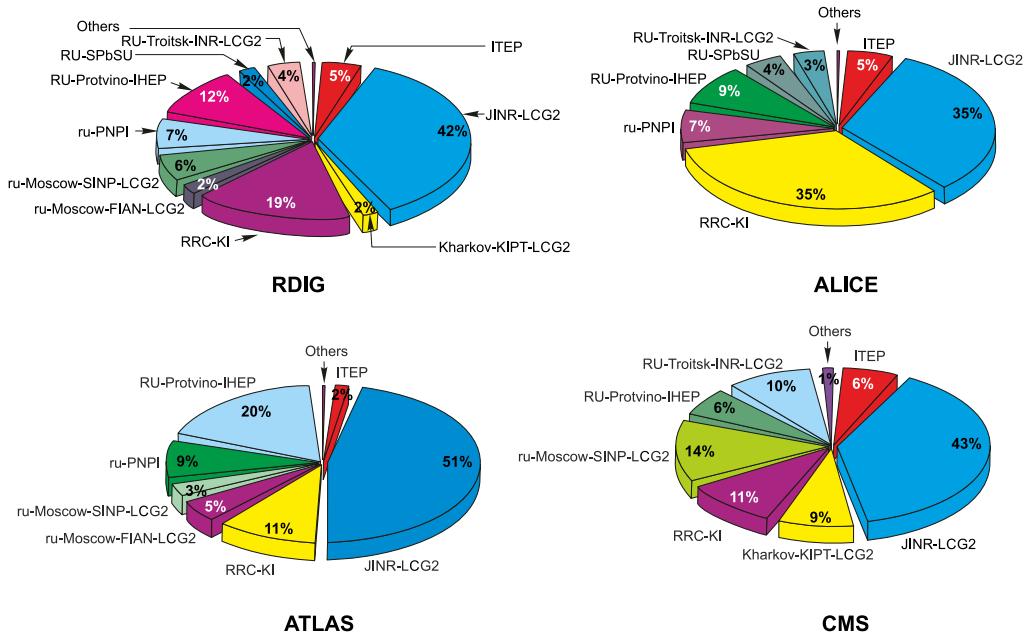


Рис. 3.90. Вклад грид-сайта ЦИВК ОИЯИ (JINR-LCG2) в обработку заданий в RDIG и экспериментах ALICE, ATLAS и CMS в 2011 г. Из [286]

были снабжены соответствующим программным обеспечением грида и были предназначены для анализа данных локальными научными группами. Сотрудники ЛИТ участвовали в проекте ТЗМОН [290], который был направлен на разработку программного комплекса для мониторинга сайтов Tier-3 как с точки зрения локального администратора сайта, так и с точки зрения администратора всей виртуальной организации ATLAS. Таким образом обеспечивался глобальный взгляд на вклад сайтов Tier-3 в полноценный вычислительный процесс эксперимента. В рамках проекта ТЗМОН в 2012 г. сотрудниками ЛИТ был разработан пакет программ, позволявший проводить мониторинг сайтов Tier-3, не входящих в грид-инфраструктуру эксперимента ATLAS [291].

Другой важной стороной была разработка и развитие программного обеспечения распределенного компьютеринга. В частности, это касалось разработки компонентов распределенной системы управления данными, а именно уже упомянутый выше DQ2 сервис удаления данных для эксперимента ATLAS [292]. Для примера, в 2012 г. данные эксперимента ATLAS были распределены на более чем 100 грид-сайтах с общим объемом дискового пространства около 150 Пбайт, в котором хранились сотни миллионов файлов. Недельный объем удаляемых данных тогда составлял 2 Пбайта (20 млн файлов).

Таким образом новый инфраструктурный слой — система распределенной обработки данных экспериментов на ЛHC [293], состоящий из центров уровня Tier-3, вносил существенный вклад в физический анализ экспериментальных данных. К этому уровню относились разнообразные вычислительные ресурсы

(серверы, кластеры, суперкомпьютеры), находившиеся вне централизованного управления и планирования, на которые не распространялись какие-либо единые требования, касающиеся технических решений.

Для систематического исследования центров уровня Tier-3 в ОИЯИ была создана виртуальная тестовая инфраструктура, которая позволяла моделировать различные кластеры Tier-3, решать задачи хранения данных (рис. 3.91), а также создавать прототипы различных конфигураций центров уровня Tier-3. Эта инфраструктура была реализована на базе виртуальных кластеров, что позволяло настраивать или разрабатывать средства локального мониторинга, вырабатывать рекомендации по системе сбора информации для глобального мониторинга центров уровня Tier-3 [294].

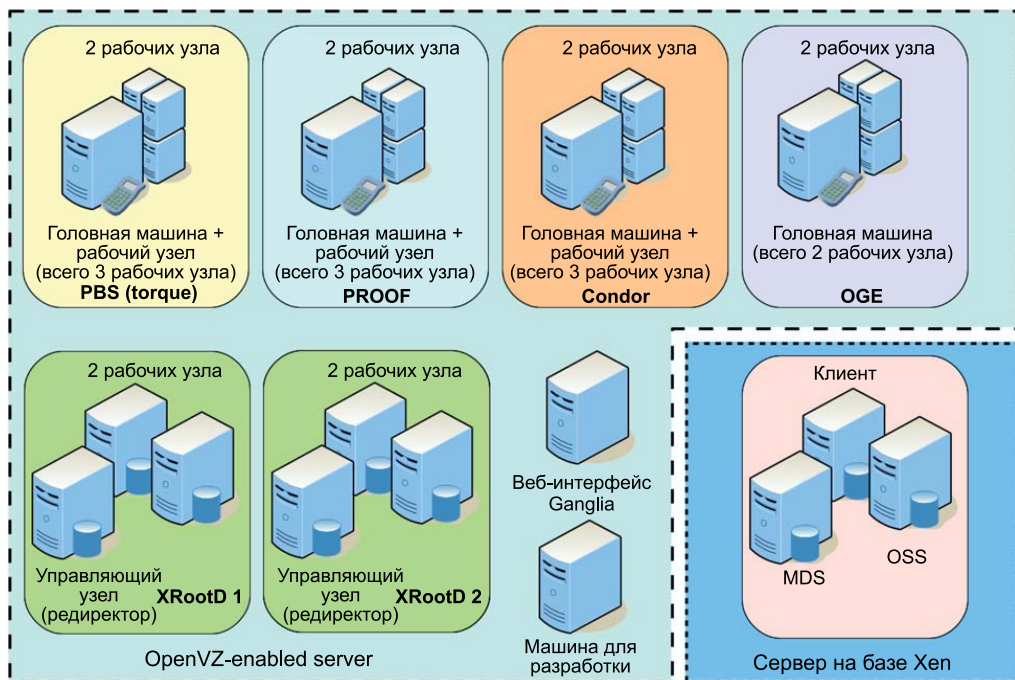


Рис. 3.91. Архитектура тестовой инфраструктуры на базе виртуальных кластеров для исследования разных конфигураций центров уровня Tier-3

В 2012 г. была продолжена систематическая работа ЛИТ ОИЯИ в рамках таких крупномасштабных грид-проектов, как «Всемирный вычислительный грид для LHC» и «Европейская грид-инфраструктура». ЦИВК ОИЯИ, как грид-сайт JINR-LCG-2 глобальной грид-инфраструктуры, успешно поддерживал вычисления десяти виртуальных организаций (в том числе ALICE, ATLAS, CMS, LHCb), а также предоставлял возможность использования грид-ресурсов для других экспериментов ОИЯИ (например, CBM и PANDA).

Для обслуживания грид-сайта в ОИЯИ было установлено 22 сервера с соответствующим программным обеспечением промежуточного уровня. Кроме функций поддержки работы самого сайта JINR-LCG-2 часть серверов

также реализовывала важные сервисы и функции поддержки российского сегмента проекта WLCG. С учетом надежности и доступности в 2012 г. сайт ОИЯИ являлся одним из наиболее эффективных сайтов уровня Tier-2 в мире [295, 296], а также лучшим среди грид-сайтов RDIG [297, 298].

В 2013–2014 гг. была продолжена работа по интеграции параметров сетевых соединений между сайтами инфраструктуры коллаборации ATLAS в процессах принятия решений системы обработки задач PanDA (Production and Distributed Analysis System). В частности, были созданы несколько сервисных программ, которые занимались сохранением, переносом и фильтрацией различного рода данных в среде PanDA [267, 299]. Здесь следует отметить особую значимость этой среды. PanDA — это система управления заданиями обработки данных, реализующая единую очередь заданий как для пользовательского анализа, так и для моделирования данных и их массовой обработки. Она создавалась как система управления загрузкой ресурсов коллаборации ATLAS. Отличительной особенностью системы является то, что задания всех типов отправляются в обработку через один и тот же интерфейс. Это позволяет скрыть всю сложность процессов и инфраструктуры, которая стоит за отправкой задания в обработку, и сделать работу распределенной среды обработки простой и понятной для пользователя. В дальнейшем задание, отправленное в систему, обрабатывается, в зависимости от условий, необходимых данных и ресурсов, на одном из примерно двухсот вычислительных сайтов, подключенных к обработке заданий эксперимента ATLAS. При этом пользователь не беспокоится о том, на какой ресурс отправить задание, решение принимается автоматически на основании доступных ресурсов и их параметров, наличия на вычислительном ресурсе необходимых для выполнения задания данных, параметров задачи, ее типа. Архитектура PanDA представлена на рис. 3.92.

PanDA разрабатывалась как система, предназначенная для функционирования в режиме больших нагрузок, обеспечивающая обработку данных в распределенной среде, и используется коллаборацией ATLAS с 2005 г. С 2007 г. система стала единственной средой запуска и массовой обработки данных коллаборации. С 2008 г. она была адаптирована к запуску задания пользовательского анализа. В 2013 г. PanDA начала работать с облачными ресурсами. В 2015 г. систему дополнили компоненты, позволяющие выполнять задачи на суперкомпьютерах. С этого времени большой процент задач моделирования выполняется на такого рода ресурсах. Система работает со всеми типами популярных локальных планировщиков заданий и использует весь набор протоколов передачи данных, используемых в Грид-сообществе. В настоящее время через систему проходит до двух миллионов заданий ежедневно. За эти годы в центре Tier-2 ОИЯИ было выполнено более 20 миллионов заданий, что составило 60,5% от общего числа задач.

Богатый опыт, накопленный сотрудниками ЛИТ ОИЯИ в области компьютеринга эксперимента ATLAS, оказался очень востребованным, например, в прикладных и коммерческих приложениях облачных технологий, а также в бурно развивающейся сфере суперкомпьютеров [300].

Итак, невозможно не отметить исключительную важность и многогранность роли ЛИТ в подготовке и проведении многоплановых работ ОИЯИ

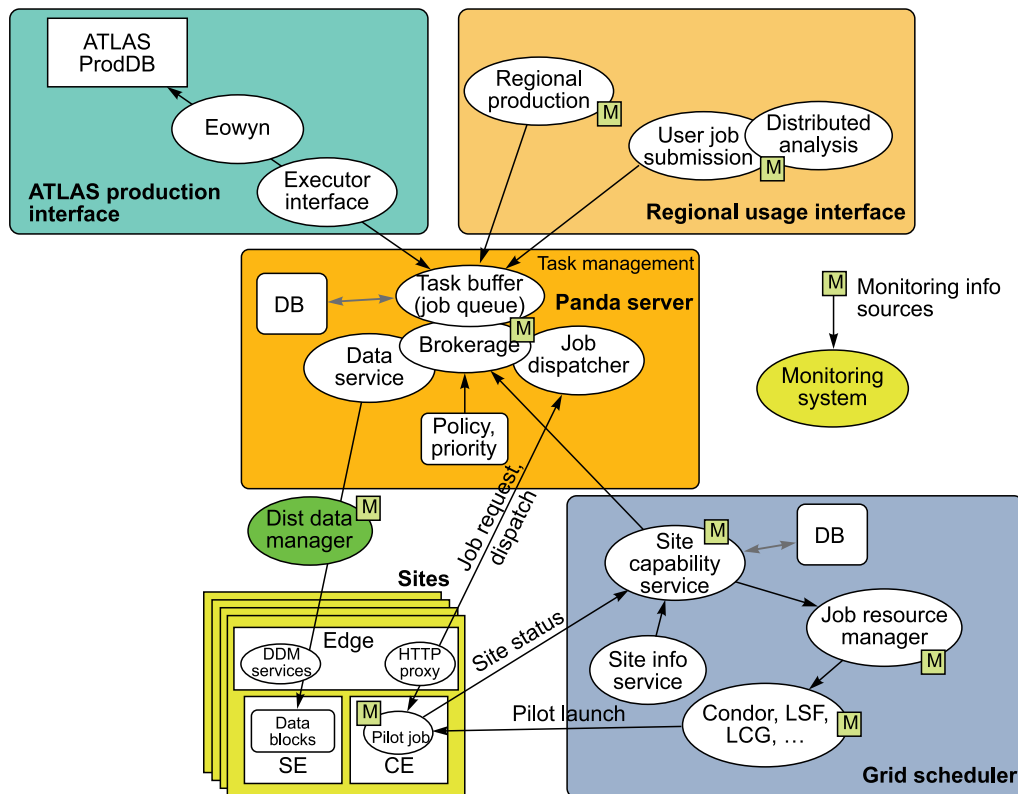


Рис. 3.92. Архитектура среды PanDA

в рамках эксперимента ATLAS. Излишне говорить, что ни один современный эксперимент немаловажен без высокоэффективной информационно-вычислительной поддержки. Здесь вполне можно сказать больше — без этого важнейшего элемента нет смысла обсуждать тот или иной предлагаемый эксперимент. Поэтому руководство эксперимента ATLAS в ОИЯИ считает своим приятным долгом поблагодарить руководство ЛИТ в лице В. В. Иванова, П. В. Зрелова, В. В. Коренькова, Т. А. Стриж, а также сотрудников ЛИТ С. Д. Белова, Д. В. Белякова, Д. С. Голубя, Н. И. Громова, А. Г. Долбилова, И. С. Кадочникова, Н. А. Кутовского, В. В. Мицына, Д. А. Олейника, А. С. Петросяна, Е. А. Тихоненко, В. В. Трофимова и др. как за помощь в освоении математического обеспечения эксперимента ATLAS, так и за высококачественную информационно-вычислительную поддержку усилий сотрудников ОИЯИ на разных этапах работ.

3.7. Система триггирования и сбора данных

В Лаборатории информационных технологий ОИЯИ основным направлением деятельности сектора распределенных систем реального времени (PCPB) было участие в разработке и запуске TDAQ-системы триггирования

и сбора данных (от Trigger and Data Acquisition) в эксперименте ATLAS [301, 302]. Второе направление — создание на основе экспериментального полигона TDAQ прототипа системы мониторинга для контроля качества экспериментальных данных и оценки возможности удаленного доступа из ОИЯИ к сервисам мониторинга TDAQ, выведенным в ATLAS Control Room в ЦЕРН.

Практически с начала проекта ATLAS в ОИЯИ (см. п. 3.1) входящая в этот сектор группа TDAQ вместе с сотрудниками институтов стран-членов ОИЯИ участвовала в проектировании, разработке и запуске on-line программного обеспечения (software) системы сбора и обработки данных TDAQ ATLAS [303]. На всех этапах работ (разработка, отладка, тестирование, модернизация и т. п.) группа отвечала за два главных «продукта» — программу Resource Manager, входящую в состав системы контролирования установки ATLAS (Control Systems), и программу Event Dump из системы мониторинга ATLAS (Monitoring Systems). Группа довела в 2006 г. эти продукты до их окончательных версий [304] и обеспечила полноценный запуск TDAQ ATLAS в 2007 г. [305, 306].

Для выполнения обязательств по участию в разработке TDAQ в секторе РСРВ был создан экспериментальный полигон, представлявший собой фрагмент триггера ATLAS высокого уровня (HLT), на котором был установлен полный набор релизов программного обеспечения TDAQ, что было необходимо для адекватного участия в разработке системы мониторинга качества данных на завершающей фазе отладки программного обеспечения [307]. Эта разработка использовалась в ОИЯИ как пример применения сервисов TDAQ в процессе off-line обработки данных для задач физических групп ОИЯИ, участвующих в проекте ATLAS. Несколько подробнее основные этапы участия TDAQ-группы ОИЯИ в работах на эксперименты ATLAS изложены ниже.

В 1994–1998 гг. сотрудники сектора занимались вопросами разработки методов и алгоритмов отбора полезных событий с мюонного детектора ATLAS [308, 309]. Далее (1998–2000 гг.) в соответствии с принятым планом работ по проекту системы триггирования и сбора данных TDAQ детектора ATLAS были разработаны предложения по прототипу программного обеспечения (software) Back-end для TDAQ [309–311]. Это программное обеспечение (код Back-end) представляло собой часть проекта DAQ/Event Filter Prototype «1» [312], разрабатывавшегося в те годы для эксперимента ATLAS. Оно аккумулировало в себе все другие программные продукты, нацеленные на конфигурирование, контролирование и мониторинг системы сбора и обработки данных (DAQ), однако не имело отношения к вопросам управления и транспортировки реальных данных [313].

В 2003 г. первые итоги разработки приложений мониторинга сбора и обработки данных установки ATLAS LHC (программа Event Dump) были доложены на XV Научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» [314]. Задача программы Event Dump состояла в обеспечении мониторинга (рис. 3.93) правильности форматирования необработанных (raw data) физических данных [315].

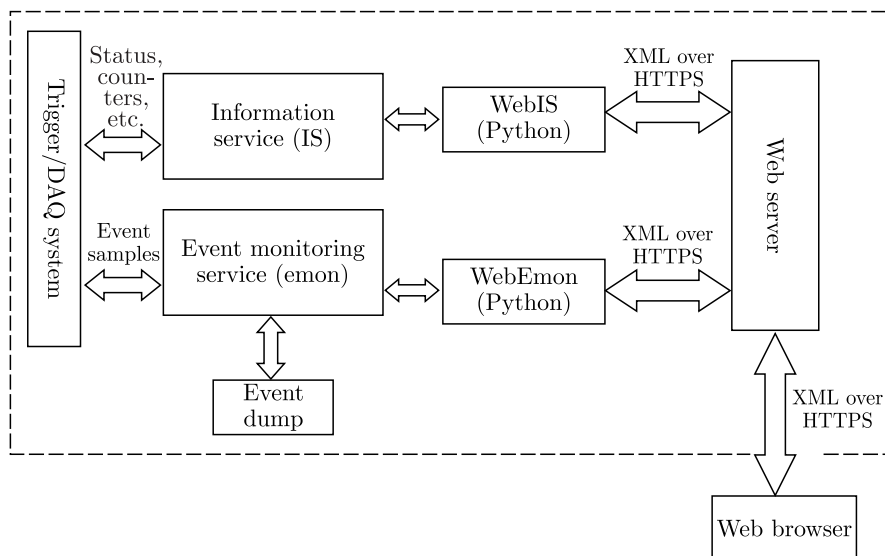


Рис. 3.93. Организация мониторинга необработанных событий (raw data). Из [316]

В дальнейшем (2008 г.) пакет Event Dump [303] был включен в штатное программное обеспечение системы сбора и триггирования данных ATLAS (триггер первого уровня). С помощью графического интерфейса пользователя (рис. 3.94) можно было выбрать поставщика событий (data-flow TDAQ ATLAS) и получить от него физическое событие. Далее была возможность просмотреть структуру события. Перед началом работы Event Dump создавался перечень доступных поставщиков событий, которые группировались в виде дерева по программно-аппаратным комплексам, являющимся частью детектора ATLAS, которые могли функционировать независимо друг от друга (partitions). Event Dump позволял просматривать параметры заголовков и структуру событий. Для специфических параметров, характерных только для некоторых подсистем ATLAS, была возможность написания кода обработки и добавления его в виде созданных самими пользователями панелей [316].

В 2005 г. TDAQ-сотрудниками ЛИТ был разработан комплект программных средств для менеджера ресурсов Resource Manager системы триггирования и сбора данных ATLAS [317]. Эта работа была выполнена в полном соответствии с принятыми в ЦЕРН стандартами и правилами объектно-ориентированного подхода к проектированию программного обеспечения [318–320]. В 2016 г. на конференции CHEP-2016 с участием сотрудников ОИЯИ был сделан обзорный доклад «The Resource Manager of the ATLAS Trigger and Data Acquisition System».

В 2006 г. были полностью выполнены обязательства ОИЯИ по участию в разработке он-лайн программного обеспечения TDAQ ATLAS [321, 322]. Созданные дубненцами компоненты этого он-лайн программного обеспечения — Resource Manager и Event Dump — были включены в состав окончательной версии всего программного обеспечения TDAQ, подготовленного

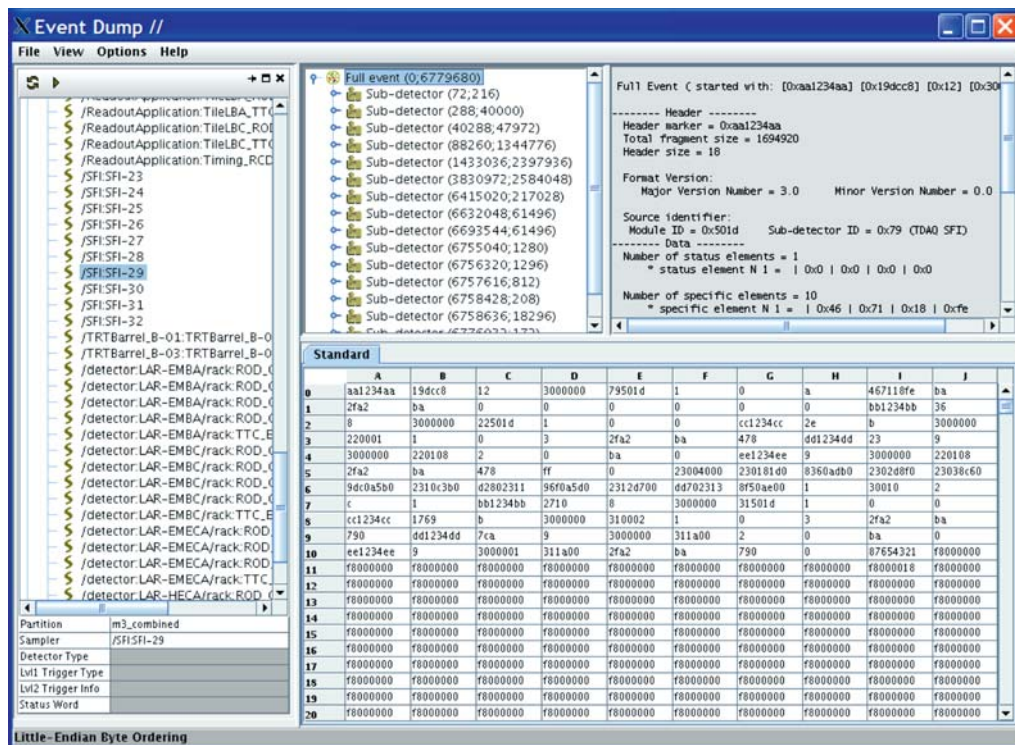


Рис. 3.94. Графический интерфейс Event Dump, позволяющий выбрать определенный детектор, блок аппаратуры или модуль, с которого можно считать событие, задав параметры для его выбора. Из [303]

в коллаборации ATLAS для запуска в 2007 г. на фазе Dress Rehearsal [323–325].

В рамках продолжения работ по TDAQ ATLAS в ЛИТ был создан испытательный полигон для инсталляции программного обеспечения Data Quality Monitoring Framework (DQMF). Эта программа представляла собой реализацию в TDAQ он-лайн мониторинга анализа качества физических данных в автоматическом режиме [326, 327]. Она показала высокую эффективность при работе с физическими данными. Функционирование DQMF в облачной среде ЦЕРН (рис. 3.95) требует наличия сервисов информационного обмена TDAQ, на которых публикуются данные и оценка которых производится системой. Описание конфигурации содержится в соответствующей базе данных Configuration Data Base [316]. Работоспособность DQMF была проверена на тестовых задачах, проводившихся на специальных стендах. В 2007–2008 гг. были продолжены работы по развитию и поддержке компонентов системы сбора и триггирования данных ATLAS — Event Dump, Resource Manager и Web Monitoring Interface [328, 329].

В 2009 г. группа TDAQ ATLAS ЛИТ занималась наладкой системы TDAQ ATLAS в ЦЕРН и принимала участие в окончательной подготовке к запуску эксперимента ATLAS [330, 331]. Итоги работ по созданию многоуровневых

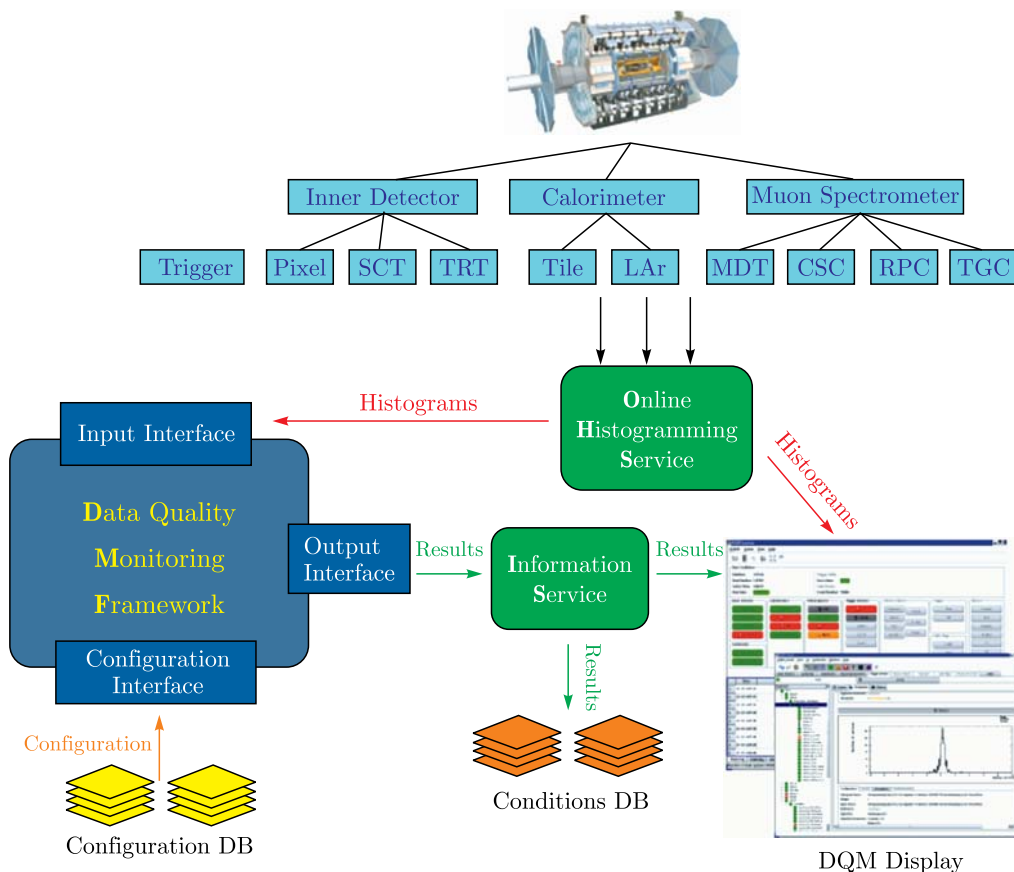


Рис. 3.95. Структура системы мониторинга качества данных DQMF. Из [327]

распределенных вычислительных систем обработки данных в рамках проекта TDAQ ATLAS докладывались на международных конференциях [332, 333].

Как известно, современный уровень информационно-коммуникационных технологий уже вполне позволяет упростить контроль и мониторинг установки ATLAS и делает возможным получение необходимых данных о состоянии детектора практически из любой точки мира. Для реализации в Дубне этой возможности было решено создать пункт дистанционного мониторинга установки ATLAS в ОИЯИ. Наличие такого пункта позволяло бы любому желающему, включая экспертов подсистем, в любое время суток получать сведения о состоянии установки ATLAS и контролировать качество данных непосредственно из ОИЯИ. Пункт мониторинга ATLAS позволял бы также проводить ознакомление сотрудников с организацией мониторинга и контроля качества данных установки ATLAS и обучать их пользованию специализированным программным обеспечением перед непосредственным участием в сеансах набора статистики в ЦЕРН. Система удаленного доступа реального времени являлась бы составной частью общей инфраструктуры обработки данных экспериментов на LHC.

Работы по созданию в ОИЯИ системы удаленного доступа к устройствам сбора и обработки данных эксперимента ATLAS в ЦЕРН (пункта мониторинга установки ATLAS) были начаты в 2007 г. При активном участии специалистов дубненской группы TDAQ (рук. В. М. Котов) и ЛЯП ОИЯИ (рук. А. С. Жемчугов) в 2008 г. были разработаны программы удаленного мониторинга и контроля качества данных ATLAS. Был проведен анализ и выбор вариантов программного обеспечения как основы внутренней информационной шины системы удаленного доступа реального времени (СУДРВ). Построен работающий прототип СУДРВ для эксперимента ATLAS, использующий зеркало он-лайн публикуемых реальных данных. В конце 2008 г. была завершена разработка и осуществлен запуск в ОИЯИ прототипа системы удаленного доступа (рис. 3.96) для мониторинга в реальном времени процессов сбора и обработки данных в ATLAS [334, 335].

В 2011 г. было завершено создание в ОИЯИ полноценной системы удаленного доступа реального времени (СУДРВ) и осуществлена ее интеграция в глобальную сервис-ориентированную архитектуру грид-системы сбора и обработки данных экспериментов на LHC [284]. Разработка такой системы для удаленного мониторинга процессов сбора и обработки данных эксперимента ATLAS — Remote Control Room — результат многолетнего сотрудничества ОИЯИ и ЦЕРН по проекту TDAQ ATLAS. Эта система (рис. 3.97) предоставляет уникальные возможности по ее использованию в будущем как аппаратно-программной платформы для разработки системы моделирования в реальных условиях работы вычислительного комплекса в распределенной среде [336]. Сервис-ориентированная архитектура интегрировала основные сервисы инфраструктуры СУДРВ (грид- и он-лайн сервисы, TDAQ программное обеспечение) и обеспечивала удаленного пользователя эффективными инструментами для обработки и анализа качества данных, получаемых в эксперименте.

В целом, потребность в системе удаленного мониторинга обусловлена различными причинами, такими как участие в эксперименте специалистов, которые не могут постоянно присутствовать в ЦЕРН, необходимость подготовки дежурных перед их поездкой на смены. Часть причин обусловлена ограничениями доступа из сети общего назначения (CERN Global Public Network) во внутреннюю сеть эксперимента. В этом случае в возможностях, предоставляемых удаленным мониторингом, заинтересованы, например, эксперты, работающие в самом ЦЕРН. Удаленный мониторинг TDAQ ATLAS является частью мониторинга эксперимента ATLAS, реализованного в виде нескольких систем. Нижним уровнем, предполагающим минимальные права доступа, является Web-мониторинг. Данные из центральной комнаты управления (Control Room) ATLAS в этом случае публикуются на Web-серверах, находящихся в сети общего назначения ЦЕРН, с помощью, например, Web Monitoring Interface (WMI), который обеспечивает доступ к ограниченному набору данных с помощью Web-браузера [337]. Web Monitoring Interface представляет собой интерфейс между пользователем и всей инфраструктурой TDAQ. Рис. 3.98 иллюстрирует взаимодействие между WMI и другими компонентами программного обеспечения TDAQ.

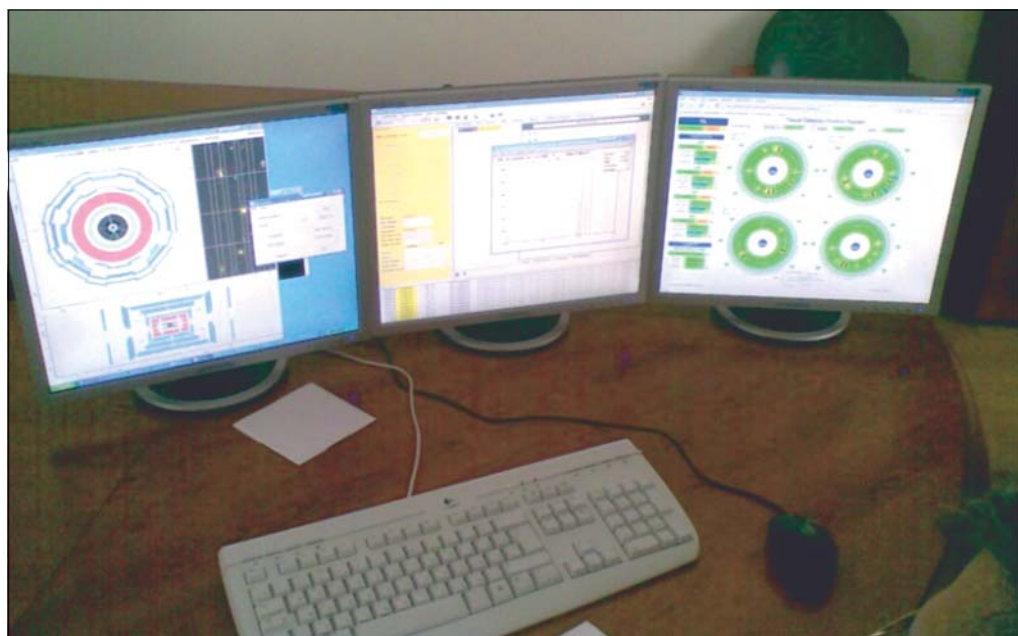


Рис. 3.96. Вверху: типичный вид мониторов пункта удаленного доступа в ЛЯП. Внизу: Питер Йенни (руководитель ATLAS) вместе с Д. И. Хубуа, Н. А. Русаковичем и Ю. А. Будаговым убеждается в том, что в Дубне все работает

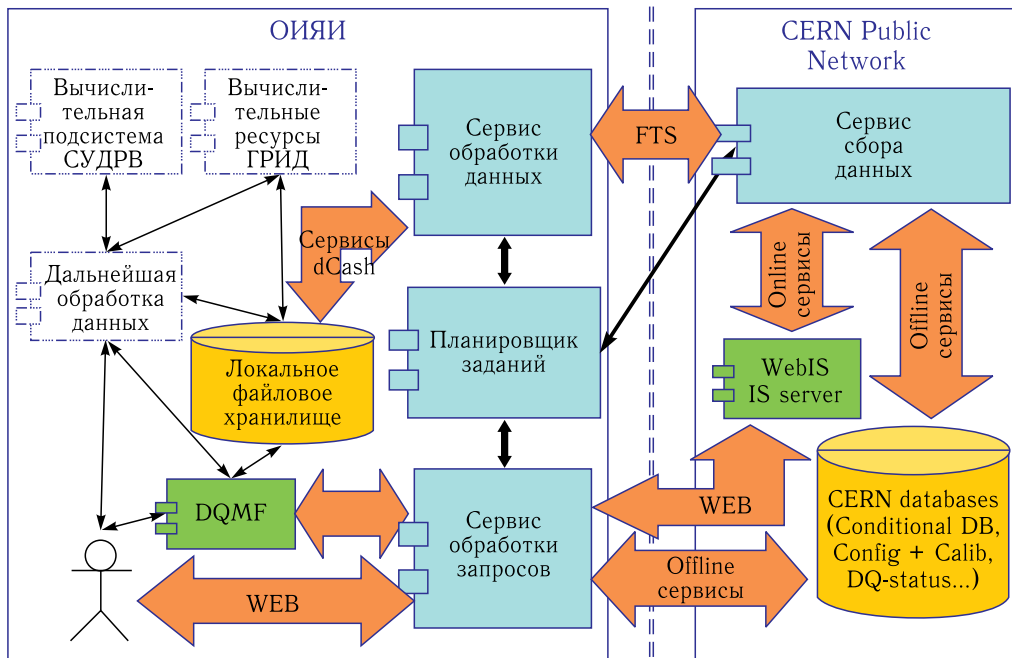


Рис. 3.97. Сервис-ориентированная структура компонентов контроля данных, интегрированная в систему удаленного доступа реального времени. Из [284]

Более высокий уровень мониторинга реализовывал прямой доступ к информационным сервисам и программным продуктам, аналогичным используемым дежурными на сменах в ATLAS Control Room. Это позволяло работать с данными и видеть выводимую на экран информацию точно так же, как и в ATLAS Control Room, однако без возможности прямого управления процессами сбора и обработки данных. При этом была доступна практически вся информация, публиковавшаяся на информационных серверах TDAQ ATLAS. Поэтому такой тип мониторинга нередко назывался удаленным он-лайн мониторингом TDAQ ATLAS.

Система удаленного мониторинга TDAQ ATLAS была создана в рамках Monitoring Working Group (MWG) ЦЕРН и базировалась на двух основных концепциях: создании в сети общего назначения ЦЕРН (GPN CERN) копий (зеркал) информационных сервисов, работающих во внутренней сети управления экспериментом (ATLAS Control Network), и использовании NX-технологии для открытия удаленной сессии на компьютерах, находившихся не в ЦЕРН.

Из соображений безопасности внутренняя компьютерная сеть эксперимента ATLAS была отделена от сети общего назначения ЦЕРН. Для предотвращения несанкционированного доступа во внутреннюю сеть управления ATLAS создавались копии (зеркала) информационных сервисов в сети общего назначения ЦЕРН. Обновления опубликованных данных при этом происходили автоматически (рис. 3.99). Зеркала обеспечивали возможность работы

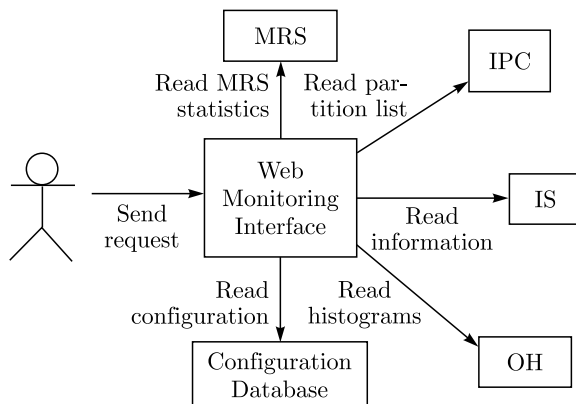


Рис. 3.98. Взаимодействие Web Monitoring Interface (WMI) с другими компонентами программного обеспечения TDAQ. WMI способен читать список активных разделов из IPC-сервера (Inter Process Communication), что дает возможность пользователю выбрать один из них. Информация о конфигурации выбранного раздела берется из базы данных конфигурации (Configuration Database). Информация о статусе программного и аппаратного обеспечения компонентов, которые принадлежат к выбранному разделу, а также состоянии текущего запуска может быть получена из Информационной службы (IS). WMI имеет возможность получать сообщения, которые были посланы службой отчетов (Message Reporting Service), принадлежащих к выбранному разделу. Для этого WMI должен отображать подмножества гистограмм (OH), произведенных в данном разделе. Из [337]

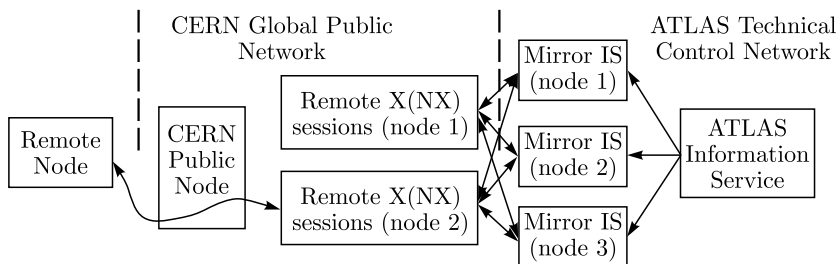


Рис. 3.99. Организация удаленного мониторинга TDAQ. Из [338]

с теми же самыми программами мониторинга, которые использовались в сеансах сбора данных в Control Room.

Реализованная в ОИЯИ система удаленного мониторинга TDAQ ATLAS состояла из двух станций, одна из которых находилась в ЛЯП, а вторая — в ЛИТ. Станция удаленного мониторинга ЛЯП включала в себя два рабочих места. Каждый компьютер имел три 19-дюймовых дисплея (рис. 3.100), изображения первого дисплея каждого компьютера дублировались на большом внешнем TV-экране. Компьютеры работали под управлением MS Windows XP, и на каждом из них было установлено необходимое программное обеспечение (ssh, NX-клиенты, Exceed Ware и т. п.). Имелось оборудование для проведения видеоконференций (Web-камеры Logitech QuickCam Sphere, динамики и микрофоны). Выход в сеть был реализован через коммутатор



Рис. 3.100. Станция удаленного мониторинга ЛЯП. Из [338]

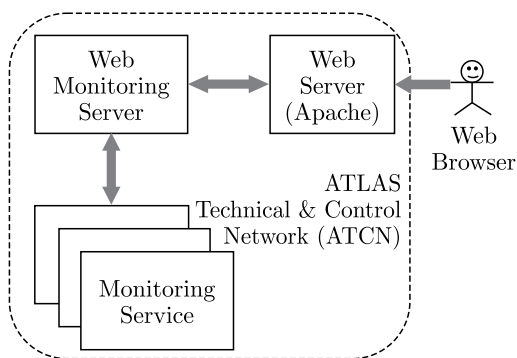


Рис. 3.101. Архитектура Web Monitoring Interface. Из [339]

wide он-лайн мониторинг-интерфейс — сервис WebEmon (WEB Monitoring Interface) [339]. Он опирался на введенный в ЦЕРН веб-информационный сервис WebIS, который давал возможность пользователям, находившимся не в ЦЕРН и вне среды TDAQ, получать данные в различных форматах (рис. 3.101).

DLink DES-1008D, была возможность выхода в сеть пользователей через Wi-Fi с помощью роутера DLink DIR-615 [338]. Однако, к сожалению, длительная практическая работа по удаленному мониторингу установки ATLAS в ЛЯП не получила должного развития в силу специфики работы коллаборации ATLAS в ЦЕРН Control Room, и в 2014 г. станция в ЛЯП была расформирована.

В 2013 г. сотрудниками ОИЯИ из группы TDAQ эксперимента ATLAS был запущен новый World-

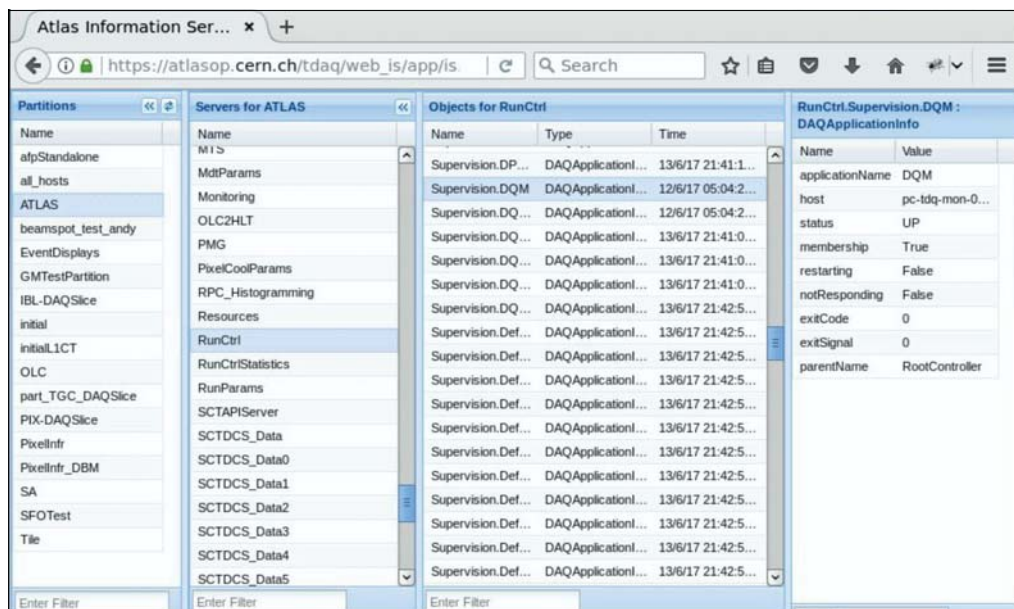


Рис. 3.102. Графический интерфейс пользователя Web-мониторинга для информационного сервиса. Слева показаны доступные IS-серверы, в центре — список информационных объектов на выбранном сервере, справа — значения выбранных информационных объектов. Из [339]

WebEmon-сервис позволял получать события (в формате raw-data) от сервера Event Monitoring DAQ ATLAS, работавшего в ЦЕРН, и тем самым реализовывал мониторинг сбора событий. Само событие из формата raw-data при передаче конвертировалось в XML-формат, а параметры (Sampling Address и Selection Criteria) передавались в виде HTTP-запроса. Так как клиенты сервера WebEmon уже не нуждались при работе в среде TDAQ ATLAS, это открывало широкие возможности для написания пользователями своих приложений, которые могли бы работать вне среды ЦЕРН [316]. Web Monitoring Interface активно использовался (рис. 3.102) во время набора данных Run-I [339].

В рамках продолжения работ по удаленному мониторингу в эксперименте ATLAS был разработан новый компонент веб-информационного сервиса WebIS-EXT. Его цель — обеспечение возможности получения через Web-сервис обновлений информации от IS-сервера («subscribe» на информацию), находящегося в месте расположения установки ATLAS (Point1 ЦЕРН). По результатам проведенного в 2013 г. тестирования WebIS-EXT был установлен на штатный Web-сервер ATLAS.

Итак, главными результатами работы группы TDAQ ATLAS в ОИЯИ было создание и поддержка таких пакетов программ, как Event Damp, Resource Manager, Web Monitoring Interface, а также обеспечение удаленного доступа к данным ATLAS из ОИЯИ. Работами этой группы, в которую входили Е. И. Александров, С. Е. Колос, А. А. Казаков, А. И. Казымов, М. А. Минеев,

Б. Д. Румянцев, А. А. Сальников, И. В. Соловьев, А. В. Яковлев и др., до конца 2014 г. руководил В. М. Котов, а затем — И. Н. Александров.

Примером междисциплинарности и прикладной важности уникальных разработок, нацеленных изначально на решение фундаментальных задач ЛНС, может служить работа этих сотрудников ЛИТ по использованию облачных технологий ЦЕРН и применению программного обеспечения TDAQ ATLAS при обработке данных космического мониторинга и в задачах оценки качества радиолокационных данных [316]. Действительно, экспериментальные полигоны группы TDAQ ОИЯИ, будучи интегрированы в инфраструктуру ATLAS в ЦЕРН, могут быть использованы как основа для разработки инновационных проектов развития информационно-коммуникационной инфраструктуры в сфере науки и образования.

3.8. Магнитные поля установки ATLAS

Работы сотрудников отдела новых ускорителей (ОНУ) ЛЯП по моделированию распределений различных магнитных полей установки ATLAS начались в 1993–1995 гг. (рук. С. Б. Ворожцов) с построения первой глобальной модели ее магнитной структуры [340–342] и расчетов карты поля в области мюонной системы детектора ATLAS. В те же годы были проведены самые первые вычисления магнитного поля адронного тайл-калориметра ATLAS, было учтено влияние торцевых пластин Extended Barrel этого калориметра [343, 344] и показано, в частности, что толщина пластины может быть уменьшена вдвое [345].

В 1996–1997 гг. была проделана значительная работа по моделированию и определению магнитных полей и магнитных (пондеромоторных) сил, действующих на различные элементы установки ATLAS [346, 347]. В этом направлении (на магните E2 ЛЯП) были произведены прямые испытания субмодуля тайл-калориметра ATLAS и было исследовано распределение магнитного поля в нем [348].

На рубеже 2000-х гг. изучение характера распределений магнитных полей установки ATLAS и их возможного влияния на функциональные элементы установки (фотоумножители, сцинтилляторы, системы считывания данных и т. п.) имело важное значение для нахождения наиболее эффективной схемы сборки и компоновки детектора.

В этом направлении была проделана важная работа по прецизионному вычислению трехмерных распределений магнитных полей в различных специфических областях отдельных элементов установки [349], таких как «область фингеров» (finger region) тайл-калориметра [350]. В промежутках тайл-калориметра, где расположен жидкоаргоновый калориметр, электроника считывания и система питания LAg-калориметра, имеет место значительное паразитное поле, создаваемое обратным потоком от соленоида. В области между Tile и Extended Tile калориметрами внешняя поддерживающая балка сделана из так называемых «фингеров» и полостей между ними для расположения соединительных кабелей. Тороидальное поле вне тайл-калориметров вносит заметные изменения в существующую карту поля. Экранирование его или отклонение крайне затруднено из-за оборудования, которое заполняет

все свободное пространство. Поэтому было необходимо понять, как именно в данном случае распределено магнитное поле.

Проведенный анализ показал, что трехмерные эффекты являются доминирующими в задаче правильного расчета распределения полей в этой важной области. Магнитный поток от Barrel Toroid не локализован в какой-то одной двухмерной плоскости, а имеет ярко выраженную 3D-форму и распространяется от катушек Barrel Toroid через железные фингеры в область TileCal Barrel (или Extended Barrel) и возвращается обратно в катушки Barrel Toroid [350]. Такого типа важные работы велись и в дальнейшем (см., например, [351, 352]).

Вся магнитная система установки ATLAS показана на рис. 3.103.

Магнитное поле в ней обеспечивается при помощи трех сверхпроводящих обмоток — центрального тороида, двух боковых тороидов и соленоида. Центральный тороид представлял собой самый большой в мире сверхпроводящий магнит, который создает индукцию поля 4 Тл. Он был успешно запущен 9 ноября 2006 г. Электрический ток уровня 20,5 кА проходил через каждую из восьми гигантских обмоток магнита шириной 5 м, длиной 25 м и массой 100 т. Детектор, в котором создавалось это поле, имеет размеры $20 \times 20 \times 25$ м. Центральный тороид обеспечивает поворотную силу 3–8 Тл·м. В торцевых областях за счет боковых тороидов поворотная сила также составляет 3–8 Тл·м. При помощи соленоида с номинальным током 7730 А создавалось магнитное поле на уровне 2 Тл в объеме центрального детектора. Для областей соленоида и мюонного спектрометра требования к точности вычисления магнитных полей были на уровне 1 мТл.

Использование сверхпроводящих обмоток позволяло иметь конфигурацию магнитного поля, оптимальную с точки зрения наиболее эффективного прохода регистрируемых частиц через различные системы детектора ATLAS. При этом использовалась легкая (по количеству материала на траектории частицы) и открытая конструкция магнитной системы, это минимизировало паразитные эффекты рассеяния частиц в элементах такой конструкции. Внутренние элементы детектора ATLAS, установленного в экспериментальном зале в месте встреч пучков, показаны на рис. 3.104.

Однако в процессе разработки детектора стала ясна неизбежность применения различных структур из ферромагнитных материалов. Для минимизации возмущений магнитного поля от них на этапе проектирования прилагались все возможные усилия, однако устранить эти возмущения не удалось [354]. Поэтому необходимо было знать фактическое распределение полей, которое бы учитывалось в основной карте поля при восстановлении треков регистрируемых частиц. С этой целью в ОНУ ЛЯП (рук. С. Б. Ворож-

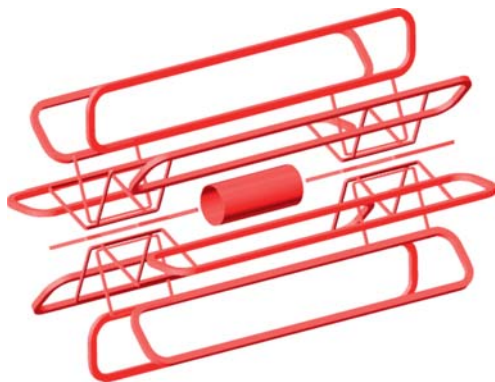


Рис. 3.103. Магнитная система эксперимента ATLAS. См., например, [353]

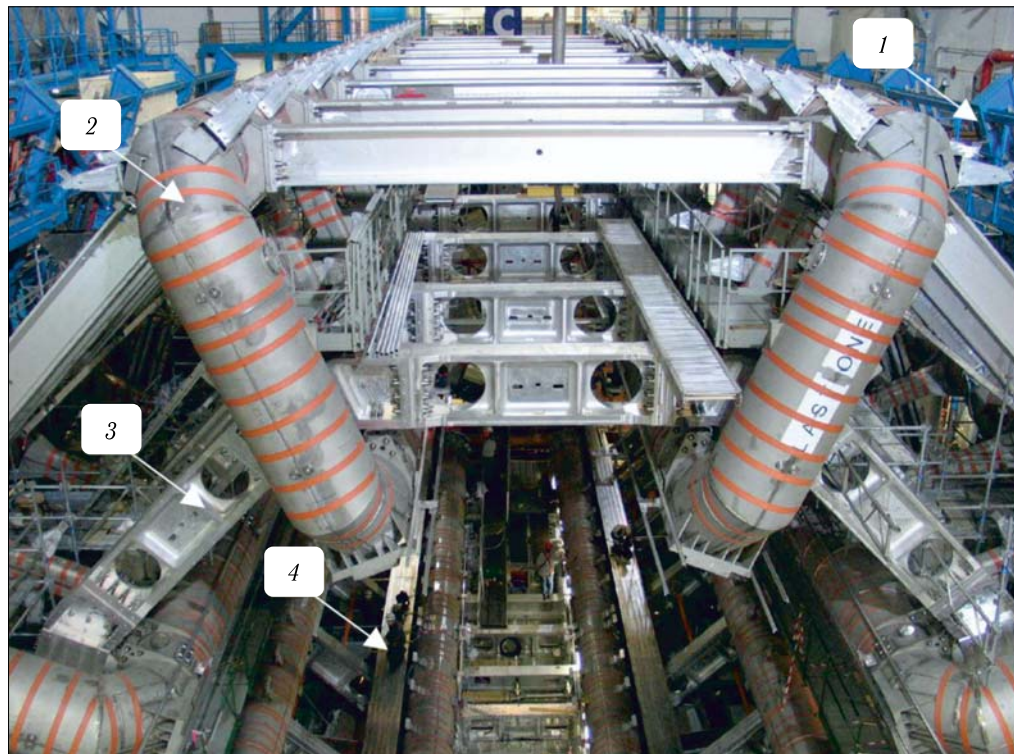


Рис. 3.104. Внутренний вид детектора ATLAS: 1 — структура несущей конструкции; 2 — обмотка Barrel Toroid; 3 — мюонная дрейфовая камера; 4 — рабочий объем детектора. См., например, [353]

цов) проводились подробные расчеты вкладов полей от различных ферромагнитных элементов, а также магнитные измерения в отдельных точках для проверки и калибровки результатов численного моделирования.

К этой же проблеме примыкает задача расчета пондеромоторных сил, имеющая отношение к технике безопасности для персонала, занятого в сооружении и обслуживании детектора. Для оценки зоны безопасной работы вблизи детектора были выполнены расчеты сил, действующих на пробные ферромагнитные объекты размером $10 \times 10 \times 100$ мм. Граница безопасной работы определялась из условия равенства пондеромоторных сил силе тяжести, действующей на объект, т. е. считалось, что при приближении объекта на расстояние меньшее, чем граница зоны безопасности, возможно передвижение этого объекта под действием магнитных сил со всеми вытекающими отсюда проблемами. Результаты расчетов послужили основой для соответствующих нормативных документов по правилам безопасной работы персонала вблизи детектора при включенных обмотках магнитной системы. Результаты этих расчетов полностью подтвердились экспериментально [353].

Участие сотрудников ОНУ ЛЯП в создании компьютерной модели (12–14-го секторов) мюонного спектрометра детектора ATLAS и выполнении расчетов соответствующих магнитных полей [353] было отмечено в спе-

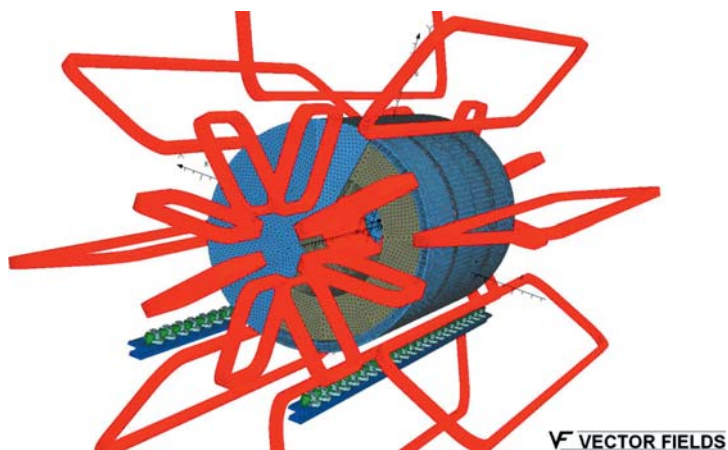


Рис. 3.105. Модель тайл-калориметра. Из [353]

циальной публикации коллаборации ATLAS [355], посвященной запуску «магнитных полей» мюонного спектрометра установки ATLAS.

В решении такого типа задач необходимо учитывать влияние других элементов детектора ATLAS, в частности, возмущение магнитного поля внутри мюонного спектрометра, вызываемого элементами ферромагнитной структуры адронного тайл-калориметра.

С этой целью пришлось создавать компьютерную модель самого тайл-калориметра, при этом оказалось необходимым учесть особую форму анизотропии активной зоны [352], определяемую множеством полых отверстий для расположения большого числа детектирующих элементов на основе скинтилляторов (рис. 3.105). Сложность проблемы заключалась в больших размерах ферромагнитной среды (12 м в длину и 8 м по диаметру) при размерах отверстий 3–4 мм, а также в наличии воздушных зазоров порядка 50 мкм между стальными пластинами активной зоны. Имевшиеся в то время ресурсы не позволяли провести полномасштабное моделирование такой структуры. После множества попыток удалось создать достаточно упрощенную, но вполне адекватную модель для описания влияния магнитного поля калориметра в области мюонного спектрометра. Дальнейшие магнитные измерения подтвердили адекватность разработанной модели [353]. В этом же направлении были выполнены работы по компьютерному моделированию торцевой части детектора ATLAS (рис. 3.106) и была получена карта магнитного поля в различных элементах соответствующих структур (см., например, рис. 3.107).

Итак, сотрудниками ОНУ ЛЯП в рамках работ по проекту ATLAS был выполнен значительный фронт работ. Было проведено численное моделирование поля магнитной структуры эксперимента ATLAS, состоящей из трех тороидальных и одной соленоидальной сверхпроводящих обмоток, а также магнитопровода возвратного потока, являющегося частью тайл-калориметра с его особой формой анизотропии активной зоны, определяемой множеством отверстий для скинтилляторов, расположенных в шахматном порядке. Получены распределения как основного магнитного поля детектора, так и вкла-

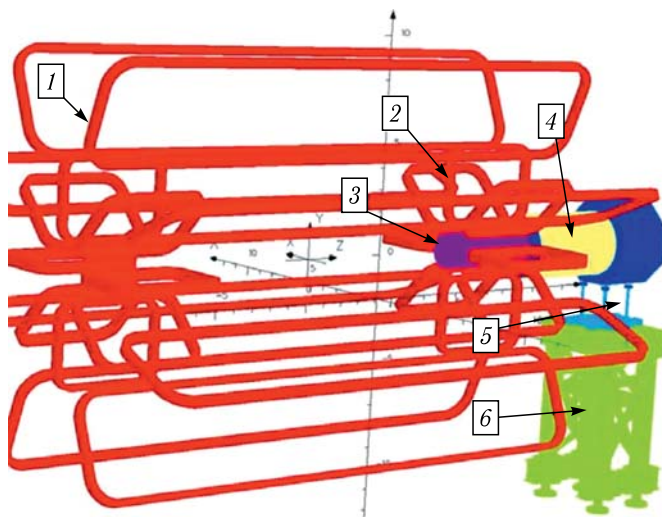


Рис. 3.106. Компьютерная модель торцевой области эксперимента ATLAS: 1 — обмотка Barrel Toroid; 2 — ECT-обмотка; 3 — защита, устанавливаемая внутри торцевых торOIDов с учетом замещения бронзы на сталь; 4 — торцевая защита; 5 — стол юстировки положения радиационной защиты; 6 — платформа HF. Из [353]

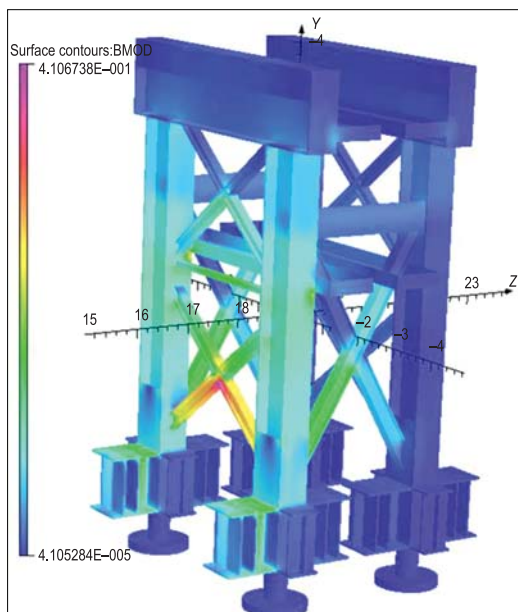


Рис. 3.107. Платформа HF (слева) и распределение магнитного поля по поверхности этой платформы (справа). Из [353]

да конструктивных ферромагнитных элементов установки. Результаты этих расчетов легли в основу программ реконструкции регистрируемых событий в эксперименте ATLAS, в частности при оценке акцептанса детектора.

Был создан набор компьютерных моделей для расчета влияния конструктивных ферромагнитных элементов на распределение магнитных полей детектора ATLAS. Подготовленный набор моделей принят коллаборацией ATLAS в качестве официального, используемого как для сравнения с измерениями, так и для генерации магнитного поля детектора.

Были измерены реальные магнитные поля детектора ATLAS, и проведено их сравнение с расчетными данными. Эти измерения в системе соленоид–тайл–калориметр проводились в августе 2006 г. с номинальным током в соленоиде 7730 А. Помимо измерений «карты поля» внутри центрального детектора были выполнены измерения распределений поля вне соленоида, что представляет интерес с точки зрения проверки моделей, ориентированных на расчеты поля в мюонном детекторе. С учетом имеющейся неопределенности исходных данных моделей по отношению к параметрам реально установленных объектов получено вполне удовлетворительное согласие.

В 2007 г. А. С. Ворожцовым была защищена кандидатская диссертация «Формирование электромагнитных полей особо сложной конфигурации в циклотронах и детекторах частиц», одна из глав которой была посвящена расчетам полей установки ATLAS [353].

В работах группы на разных этапах принимали участие О. Н. Борисов, О. В. Ломакина, Г. А. Карамышева, И. В. Титкова, Н. А. Морозов, Е. В. Самсонов, Ю. А. Будагов, С. Б. Федоренко, В. В. Калинин, Ю. Ф. Ломакин, Е. А. Симонов и др.

После запуска эксперимента ATLAS в 2009 г. продолжилось участие сотрудников ОНУ ЛЯП в исследованиях магнитных полей и их влияния на различные элементы установки ATLAS. В частности, вопросы магнитной защиты средств низковольтного питания жидкоаргонового калориметра ATLAS были рассмотрены в работах [356, 357].

3.9. Создание сверхпроводящих магнитных тороидов

Как известно, ни LHC, ни какой другой современный ускоритель не может быть создан без полномасштабного использования сверхпроводимости и высококачественных магнитов. Можно даже утверждать, что без сверхпроводимости и надежной технологии производства и эксплуатации магнитов невозможно было бы открытие бозона Хиггса [358].

Поэтому понятно, что одной из важных, первоочередных задач коллаборации ATLAS была практическая реализация тороидальной магнитной системы установки ATLAS (см. п. 3.8 и [43]). В нее входили самые крупноразмерные (центральные тороиды — более 25 м в длину) и самые тяжелые (торцевые тороиды весили около 100 т) элементы установки (рис. 3.108), которые собирались на поверхности, тестировались, опускались по шахтным каналам и окончательно собирались в подземном зале. Основными участниками этих работ являлись ЦЕРН, ОИЯИ, СЕА (Сакле, Франция), Оксфордская лаборатория (Великобритания), LASA (Италия) и другие институты и фирмы, где производились отдельные компоненты тороидов.

Тороидальная система должна была быть собранной первой, поскольку уже к ее механической «теплой структуре» крепились последовательно все

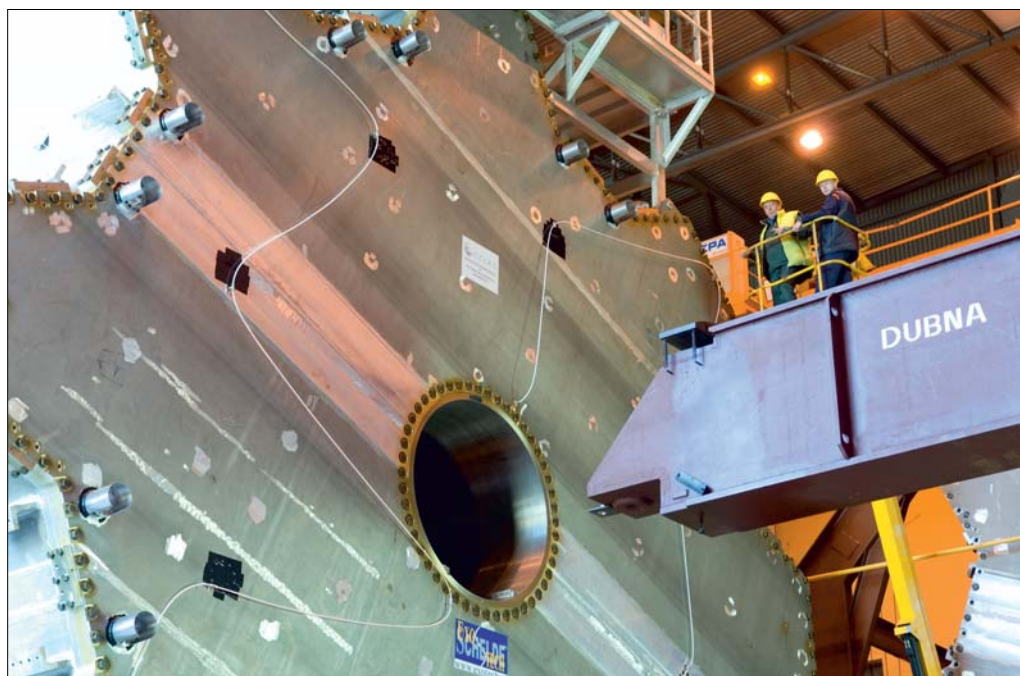
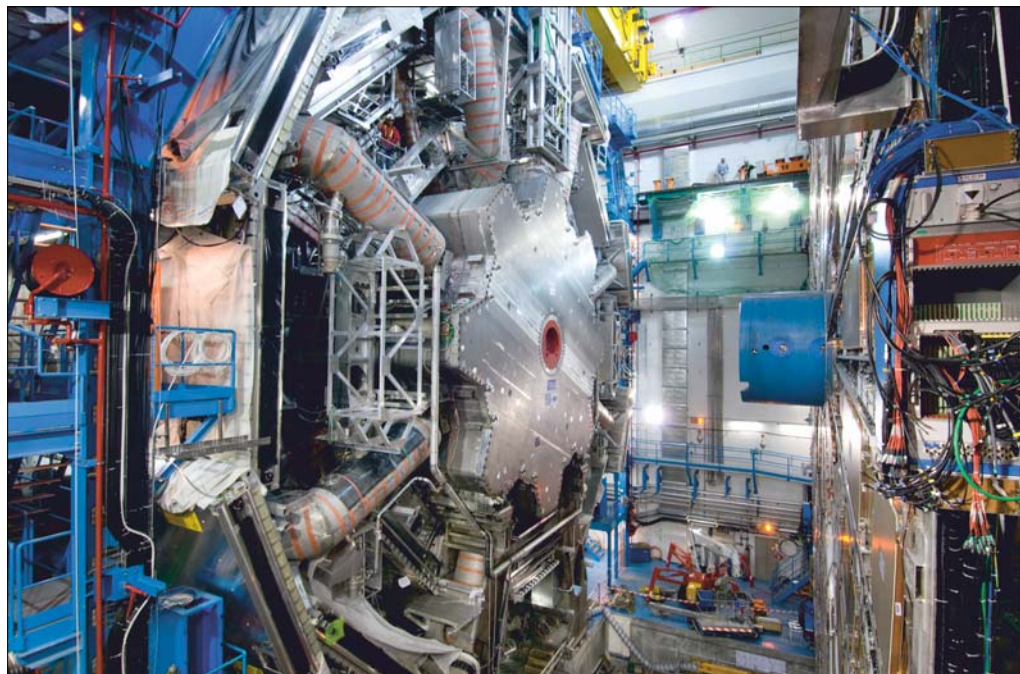


Рис. 3.108. Вверху: магнитные тороиды в рабочей позиции в подземном зале ATLAS. Центральные — с оранжевыми аварийными нагревателями. Торцевой тороид выглядит как шестерня диаметром 12 м. Внизу: монтаж торцевого сверхпроводящего тороида сотрудниками ОИЯИ



Рис. 3.109. Два торцевых тороида

другие детекторные системы ATLAS. Именно эти работы по сборке магнитной системы, в которой значительную роль играли сотрудники Опытного производства (примерно 25 техников и инженеров), и стали в 1998 г. основной задачей ОИЯИ.

Подготовительные работы начались в ЦЕРН с создания стенда для испытаний собранных тороидов, куда был доставлен и установлен магнитный сердечник, имитирующий магнитное поле внутри установки ATLAS (1999 г.). Это позволило проводить данные испытания в условиях, максимально приближенных к реальным.

Работа по сборке тороидов началась в 2002 г. с изготовления в Опытном производстве ОИЯИ (рис. 3.110) 25-метровой траверсы, которая использовалась для перемещения тороидов без деформаций. Было также изготовлено большое количество разнообразных домкратов и регулируемых подставок, на которые устанавливались крупноразмерные элементы тороидов. В дальнейшем там же были изготовлены и поставлены в ЦЕРН многочисленные уникальные приспособления для сборки, включая механизм для опускания центральных тороидов, и разнообразные крупноразмерные платформы для сборки в подземном зале.

Много сил было потрачено на разработку технологии сварки алюминиевых трубок, предназначенных для транспортировки жидкого гелия, который охлаждал так называемую холодную массу тороидов и обеспечивал низкотемпературную сверхпроводимость. Для создания расчетного магнитного поля внутри установки ATLAS электрический ток в тороидах должен был



Рис. 3.110. В зале сборки торцевых тороидов

достигать 20 кА. Повышенные требования к качеству сварных швов, каждый из которых подвергался обязательному анализу с помощью рентгеновских снимков, объяснялись необходимостью обеспечения многолетней эксплуатации тороидов без возможности доступа к линиям охлаждения внутри них.

После изготовления и тестирования центральных тороидов наступило очень напряженное время их монтажа в подземном зале. Работа была выполнена в 2004–2005 гг. за рекордные 13 месяцев, при этом элементы механической структуры поступали из России и Белоруссии практически в режиме он-лайн с производимой сборкой. В целом за период чуть более года были приняты, разгружены и оперативно отправлены в работу материалы, доставленные в ЦЕРН более чем 60 большегрузными машинами (рис. 3.112).

Параллельно шла работа по созданию торцевых магнитов (рис. 3.111). Они также были собраны, прошли тестирование и были опущены в подземный зал строго по графику, тем самым обеспечив возможность для монтажа всех других детекторных подсистем согласно общему плану сборки всей установки ATLAS.

Эта работа была заслуженно оценена коллаборацией, ОИЯИ был награжден специальной премией ATLAS одновременно с такими гигантами, как Intel и Ogasle. Как отметил П. Йенни [359] на конференции в Черногории (2017 г.), «ОИЯИ сыграл просто фантастическую роль в реализации тороидальной магнитной системы установки ATLAS». Согласно утверждению Г. тен Кате (рис. 3.113), сделанному там же, «создание, наладка, запуск, управление



Рис. 3.111. Н. И. Зимин показывает изготовление магнитных тороидов сотрудникам ОИЯИ Ю. А. Усову, И. Л. Писареву и В. Е. Куцало в здании 180 ЦЕРН. 2004 г.



Рис. 3.112. Первая катушка магнитного тороида на пути к месту расположения эксперимента ATLAS. 21 октября 2004 г.



Рис. 3.113. Герман тен Кате — руководитель сборки системы сверхпроводящих воздушных тороидов установки ATLAS и Николай Зимин — ответственный за эти работы от ОИЯИ

и модернизация магнитной системы ATLAS были исключительно удачным совместным предприятием коллаборации ATLAS и ОИЯИ» [358].

Большой вклад в эту по-настоящему успешную и важную работу внесли В. Данилов, Н. Данилов, М. Куликов, А. Любимцев и еще около 100 сотрудников Опытного производства и лабораторий ОИЯИ.

После завершения сборки и запуска установки ATLAS сотрудники ОИЯИ продолжили принимать участие в ее эксплуатации, модернизации и других научно-исследовательских разработках. Были выполнены различные работы по управлению и эксплуатации вакуумной системы, электрических цепей, разработке сенсоров и т. п. Сотрудники ОИЯИ регулярно участвовали в работах по открытию и закрытию магнитов во время зимних остановок LHC. Важно, что когда при запуске LHC (в 2008 г.) произошла авария из-за проблем с безопасным сбросом гелия из системы охлаждения сверхпроводящих магнитов ускорителя, именно к дубненской группе, зарекомендовавшей себя при создании магнитной системы ATLAS, обратились с просьбой выполнить работы по установке предохранительных клапанов. Работы производились как на поверхности, так и в подземном тоннеле LHC в негласном соревновании с коллегами из Испании и Польши. Результаты показали превосходство



Рис. 3.114. Установка фланца крепления клапана аварийного сброса давления в тоннеле LHC

команды ОИЯИ, и она была выбрана для участия в проекте усовершенствования сверхпроводящих магнитов и сверхпроводящих соединений (SMACC) во время длительной остановки коллайдера LS1 в 2013–2014 гг. Все 612 клапанов аварийного сброса давления были установлены строго в соответствии с напряженным графиком работ (рис. 3.114). Таким образом, на более чем половине дипольных магнитов несут службу предохранительные клапаны, установленные специалистами ОИЯИ и помогающие обеспечивать надежное безопасное функционирование LHC.

Всеми работами дубненской группы в этом направлении руководил Н. И. Зимин.

4. ПОДГОТОВКА ФИЗИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЫ ATLAS В ОИЯИ

Начиная с 1992 г. (включение ОИЯИ в проект ATLAS) первые работы по формированию физической программы исследований на установке ATLAS проводились разрозненно (практически по собственной инициативе) в рамках отдельных групп ОИЯИ, ответственных за создание тех или иных главных подсистем установки ATLAS (п. 3.1).

Целенаправленное участие всей группы ОИЯИ в подготовке этой программы началось в 2004 г., когда руководителем группы (Н. А. Русаковичем) был назначен специальный ответственный (В. А. Бедняков) за эту работу в ОИЯИ. В 2004 г. начали функционировать еженедельный рабочий семинар и рабочее совещание (два раза в год) по подготовке сотрудников ОИЯИ к выполнению работ в рамках уникальной физической программы ATLAS. В работе последних традиционно принимали участие не только сотрудники ОИЯИ, но и коллеги из стран-участниц.

Главными направлениями физических исследований сотрудников ОИЯИ в рамках коллаборации ATLAS изначально были проверка Стандартной модели и поиск проявлений «новой» физики в ряде экзотических процессов, физика топ-кварка и тяжелых ионов, поиск бозона Хиггса, поиск суперсимметрии и т. п. (см., например, [58, 360]). В дальнейшем в сферу интересов ОИЯИ вошла также физика b -кварков.

Сотрудники ОИЯИ вели постоянную работу в рамках ряда основных рабочих групп коллаборации ATLAS (Higgs Working Group, Tile Calorimeter System Group, Jet/EtMiss Group, Tau Combined Performance Group, Standard Model QCD Physics Group, Exotics Physics Group и др.).

4.1. Дубненская мюонная группа в физической программе ATLAS

Пожалуй, сотрудники «мюонной» группы дубненской части коллаборации ATLAS самыми первыми включились в исследования по будущей физической программе эксперимента ATLAS. В 1994–1995 гг. они начали с изучения возможностей регистрации одного из интересных процессов B -физики — $b\bar{b} \rightarrow \mu B_s^0 X \rightarrow \mu D_s^+ a_1(1260)^- X$ [250] и анализа асимметрии в распадах B -мезонов (рис. 4.1). В дальнейшем была также изучена цепь распадов $B_s^0 \rightarrow D_s^- a_1^+$ ($D_s^- \rightarrow \varphi\pi^-$, $D_s^- \rightarrow K^{*0}K^-$) в контексте возможности исследования на установке ATLAS лежащих в ее основе физических эффектов (в частности смешивания в секторе B_s^0 -мезонов) [361].

Второе направление ранних работ этой группы касалось физики процессов с большой множественностью вторичных частиц. В 1998 г. был впервые рас-

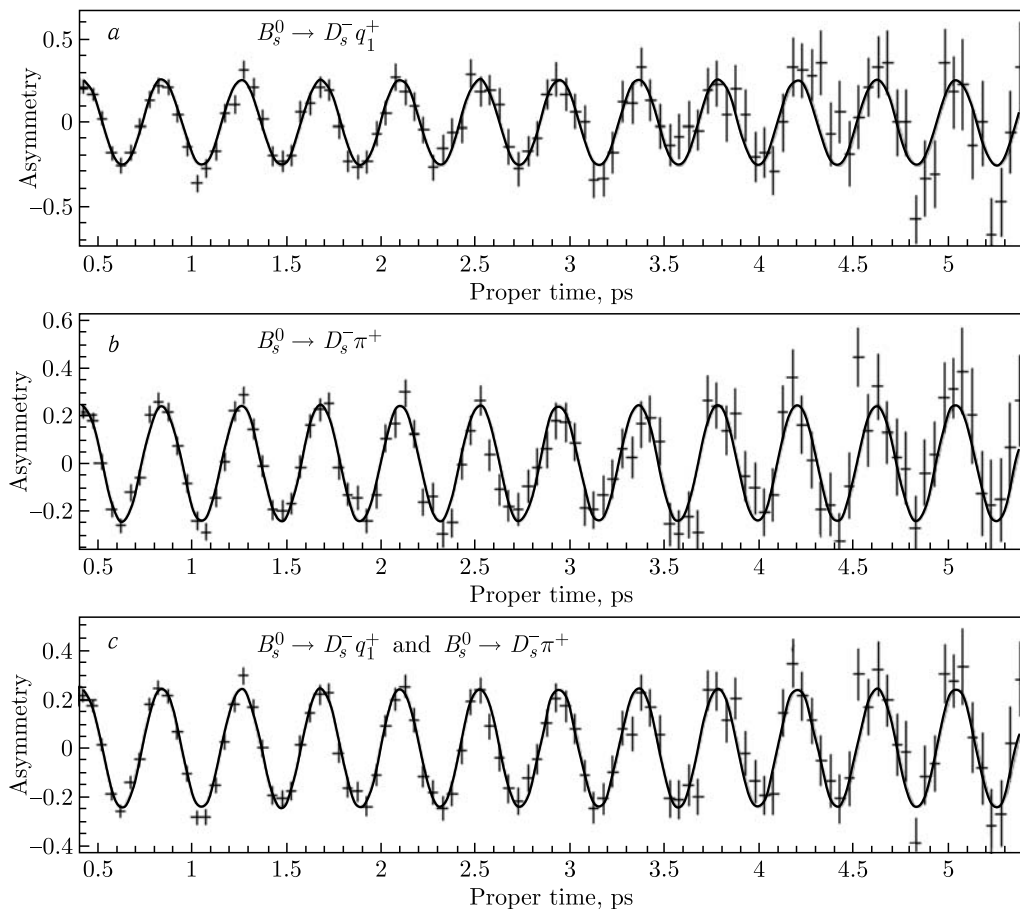


Рис. 4.1. Асимметрия в распадах прелестных мезонов со странностью, доступная для измерения с помощью детектора ATLAS. Из [250]

смотрен вопрос о возможности выделения (триггирования) на LHC событий с асимптотически большой множественностью (рис. 4.2) на основе данных, полученных с использованием калориметрии [362]. Интерес к процессам, в конечных состояниях которых образовывалось бы максимально возможное число частиц (асимптотически высокие множественности), был связан с надеждами получить дополнительный источник информации, которая казалась недоступной иными способами [363, 364]. В частности, на основе предположения, что энтропия состояния пропорциональна его множественности, было сделано предсказание о том, что в области очень большой множественности можно ожидать формирования равновесного состояния. Было также высказано предположение, что в этой области главную роль играют жесткие процессы, а непертурбативные корреляции «заморожены». С другой стороны, была предложена идея о фазовом переходе (конденсации) в системе мягких пионов, в результате которого можно было ожидать увеличения выхода

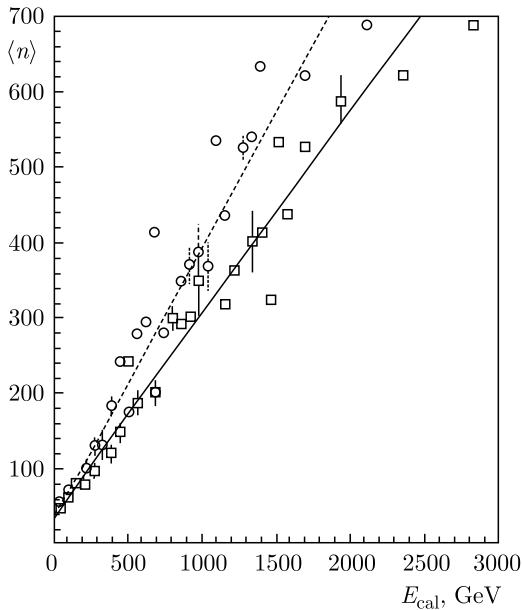


Рис. 4.2. Корреляция между средней множественностью $\langle n \rangle$ и полной энергией E_{cal} при $|\eta| < 4,9$. Кружками показан случай реального калориметра, пунктирная линия — соответствующий фит. Квадратики — результаты расчета в PYTHIA (без моделирования детектора). Сплошная линия — их фит. Из [362]

частиц в этой области [365–367]. Дальнейшего развития эти исследования в рамках мюонной группы ОИЯИ не получили.

В 2003 г. на основе программы моделирования установки ATLAS были исследованы распады нейтральных бозонов Хиггса на четыре мюона ($H \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$). Рождение бозонов Хиггса, а также фоновые процессы моделировались при помощи пакета PYTHIA. Были рассмотрены три основных фоновых процесса: рождение ZZ , $t\bar{t}$ и $Zb\bar{b}$ с последующим рождением четырех мюонов. События сигнального и фоновых процессов пропускались через полную цепочку моделирования установки и реконструкции событий. Моделирование осуществлялось с учетом «наложения событий» (pile-up) для различных вариантов работы ускорителя LHC: при низкой и высокой светимости, а также с учетом так называемых «факторов надежности», т. е. неопределенности уровня фона нейтронов.

На первом этапе анализа проводилась реконструкция четырех мюонов в мюонном спектрометре ATLAS. На основе кинематических свойств распадов $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ проводилось первичное подавление фоновых процессов. На втором этапе при помощи информации с калориметров осуществлялось подавление фоновых событий $Zb\bar{b}$ и $t\bar{t}$ (в которых два мюона обычно рождаются в адронной струе). Окончательное подавление фона осуществлялось на основе реконструкции треков во внутреннем детекторе ATLAS. Фоновые мюоны от распадов b -кварков (процессы $Zb\bar{b}$ и $t\bar{t}$) подавлялись при помощи прицельных параметров мюонных треков, а также критерия изолированности мюонов от немюонных треков.

Впервые было продемонстрировано, что сигнал бозона Хиггса может быть обнаружен без использования информации с внутреннего детектора (при помощи только мюонного спектрометра и калориметров). В этом случае уровень значимости сигнала составляет около 3,5 стандартных отклонения после трех лет работы при низкой светимости, или около 6 стандартных отклонений после дополнительных трех лет при высокой светимости. В случае же использования внутреннего детектора значимость сигнала превышает 10 стандартных отклонений [52, 368]. На рис. 4.3 показан ожидаемый пик от

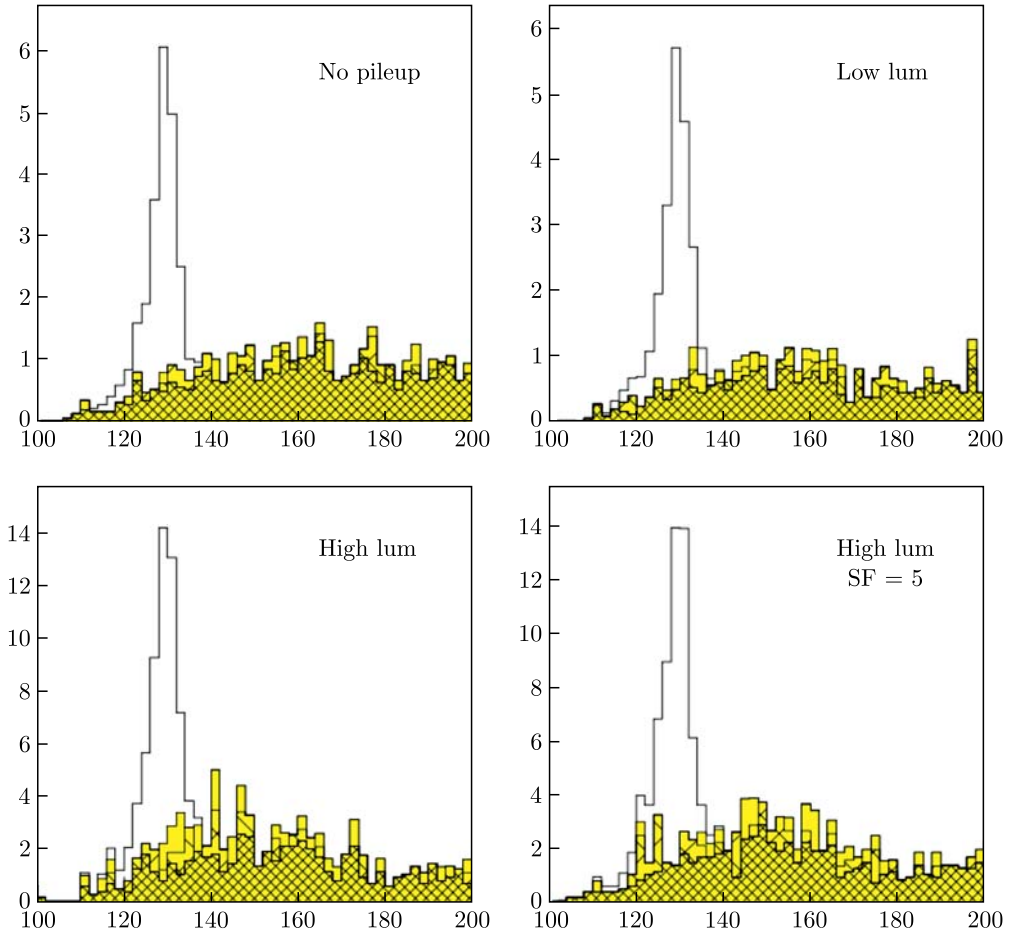


Рис. 4.3. Распределение по реконструированной инвариантной массе для бозона Хиггса с массой $130 \text{ ГэВ}/c^2$. Верхние рисунки соответствуют статистике 100 фб^{-1} , набранной при низкой светимости; нижние — 300 фб^{-1} при высокой светимости. Белыми гистограммами показан сигнал, закрашенными — вклады различных фоновых процессов. Из [52, 368]

бозона Хиггса в распределении по инвариантной массе для разных условий работы ЛНС.

В 2005–2007 гг. были продолжены исследования возможности обнаружения и изучения бозона Хиггса в канале распада $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ (лидирующая диаграмма процесса показана на рис.4.4, слева). События сигнала и фона моделировались с учетом полной геометрии установки ATLAS (GEANT-4) и реконструировались теми же пакетами, которые планировалось применять при анализе реальных данных [369, 370].

Был исследован широкий диапазон возможных значений масс бозона Хиггса ($120\text{--}180 \text{ ГэВ}/c^2$). Была разработана процедура подавления (в 2–3 раза) основного фоновых процесса $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$. В рамках Стандартной

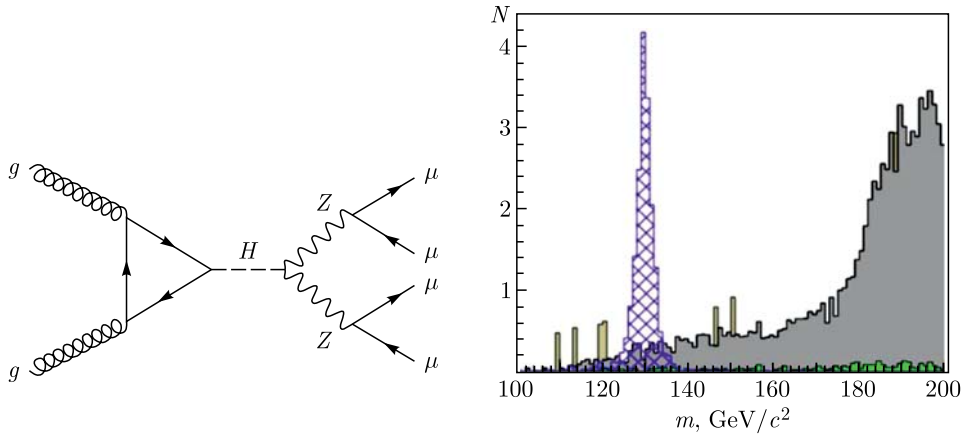


Рис. 4.4. Слева: лидирующая диаграмма процесса $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$. Справа: распределение событий сигнала $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ и фона (в основном $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$) для $M_H = 130$ ГэВ/ c^2 . Из [369]

модели фон от событий $pp \rightarrow t\bar{t}$ и $pp \rightarrow Zb\bar{b}$ подавлен в несколько сотен раз и мало влияет на возможность выделения сигнала. Вклад ранее не учитывавшегося фона от случайных совпадений во времени двух независимых процессов рождения одиночных Z -бозонов ($pp \rightarrow Z \rightarrow 2\mu$) был обнаружен на уровне 10% от основного фона. Для различных значений массы бозона Хиггса была получена оценка уровня достоверности его обнаружения (с учетом квантовых эффектов тождественности). На рис. 4.4, справа показано распределение по реконструированным инвариантным массам событий сигнала $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ (для $M_H = 130$ ГэВ/ c^2) и фона (в основном $pp \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$). Для уровня выделения сигнала из фона была получена оценка в 12–15 стандартных отклонений после трех лет работы ускорителя ЛHC.

Итак, проведенные исследования на основе полного моделирования установки ATLAS показали, что при наборе интегральной светимости 30 фб^{-1} бозон Хиггса может быть надежно зарегистрирован в канале $pp \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ при значениях массы в диапазоне 120–180 ГэВ/ c^2 .

Процесс $pp \rightarrow Zb\bar{b}$, как упоминалось выше, являлся важным источником фона при поиске бозона Хиггса, поскольку конечное состояние канала распада $pp \rightarrow Z(\rightarrow \mu\mu)b\bar{b}$ (рис. 4.5), сечение которого составляет 3,3% от полного сечения рождения процесса $pp \rightarrow Zb\bar{b}$, дает неустранимый вклад в события с четырьмя мюонами (после слабого распада обоих b -кварков). Однако экспериментальное изучение реакции $pp \rightarrow Zb\bar{b}$ представляет и самостоятельный интерес (например, для правильной настройки Монте-Карло генераторов). Исследования (2008–2009 гг.) на базе моделирования установки ATLAS (AcergMC и ALPGEN) показали, что число отбираемых событий $pp \rightarrow Zb\bar{b}$ составило бы 1500 при 70 событиях фона для интегральной светимости 10 фб^{-1} , соответствующей первому году работы ЛHC. Был разработан и реализован алгоритм анализа, позволяющий выделять сигнал $pp \rightarrow Zb\bar{b}$ и эффективно подавлять фоновые процессы $pp \rightarrow b\bar{b}$, $pp \rightarrow c\bar{c}$ и $pp \rightarrow Z(\rightarrow \mu\mu)$. Было показано,

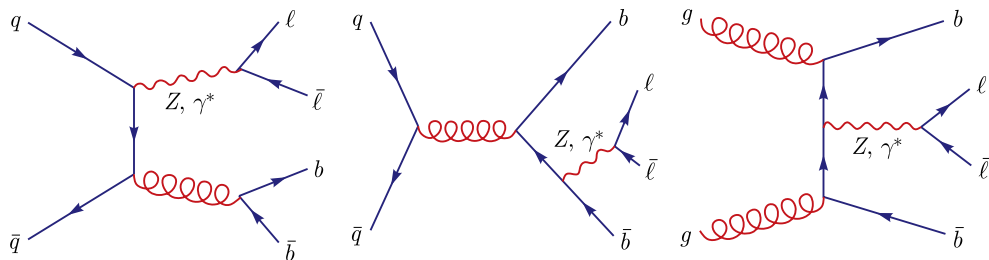


Рис. 4.5. Фейнмановские диаграммы рождения пары b -кварков и Z -бозона, с последующим его распадом на пару лептонов, через взаимодействие пары легких кварков или глюонов. Из [371]

что сечение процесса $pp \rightarrow Zb\bar{b}$ может быть измерено с требуемой точностью уже на 1/10 данных, необходимых для поиска бозона Хиггса [371].

В 2006–2008 гг. мюонной группой ATLAS в ОИЯИ на основе полного моделирования были проведены исследования возможностей установки ATLAS для прецизионных измерений дифференциальных сечений процессов типа Дрелла–Яна, а также перспектив калибровки мюонного спектрометра ATLAS при помощи распада $Z \rightarrow \mu\mu$ [372]. Показано, что эти события могут быть использованы для определения эффективности спектрометра и для калибровки измерения импульсов мюонов. Была разработана процедура отбора событий, обеспечивающая выделение сигнала с высокой эффективностью (90%) при низком уровне фона (2%). Огромная ожидаемая статистика (порядка 10 млн событий в год) позволяла использовать канал $q\bar{q} \rightarrow Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ для «мониторинга светимости» ЛНС с точностью 1% за сутки набора данных. Благодаря тому, что этот процесс может быть рассчитан теоретически с высокой точностью (от одного до нескольких процентов), данные измерения могли бы быть использованы для уточнения структурной функции протона, а также для определения светимости коллайдера. Как известно, неопределенности структурных функций протона являлись и являются одним из главных источников погрешностей в теоретических предсказаниях для всех представляющих интерес процессов на ЛНС. Один из способов контроля этих неопределенностей состоит в прецизионном измерении дважды дифференциальных сечений процессов $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu$ (по переменным p_T и η). Была разработана процедура, позволяющая определять указанные сечения с высокой (2–3%) точностью [373].

Определение реальной эффективности мюонного спектрометра — важная задача, без решения которой невозможно проведение прецизионных измерений. Был предложен метод, в рамках которого один из мюонов, рожденных в процессе $pp \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu$, использовался как «меченый», что позволяло определять эффективность установки по вероятности реконструкции второго мюона. Основная сложность метода — низкая эффективность отбора событий $Z \rightarrow \mu\mu$ с использованием информации только об одном мюоне. В результате проделанного анализа была предложена специальная процедура, позволяющая производить отбор указанных событий с низким уровнем фона

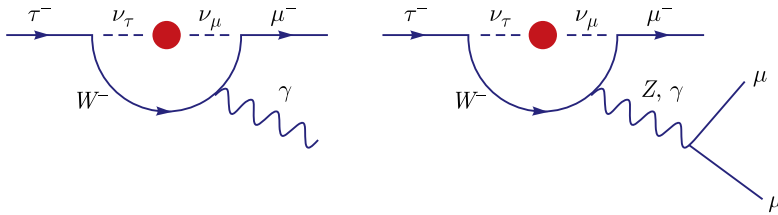


Рис. 4.6. Фейнмановские диаграммы распада тау-лептона с нарушением закона сохранения лептонного числа. Из [369]

(примерно 4%). Было показано, что с помощью данного метода возможно определение эффективности спектрометра с точностью лучше 1% [374].

В 2006–2008 гг. была исследована возможность поиска в эксперименте ATLAS запрещенных безнейтринных распадов тау-лептонов с нарушением закона сохранения лептонного числа $\tau \rightarrow \mu\gamma$ и $\tau \rightarrow 3\mu$ (рис. 4.6). Существование осцилляций (и ненулевых масс) нейтрино допускает в Стандартной модели возможность подобных распадов, однако с ничтожной относительной вероятностью (10^{-40}). Тем не менее в ряде современных моделей «новой» физики эта величина предсказывается достаточно большой и, в принципе, достижимой на ЛНС. Основным фоном к процессу $\tau \rightarrow 3\mu$ являются распады $\varphi \rightarrow 2\mu$, сопровождаемые третьим мюоном. Предварительный анализ, выполненный на основе «быстрого» моделирования, показал, что уже после одного года работы ускорителя (при номинальной светимости) и на установке ATLAS можно установить верхний предел на такие распады, сравнимый с лучшими из ныне существующих пределов [375]. К сожалению, дальнейшее улучшение анализа, способное заметно понизить ожидаемый верхний предел, не было выполнено.

В 2008 г. была исследована возможность наблюдения на установке ATLAS η_b -мезона по его распаду на две J/ψ -частицы ($\eta_b \rightarrow J/\psi + J/\psi \rightarrow 4\mu$). Указания на существование η_b были получены на B -фабриках. Предварительный анализ на основе «быстрого» моделирования показал, что при высокой светимости ЛНС (300 фб^{-1}) будет возможно отбирать от нескольких единиц до нескольких сотен событий (неопределенность связана с теоретическим предсказанием относительных вероятностей различных распадов η_b -мезона) [376]. К сожалению, эти работы также не нашли пока своего воплощения в реальных данных.

4.2. Участие группы SANC в разработке физической программы ATLAS

В 2004 г. в ОИЯИ был открыт новый проект SANC (Support of Analytic and Numeric calculations for experiments at Colliders) (рук. Д. Ю. Бардин). Он был нацелен (как видно из расшифровки его аббревиатуры) на проведение аналитических и численных вычислений для обеспечения и поддержки экспериментальных программ на коллайдерах, в первую очередь на ЛНС [377–379]. Блок-схема проекта показана на рис. 4.7. Работы группы SANC проводились в достаточно тесном сотрудничестве с мюонной группой.

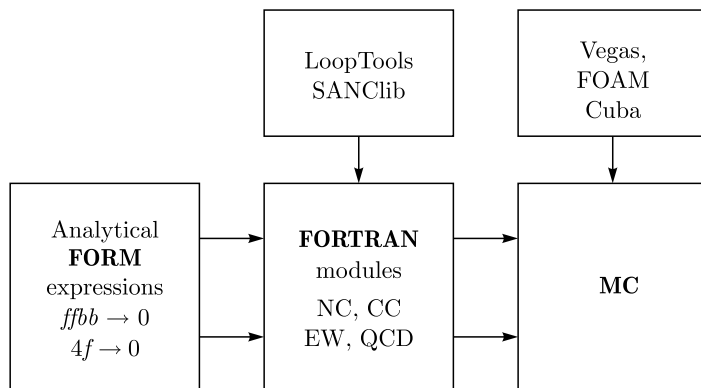


Рис. 4.7. Блок-схема системы SANC. На языке FORM (ядро системы) вычисляются аналитически амплитуды процессов, сечения и другие параметры. Результаты этих вычислений автоматически передаются в FORTRAN-модули, которые далее используются внешними программами. Из [380]

В течение 2002–2005 гг. группа SANC создала компьютерную версию системы, которая реализовывала на однопетлевом уровне точности полную цепочку автоматических вычислений — от лагранжиана Стандартной модели до распределения событий — практически для всех возможных в Стандартной модели распадов типа $1 \rightarrow 2$ и $1 \rightarrow 3$ и для многих процессов типа $2 \rightarrow 2$. Версия v1.00 системы SANC описана в работе [381] и была доступна одновременно на серверах Дубны (<http://sanc.jinr.ru/>) (рис. 4.8) и ЦЕРН (<http://pcphsanc.cern.ch/>). Она была уже вполне применима для различных физических задач, имеющих отношение к физике на LHC. В частности, в 2005 г. в рамках автоматизированной системы SANC был тщательно изучен вопрос об однопетлевых поправках к процессу Дрелла–Яна в канале заряженных токов. Теоретические неопределенности, возникающие на этом пути, были исследованы в работе [383]. Затем было выполнено внедрение в среду SANC процессов $f_1 \bar{f}_1 ZZ \rightarrow 0$ и $f_1 \bar{f}_1 HZ \rightarrow 0$ [384], где f_1 — безмассовый фермион, масса которого удерживается ненулевой только в аргументах \log -функций, а « $\rightarrow 0$ » означает, что все 4-импульсы направлены внутрь. Особое внимание было уделено распаду $H \rightarrow Z f_1 \bar{f}_1$, для него был получен ряд численных результатов, интерес к которым был обусловлен стремлением иметь максимально точные предсказания для четырехфермионного распада бозона Хиггса при энергиях LHC.

В 2006 г. в среде SANC был создан новый генератор для распадов бозона Хиггса по каналу $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$ [384]. Он учитывал электрослабые радиационные поправки и квантовые эффекты, связанные с присутствием тождественных фермионов в конечном состоянии. Был также проанализирован другой интересный канал распада бозона Хиггса: $H \rightarrow 2\mu\gamma$ [385]. Его ширина при $M_Z - 40 \text{ ГэВ} < M_{\mu\mu} < M_Z + 40 \text{ ГэВ}$ оказалась равной $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ ГэВ}$ по сравнению с $2,4 \cdot 10^{-7} \text{ ГэВ}$ для $H \rightarrow 4\mu$ распада, при условии $M_H = 130 \text{ ГэВ}/c^2$.

Группа проводила тщательное исследование процессов Дрелла–Яна $qq' \rightarrow \rightarrow W \rightarrow \mu\nu$ и $qq \rightarrow Z \rightarrow \mu\mu$, в частности, были выполнены полные расчеты

Рис. 4.8. Пример страницы SANC для загрузки модулей на сервере ОИЯИ. Из [382]

электрослабых поправок $O(\alpha)$ в рамках кварк-партонной модели [383]. Были обнаружены заметные поправки (порядка 10 %) по сравнению с вычислениями в низшем порядке. Эти результаты показали хорошее согласие с результатами других групп (см., например, [386]). Также были включены в рассмотрение однопетлевые (NLO) КХД-поправки [387].

Для распада $H \rightarrow 4\mu$ было проведено сравнение (рис. 4.9) предсказаний стандартного генератора событий PYTHIA с предсказаниями разработанно-

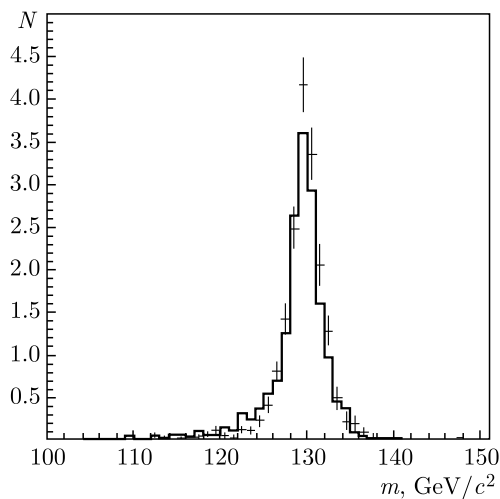


Рис. 4.9. Сравнение результатов моделирования с использованием «стандартного» генератора PYTHIA (сплошная линия) и данных группы SANC (точки с ошибками), учитывающих эффекты тождественности частиц в конечном состоянии, для распределения реконструированной массы бозона Хиггса (после применения процедуры отбора событий). Из [369]

го группой SANC генератора, который учитывал радиационные поправки и квантовые эффекты, возникающие из-за наличия в конечном состоянии тождественных мюонов. Было обнаружено, что эффекты тождественности частиц позволяют несколько более эффективно разделять события фона и сигнала (соотношение сигнал/фон улучшается на 5–10%).

В 2007–2008 гг. проект SANC уже включал в себя теоретические предсказания практически для всех трехчастичных и для многих четырехчастичных процессов в рамках Стандартной модели на однопетлевом уровне точности. В частности, для проекта ATLAS группа практически полностью завершила прецизионные расчеты процессов Дрелла–Яна [388–390], выполнила прецизионные расчеты вероятностей полуплептонных и кварковых каналов распадов топ-кварка и процессов его одиночного рождения [391]. Были продолжены расчеты фермион-бозонных ($f\bar{f}b\bar{b}$) процессов на партонном уровне [392]. После свертки с партонными распределениями процессы $pp \rightarrow HZ, H, Z, ZZ + X$ представляли большой интерес для исследования на LHC, а также для будущей физики лептонных коллайдеров [393].

В дальнейшем группа SANC проделала большую и важную работу, в частности, отраженную в публикациях [382, 394–399] и в статье [380], где описан опыт применения системы SANC для анализа данных LHC.

Тем не менее основная работа группы SANC была «несколько выше интересов» как минимум дубненской части коллаборации ATLAS. Справедливости ради следует признать, что некоторые разработки и результаты группы SANC заняли важное место в тех публикациях коллаборации, в которых дубненские ученые успешно участвовали. Примером может служить статья по определению вклада странных кварков в протон [400].

4.3. Участие группы жидкоаргонового калориметра в разработке физической программы ATLAS

В 1995–1998 гг. группа ЛСВЭ занималась вопросами возможной регистрации и реконструкции продуктов распада тяжелых бозонов Хиггса (масса не более 1 ТэВ/ c^2) в адронных калориметрах. Эта группа также развивала программное обеспечение для реконструкции струй и описания геометрии установки ATLAS. Были разработаны и реализованы в виде программ алгоритмы поиска и восстановления характеристик адронных струй, а также восстановления эффективной массы W -бозона из распада его на две струи по информации с адронных калориметров ATLAS. В частности, физиками ЛСВЭ был разработан новый подход к восстановлению струй в жидкоаргоновом калориметре [205], эффективность которого при восстановлении двухструйных процессов превышала 80%.

В 1998–2000 гг. в рамках подготовки программы исследований по физике топ-кварков эта группа изучала процессы образования топ–антитоп ($t\bar{t}$) пар и одиночное рождение топ-кварка [401]. Было проведено полное моделирование этих процессов в детекторе ATLAS с детальным изучением их топологии. Были определены критерии выделения изучаемых процессов из фоновых, и было показано, что процесс одиночного рождения топ-кварка можно изучать с хорошей статистической достоверностью. В 2001–2002 гг. в группе ЛФЧ

проводились исследования спиновых эффектов [212] в процессах одиночного и парного рождения топ-кварков в pp -столкновениях при энергиях LHC [402].

Важный этап работ начался в 2005 г., когда на компьютерной ферме ЛФЧ и ЛИТ было установлено программное обеспечение общего назначения ATHENA для ATLAS. Это открыло возможности для работы в широком диапазоне задач, начиная с анализа экспериментальных данных, полученных на тестовых пучках, до моделирования различных физических процессов, которые представляли интерес для исследования на установке ATLAS. С помощью этого программного обеспечения в дубненской группе жидкоаргонового калориметра, в частности, были сразу начаты исследования реконструкции треков отдельных частиц (пионов, электронов и мюонов) с энергией 10–1000 ГэВ, проходящих через детектор ATLAS в угловом диапазоне, который перекрывает пограничную область между калориметрами центральной и торцевой части детектора. Продолжались работы над новыми алгоритмами реконструкции адронных струй [403].

В 2006–2007 гг. в ЛФЧ продолжилось освоение программного обеспечения для моделирования физических процессов в реальных условиях эксперимента. На этой основе был начат анализ (с помощью моделирования методом Монте-Карло) перспектив регистрации совместного рождения бозона Хиггса и пары топ-кварков (рис. 4.10), что представляло интерес в контексте расширения спектра возможных каналов экспериментального наблюдения бозона Хиггса. Были проведены вычисления сечений процесса, подготовлена

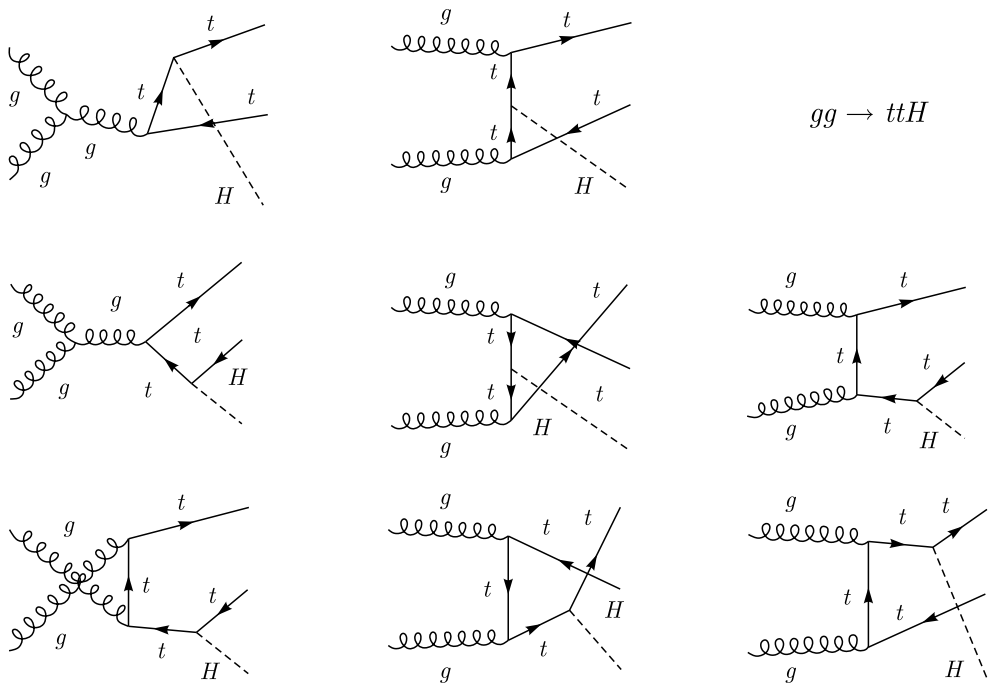


Рис. 4.10. Типичные диаграммы ассоциированного образования бозона Хиггса и пары топ-кварков за счет слияния двух глюонов из разных протонов. Из [404]

программа моделирования на основе ATHENA, проведены первые генерации событий для этой реакции образования бозона Хиггса [404].

Перспективы поиска суперсимметричных частиц на LHC (нейтралينو, скалярных топ-кварков и др.) были исследованы сотрудниками этой группы в работах [405, 406].

Вопрос возможного поиска и наблюдения монополя Дирака — объекта, существование которого было предложено П. Дираком для объяснения квантования электрического заряда, традиционно был в зоне особого интереса дубненской группы жидкоаргонового калориметра ATLAS. В частности, в контексте разработки физической программы ATLAS уже в 2006 г. были проведены первые исследования возможности регистрации движущегося монополя Дирака. С этой целью была подготовлена программа трассировки монополя в установке ATLAS в среде ATHENA. Далее (2010–2012 гг.) были сделаны сразу три новых предложения в этом направлении. Первый способ предполагал использование ускорения монополя магнитным полем, причем это ускорение постоянно, если поле однородно и постоянно. Измеряя время прохождения объекта через эквидистантные регистрирующие плоскости, можно сделать заключение о характере движения этого объекта. Второй способ предполагал восстановление траектории движения в однородном и постоянном электрическом поле, которое только для магнитного монополя должно представлять собой окружность или ее часть. И третий способ был основан на постоянстве потери энергии монополем Дирака на ионизацию в многослойных пассивных диэлектрических трековых детекторах, помещенных в постоянное электрическое поле [407]. Предполагалось, что эти идеи можно проверить как на комплексе нуклотрон–NICA в Дубне [408, 409], так и на LHC в ЦЕРН.

На самом первом заседании дубненской группы, где обсуждалось участие ОИЯИ в разработке физической программы исследований на установке ATLAS (апрель 2004 г.), было сделано предложение (Б. З. Копелиович и В. А. Бедняков) начать исследования жестких КХД-процессов в столкновениях тяжелых ионов на LHC [410–412].

Интерес к таким жестким процессам обусловлен стремлением рассматривать их в качестве зонда того состояния материи, которое формируется сразу после столкновения тяжелых ионов очень высоких энергий (сверхплотная материя и/или кварк-глюонная плазма). Для выполнения такой задачи необходимо хорошее понимание динамики жестких КХД-процессов в условиях столкновения тяжелых ионов очень высоких энергий. Примером такого типа жесткого КХД-процесса является образование адронов (пионов) с большим поперечным импульсом p_T . Оно включает в себя, во-первых, взаимодействия (частиц) в начальном состоянии (ISI), т. е. до начала самого жесткого КХД-процесса. При энергиях LHC эти процессы подвержены сильному влиянию эффектов когерентности, которые еще достаточно слабы на RHIC и «невидимы» на SPS. Во-вторых, оно включает взаимодействия (частиц) в конечном состоянии (FSI). Здесь нужна адекватная модель формирования адронов в среде (кварк-глюонной), учитывающая немгновенность (протяженность) процесса образования адронов с большим p_T и т. п. Главная проблема — невозможность экспериментального разделения ISI и FSI. Поэтому, чтобы FSI

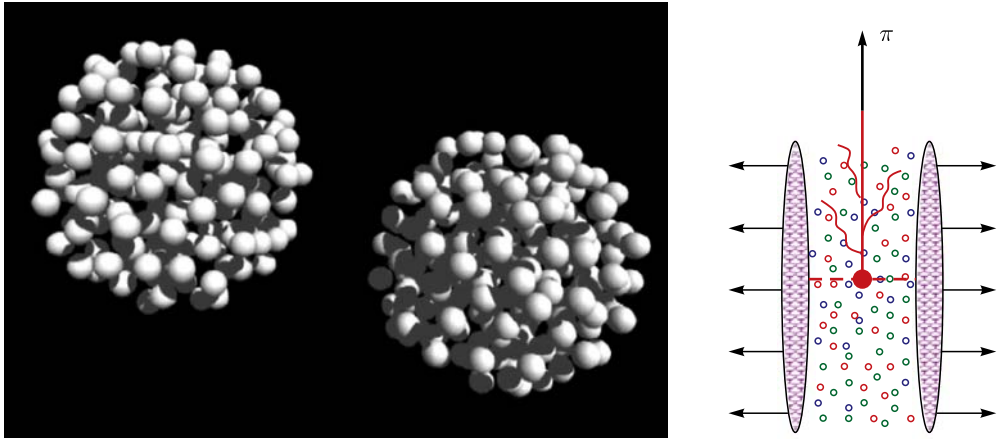


Рис. 4.11. Слева: два ядра свинца перед столкновением. Справа: пример взаимодействия в конечном состоянии — распространение и адронизация партона с большим p_T в плотной среде, образовавшейся сразу после столкновения двух ядер. Из [411]

служили зондом образовавшейся материи/среды, необходимо теоретическим путем (без какой-либо возможности напрямую экспериментально проверить) надежно определить ISI.

В 2005 г. в ЛФВЭ начались работы (В.Н. Поздняков) по исследованию процессов рождения Z , Z + струя и Υ -частиц в ядро-ядерных столкновениях с целью обнаружения образования «кварк-глюонной плазмы». Были проведены первые оценочные расчеты и моделирование. Анализ был нацелен на исследование вопросов образования, прохождения через плотную кварк-глюонную среду Z -бозона и адронной струи строго в противоположных направлениях (back-to-back) [413], а также исследование эффектов подавления выхода тяжелых кваркониев (Υ и т. п.), регистрация которых предполагалась по дилептонным парам.

Как известно, точечные нейтральные Z^0 -бозоны, будучи слабовазаимодействующими частицами, не подвержены (в первом приближении) влиянию кварк-глюонной среды (плазмы) ни на стадии образования, ни на стадии прохождения сквозь эту среду. Поэтому они представляют собой идеальные «реперные процессы» для изучения образования Υ - и J/ψ -частиц, а также для исследования эффекта гашения адронных струй в кварк-глюонной среде, когда Z^0 -бозон и струя разлетаются из точки образования с большим p_T в противоположных направлениях (под углом 180°). При этом Z^0 -бозон обычно регистрируется по его распаду на лептонную пару (e^+e^- или $\mu^+\mu^-$).

Исследования распадов $Z^0 \rightarrow \mu\mu$, выполненные на базе полного моделирования детектора ATLAS, показали, что за один месяц работы ЛНС в режиме столкновения тяжелых ионов возможно набрать более 5000 таких распадов Z^0 -бозона, что, в свою очередь, открывает вполне полноценную возможность изучения эффекта подавления адронных струй. При этом back-to-back конфигурация образованной пары Z^0 -бозона и струи должна заметно упростить процедуру восстановления искомой струи [413]. Работы были продолжены в направлении использования других генераторов событий (HIJING и т. п.),

уточнения алгоритмов восстановления струй, учета влияния энергетических потоков при столкновениях тяжелых ионов и других возможных фоновых событий.

При столкновении релятивистских тяжелых ионов важную роль играет прицельный параметр b . В зависимости от него взаимодействия ядер с радиусами R_1 и R_2 классифицируются как центральные ($b \ll R_1 + R_2$) и периферические ($b \simeq R_1 + R_2$), а если параметр b большой ($b > R_1 + R_2$), то имеет место ультрапериферическое столкновение (UPC). Ядра в последнем случае взаимодействуют лишь электромагнитным образом за счет обмена фотонами (рис. 4.12, слева). На ЛНС ожидалось два главных типа таких реакций (рис. 4.13): когда фотон взаимодействует с ионом как целым (фотон-померонный обмен) и когда чисто электромагнитным образом взаимодействуют фотоны от разных ядер (ионов).

В случае упругого $\gamma\gamma$ -взаимодействия заряды ядер действуют когерентно, производя интенсивные потоки фотонов с достаточно большой энергией (на ЛНС). Эта когерентность (в смысле заряда) протонов в ядре, с одной

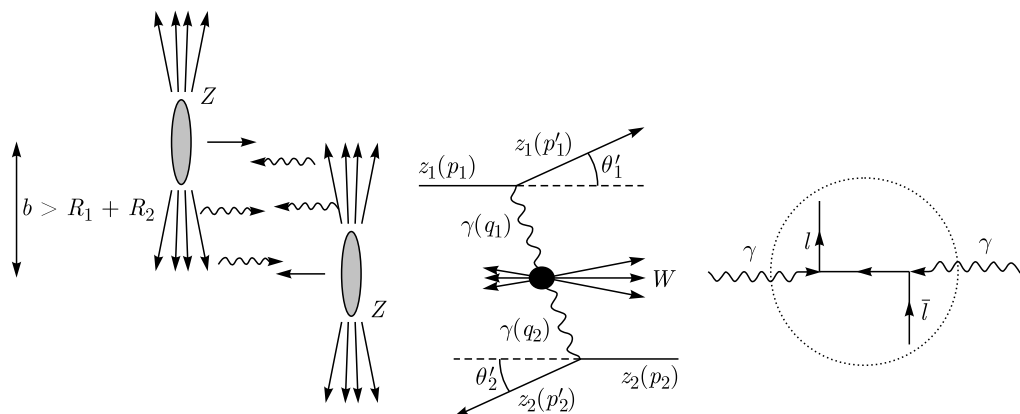


Рис. 4.12. Слева: пространственно-временная картина ультрапериферического взаимодействия тяжелых ионов. Прицельный параметр b больше суммы радиусов сталкивающихся ядер. Справа: схема ультрапериферического взаимодействия тяжелых ионов и двухфотонная диаграмма образования двух лептонов: $\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$. Оба фотона имеют практически нулевые значения виртуальностей $Q_i^2 = -q_i^2$ (квазиреальные), углы разлета ионов θ_i также очень малы. Из [414]

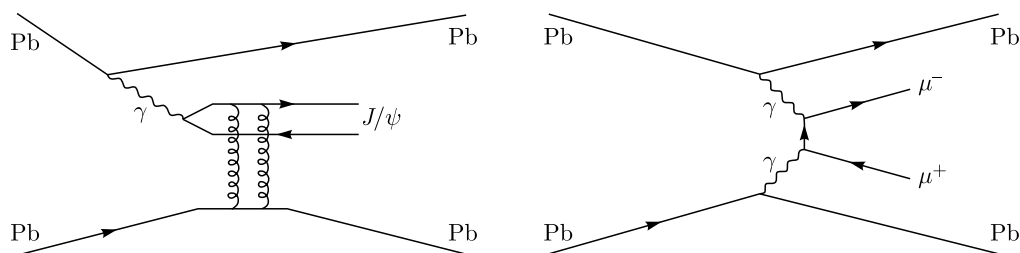


Рис. 4.13. Образование J/ψ -частицы (слева) и димюнной пары (справа) в ультрапериферическом столкновении ядер свинца

стороны, делает потоки фотонов в Z^2 раз мощнее, чем для пучков сталкивающихся протонов, а с другой стороны, она сильно ограничивает виртуальности (переданные Q^2 -импульсы) фотонов, поскольку электромагнитный формфактор ядра обычно экспоненциальным образом подавляет большие Q^2 .

В силу простоты топологии, малости числа адронов в конечном состоянии (удобное требование для отбора событий), огромного потока квазиреальных фотонов, область $\gamma\gamma$ -взаимодействий в столкновениях тяжелых ионов при экстремальных энергиях ЛНС является источником важной и, порой, уникальной информации [415]. Она открывает возможность для исследования образования одно- и двухмезонных состояний, частиц с открытым чармом (η_c , χ_c и т. п.), поиска бозона Хиггса, адронных струй с большим p_T , исследования структурной функции фотона, а также поиска «новой» физики. Были предложения использовать мюонные пары, образованные в этих двухфотонных процессах, для мониторингирования светимости ЛНС.

С участием сотрудников ОИЯИ были исследованы возможности детектора ATLAS для выделения и обнаружения пары лептонов, образованных в упругих ультрапериферических $\gamma\gamma$ -взаимодействиях тяжелых ионов. Была проанализирована возможность регистрации и определена специфика [414, 415] для всех трех возможных пар лептонов (e^+e^- , $\mu^+\mu^-$ и $\tau^+\tau^-$).

Как известно, прямые фотонные и фотон-струйные корреляции являются удобными инструментами для исследований «внутренней структуры» плотной среды, образующейся в столкновениях тяжелых ионов при энергиях ЛНС (рис. 4.14). Из-за слабого взаимодействия со средой прямые фотоны служат «стандартными свечами-метками» для выделения процессов жесткого рассеяния. Они также обеспечивают наиболее точное определение (начальных) импульсов ассоциированных с ними адронных струй. Поэтому при столкновениях тяжелых ионов на ЛНС анализ струй, «помеченных» прямыми фотонами, позволяет оценить их потери энергии в плотной кварк-глюонной среде. Возможность исследования выхода прямых фотонов и фотонов совместно с адронными струями в эксперименте ATLAS была изучена рабочей группой ATLAS по исследованию процессов в столкновениях тяжелых ионов [416].

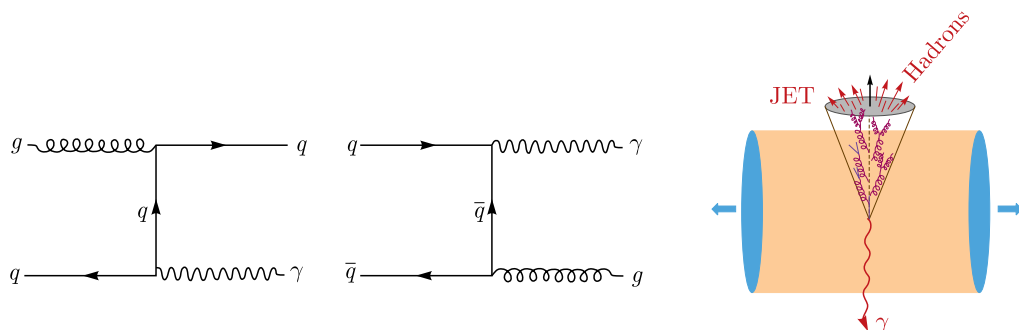


Рис. 4.14. Слева: простейшие диаграммы образования прямых фотонов. Справа: back-to-back топология, позволяющая изучать характер прохождения адронной струи через плотную кварк-глюонную среду. Из [416]

В. Н. Поздняковым был написан обзор по физике тяжелых ионов на установке ATLAS [417].

Начиная с 2004 г. вопрос о возможности и важности исследования нуклонных и ядерных функций распределения кварков и глюонов при уникальных энергиях ЛНС был в зоне особого интереса сотрудников ОИЯИ (см., например, [418]). Перспективы измерения глюонных функций распределения в совершенно новой кинематической области параметров на ЛНС путем изучения событий, содержащих в конечном состоянии γ/Z^0 -струя адронов [419], впервые обсуждался на первом рабочем совещании по физической программе эксперимента ATLAS в ОИЯИ. Этот вопрос получил дальнейшее развитие в работах группы ЛЯП под руководством Г. И. Лыкасова (п. 4.4.10).

В 2008–2011 гг. группа ЛФВЭ участвовала в подготовке и проведении совместного (глобального) КХД-анализа данных, полученных ранее в глубоконеупругом рассеянии лептонов на нуклонах и в pp -взаимодействиях на установке ATLAS (при энергии 7 ТэВ) в струйных, фотонных и двухлептонных событиях. Этот подход позволял снизить погрешности в вычислении структурных функций и, соответственно, сделать более надежной проверку теоретических предсказаний. Он также позволял улучшить оценки параметров КХД, используемых в теоретических расчетах по поиску возможных проявлений «новой» физики. Были подготовлены и отлажены соответствующие пакеты программ для такого КХД-анализа, в том числе и на NNLO-уровне точности [420, 421].

В 2010 г. в рамках группы было проведено изучение «minimum bias» событий в pp -взаимодействиях при энергии 7 ТэВ (с. ц. м.) на основе сравнения экспериментальных инклюзивных распределений заряженных частиц по поперечным импульсам, продольным импульсам, псевдобыстротам, множественности и другим переменным с соответствующими Монте-Карло распределениями. Было показано, что имело место удовлетворительное согласие распределений по инвариантным переменным Бьёркена (Q^2 , x) и «недостающей массе», что, в частности, могло бы свидетельствовать о квазиупругом характере изучаемых событий в рассмотренной области [422]. Был предложен также совершенно новый тип параметризации партонных распределений [423], который опирался как на данные HERA, так и на данные ЛНС.

Как известно, в рамках Стандартной модели для бозона Хиггса (с массой меньше двух масс t -кварка) наиболее вероятный адронный распад — распад на $b\bar{b}$ -пару. Для подавления слишком большого фона от адронов другого происхождения поиск этого распада предполагалось вести с учетом данных о характере образования самого бозона Хиггса. Наиболее перспективным в этом плане считался случай, когда распадающийся на $b\bar{b}$ -пару бозон Хиггса (рис. 4.15, справа) был бы рожден совместно с заряженным W -бозоном (рис. 4.15, слева). Лептон от распада W -бозона может служить эффективным триггером для регистрации WH -процесса. В работах коллаборации ATLAS [424, 425] была показана перспективность обнаружения этой реакции при отборе событий, в которых бозон Хиггса и W -бозон рождаются с большим поперечным импульсом. Совместно с коллегами из «хиггсовской» группы HSG5 сотрудники ОИЯИ разрабатывали новый подход, основанный на применении нейронных сетей, который включал также дополнительные (угловые)

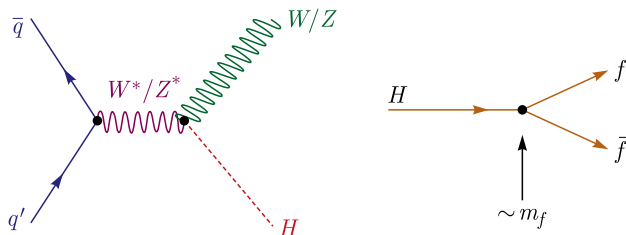


Рис. 4.15. Слева: ассоциативное рождение бозона Хиггса и векторного W/Z -бозона. Справа: распад бозона Хиггса на фермионную пару (вероятность пропорциональна массе фермиона)

переменные, определяемые спином распадающихся частиц [426]. Предварительный анализ показал, что для обнаружения бозона Хиггса в области масс $m_H \sim 120 \text{ ГэВ}/c^2$ необходимо комбинировать вклады нескольких каналов, включая канал совместного образования W - и H -бозонов. При полной светимости около 30 фб^{-1} ожидалось превышение сигнала над фоном более 3σ . Первые данные в эксперименте ATLAS вполне могли бы быть использованы для изучения таких фоновых процессов, как $W/Z + \text{струя}$, чисто струйные события и события с t -кварком [427].

Поиск заряженного бозона Хиггса помимо самостоятельного интереса (как поиск электрически заряженной скалярной частицы достаточно большой массы) во многом ассоциируется с поиском проявлений суперсимметрии, поскольку в самой концепции суперсимметрии всегда имеет место заряженный бозон Хиггса вместе с нейтральным(и).

По согласованию с «хиггсовской» рабочей группой ATLAS (HSG5 WG) в 2008–2010 гг. сотрудники ЛФВЭ и ЛЯП занимались исследованием возможности обнаружения заряженного бозона Хиггса по его (лептонным) распадам на чарджино и нейтралينو в рамках минимальной суперсимметричной Стандартной модели (MSSM). Считалось, что канал распада $H^+ \rightarrow 2\tilde{\chi}_1^0 + \nu_\mu + \mu^+ + e^+ + e^+$ (рис. 4.16, справа) предоставлял возможность обнаружить заряженный бозон Хиггса в той области пространства парамет-

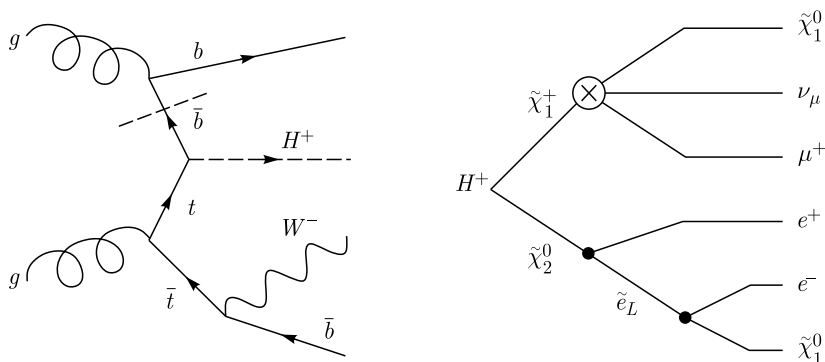


Рис. 4.16. Слева: вариант рождения заряженного бозона Хиггса вместе с W^- -бозоном и $b\bar{b}$ -парой. Справа: распад заряженного бозона Хиггса на три заряженных лептона, нейтрино и два нерегистрируемых легчайших нейтралино MSSM. Из [428]

ров MSSM, которая недоступна распадам на частицы Стандартной модели. Предполагалось, что заряженный бозон Хиггса имеет достаточно большую массу (не менее $250 \text{ ГэВ}/c^2$) и доминирует канал его рождения совместно с рождением t -кварка (рис. 4.16, слева). При анализе распада заряженного бозона Хиггса на чарджино–нейтралино были рассмотрены все возможные кинематически доступные их комбинации и моды распада, дающие в конечном состоянии три заряженных лептона (электроны и/или мюоны), два легчайших нейтралино и несколько нейтрино. Проведенные исследования показали перспективность данного канала для обнаружения заряженного бозона Хиггса в достаточно широкой области пространства параметров ($\tan \beta - m_{H^\pm}$). Тем не менее это было возможно лишь при определенных значениях других параметров MSSM: μ — параметра смешивания двух хиггсовских дублетов, M_2 — массы SU(2) гейджино [429]. Поэтому требовался более тщательный анализ четырехмерного пространства параметров модели для выработки стратегии поиска на основе специально сгенерированных Монте-Карло данных, имевшихся в «хиггсовской» рабочей группе HSG5. Эта работа оказалась слишком трудоемкой и была на время приостановлена, поскольку группа переключилась на анализ экспериментальных данных с установки ATLAS, полученных в первый период работы LHC на низкой светимости. Эти данные использовались для определения реальных фонов (в том числе и суперсимметричных) [428].

Успешная работа в данном направлении послужила основой для принятия коллаборацией ATLAS решения о проведении в Дубне (май 2010 г.) силами сотрудников ОИЯИ международного совещания одной из своих рабочих групп (HSG5 Working Group). На нем было представлено два доклада. В частности, были предложены новые переменные для анализа экспериментальных данных с помощью нейронных сетей. Подробнее о совещании см. в п. 5.3.

Итак, на стадии подготовки физической программы исследований на установке ATLAS дубненская группа жидкоаргонового калориметра занималась исследованием процессов с участием топ-кварков, вопросов возможного обнаружения монополя Дирака, нейтрального бозона Хиггса Стандартной модели (по его ассоциативному рождению с W -бозоном и распаду на $b\bar{b}$ -пару), заряженного суперсимметричного бозона Хиггса (по трехлептонной его моде распада), поиском возможных проявлений SUSY (стоп-кварков и т. п.), КХД-анализом глубоконеупругого рассеяния (включая процессы с рождением лептонных пар и анализ «minimum bias» событий), развитием алгоритмов реконструкции адронных струй и другими задачами.

4.4. Вклад группы тайл-калориметра в физическую программу ATLAS

Вклад этой группы в разработку физической программы эксперимента ATLAS оказался наиболее многоплановым и наиболее перспективным в том смысле, что многие из предложенных направлений действительно рано или поздно превратились в полноценные анализы данных и последующие публикации коллаборации с решающим вкладом сотрудников ОИЯИ.

4.4.1. События с очень большой множественностью. На ранней стадии (до 2004 г.) дубненская группа тайл-калориметра ATLAS занималась анализом возможностей исследования на ЛHC физических причин и характерных особенностей образования событий с максимально большой множественностью вторичных частиц. Как уже упоминалось (п. 4.1), интерес к этим исследованиям был вызван работами дубненских теоретиков [366, 367, 430].

В частности, было предложено [431, 432] использовать определенного сорта корреляции между вторичными частицами — изучение поведения этих корреляций обещало пролить свет на характер адронизации кварков и превращения их в адроны (пионы). В этом направлении для эксперимента ATLAS ($\sqrt{s} = 14$ ТэВ) было исследовано детальное поведение энергетических корреляторов $K_{2,3} = \langle \prod_{i=1}^{2,3} (\varepsilon_i - \langle \varepsilon \rangle) \rangle_n$, где $\langle \varepsilon \rangle = 1/n \sum_{i=1}^n \varepsilon_i$, ε_i — энергия отдельной частицы, а также их безразмерного отношения $R = K_3^{2/3}/K_2$ в зависимости от множественности n зарегистрированных адронов [433]. Ожидалось, что это отношение может служить мерой применимости термодинамического описания системы с очень большой множественностью, а также индикатором приближения к некоторому состоянию равновесия в системе конечных адронов. Полученное отношение R оказалось ≥ 1 и не зависело от множественности n [433]. Результаты расчета R в рамках РYTHIA не имели ожидаемой тенденции к уменьшению R и не согласовывались с теоретическим предсказанием для событий с предельно большой множественностью, $R \ll 1$ [431, 432], что, вообще говоря, было не удивительно, поскольку обсуждаемые предсказания не были еще учтены в генераторе РYTHIA.

Исследования возможностей использования отмеченных выше корреляторов (энергий вторичных частиц) для получения новой экспериментальной информации на ЛHC (эксперимент ATLAS) в области очень больших множественностей вторичных частиц и проверки ряда теоретических моделей (термализации, образования равновесного состояния, баланса мягких и жестких КХД-процессов и т. п.) продолжались еще несколько лет (2004–2010 гг.). Был предложен ряд усовершенствований в этом направлении [434].

Справедливости ради следует сказать, что предложенная в работах [431, 432] аргументация важности области очень большой множественности частиц не была достаточно убедительной, однако в целом эта область действительно представляла заметный интерес как раз для экспериментального исследования. Например, адронизация кварков и глюонов, приводящая к конечному состоянию с очень большим числом (заряженных) вторичных частиц, по-видимому, с самого начала (т. е. начиная с жесткого родительского подпроцесса, если он вообще дает вклад в такие состояния) должна идти заметно медленнее, чем в случае обычных множественностей, когда адроны начинают формироваться очень быстро путем последовательного разрыва кварк-глюонных струн с образованием ярко выраженных энергичных адронных струй. При «медленной» адронизации (приводящей к событиям с экстремально большой множественностью) возможно образование каких-то квазистабильных промежуточных состояний (глюоболов, конденсатов, резонансов, замкнутых струн и т. п.), которые препятствовали бы мгновенной концентрации (локализации) энергии в виде обычных кварк-глюонных струй. Эти квазисостояния

могли бы распадаться уже медленнее, пространственно-симметричнее, и ярко выраженные струи адронов с высокой энергией уже бы не образовывались. Энергия (сконцентрированная ранее в этих струях) распределялась бы более равномерно среди значительно большего числа (менее энергичных) вторичных частиц. В самом предельном случае очень больших множественностей можно было бы ожидать событий, в которых не срабатывали бы алгоритмы поиска адронных струй вообще. Это было бы их отличительной сигнатурой. Экспериментально значимое число именно таких событий говорило бы о каком-то ином мгновенно симметричном процессе образования (большого числа) вторичных частиц. Это могло бы быть альтернативой общепринятой парадигме образования (путем разрыва кварк-глюонных струн) ярко выраженных и асимметрично расположенных в пространстве потоков вторичных адронов высокой энергии. Здесь заметную роль могли бы играть, например, сверхплотные конденсированные состояния глюонов [435, 436], развал-распад которых на очень большое число частиц мог бы проходить по принципу «разбитого ветрового стекла» (т. е. мгновенно и сразу во всех направлениях). По-видимому, такого рода исследования еще ждут своего часа.

Тем не менее следует отметить, что опыт, накопленный в изучении свойств корреляторов, очень пригодился этой группе на стадии обработки реальных данных и при изучении так называемых бозе-эйнштейновских корреляций (см. работы в п. 5.2).

4.4.2. Композитность. В 2005 г. были проведены предварительные исследования возможности обнаружения внутренней структуры кварков (композитности) путем выявления специфических характеристик углового распределения двухструйных событий с большими поперечными импульсами. Несмотря на планы проведения полного моделирования на базе ATHENA, эта работа, к сожалению, не нашла дальнейшего развития, хотя первые расчеты в рамках быстрого моделирования установки ATLAS (выполненные З. Усубовым) были проведены еще в 1999 г. и выглядели вполне обнадеживающими [437]. В частности, были получены оценки величины масштаба компактности Λ при ожидаемой интегральной светимости LHC 30 и 300 фб⁻¹.

4.4.3. На пути к обнаружению бозона Хиггса. В 2005 г. на базе официально смоделированных коллаборацией данных (Data Challenge 1 и 2) было предложено (Ю. А. Кульчицким и В. Б. Виноградовым) начать исследования возможности обнаружения бозона Хиггса (большой массы $M_H = 400\text{--}1000$ ГэВ/ c^2) путем поиска и изучения процессов его распада на пары векторных бозонов: $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$, $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$ и $H \rightarrow ZZ \rightarrow ll\nu\nu$, $H \rightarrow ZZ \rightarrow lljj$. Предполагалось, что этот тяжелый бозон будет рождаться за счет слияния векторных бозонов (VBF) совместно с парой кварков, типа $pp \rightarrow qqH$, анализ предполагалось вести в рамках стандартного математического обеспечения коллаборации (ATHENA и т. п.). Работы продолжались до 2007 г.

Второе «направление к бозону Хиггса» было связано с исследованием возможности обнаружения его (масса 115–160 ГэВ/ c^2) по распаду $H \rightarrow Z + \gamma$ и далее $Z \rightarrow 2$ лептона в рамках специализированного математического обеспечения ATHENA (З. Усубов) [438].

Еще одна попытка работать «в направлении» поиска бозона Хиггса была связана с пражской группой (рук. Р. Ляйтнер) — планировалось в 2007–2008 гг. выполнить исследование распада бозона Хиггса на пары $\tau^+\tau^-$ -лептонов и W^+W^- -бозонов. В зоне интересов пражской группы в 2006 г. был вопрос определения спина бозона Хиггса по характеристикам конечных W^\pm -бозонов, а также исследование возможности обнаружения долгоживущих (стабильных) R -адронов (содержащих SUSY-кварки) достаточно большой массы [439].

4.4.4. Физика топ-кварка. Другое важное направление разработки физической программы эксперимента ATLAS в группе тайл-калориметра касалось физики топ-кварков. С одной стороны, это направление было традиционным для отдела множественных адронных процессов ЛЯП, где уже велись аналогичные работы в рамках эксперимента CDF (Фермилаб), а с другой — это оказалось хорошим начальным полигоном для включения в работу молодых в то время сотрудников ЛЯП.

На основе работ словацких коллег [440] в 2004–2005 гг. был начат цикл работ (Е. В. Храмов, А. Тоноян) по исследованию перспектив проверки «правильности» заряда топ-кварка (+2/3) и возможности поиска резонансных состояний, распадающихся на $t\bar{t}$ -пару с помощью детектора ATLAS. Сначала эти работы были выполнены на базе быстрого моделирования установки. Затем была изучена роль различных генераторов и других процессов, влияющих на точность определения знака заряда топ-кварка. Анализ проводился с использованием генераторов событий HERWIG и PYTHIA и пакета моделирования экспериментальной установки GEANT4. После проведения полного моделирования в рамках ATHENA была подготовлена публикация [54], посвященная исследованию возможности восстановления заряда топ-кварка посредством измерения зарядов продуктов его распада на установке ATLAS. При этом использовались события с рождением пары t -, \bar{t} -кварков, которые, в свою очередь, распадались по адронному и лептонному каналам распада (рис. 4.17). Также была рассмотрена гипотеза об альтернативной интерпретации экспериментальных данных. Для восстановления заряда b -струи был применен метод «полулептонного распада B -мезона» (рис. 4.17, справа), когда знак заряда лептона совпадает со знаком заряда распадающегося мезона: $b \rightarrow c, u + l^- + \bar{\nu}$, $\bar{b} \rightarrow \bar{c}, \bar{u} + l^+ + \nu$. Лептон от b -распада проявляется экспе-

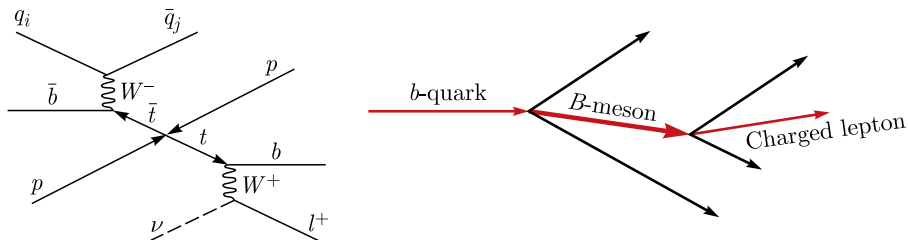


Рис. 4.17. Слева: распад образованной в pp -столкновении $t\bar{t}$ -пары на изолированный лептон и кварки (адронные струи), два из которых — b - и \bar{b} -кварки. Справа: полулептонный распад B -мезона, образованного после адронизации b -кварка. Из [54]

риментально как неизолированный лептон внутри соответствующей b -струи. Использование этого метода позволило достичь статистической значимости более 5σ после анализа 1 фб^{-1} данных с $t\bar{t}$ -событиями. Окончательные результаты проведенных исследований вошли в обзорную публикацию коллаборации, в которой излагались перспективы эксперимента ATLAS по данному вопросу [441].

Исследования возможности регистрации на LHC узкого нейтрального резонансного состояния (типа Z' -бозона), распадающегося на $t\bar{t}$ -пару, на базе сгенерированного в рамках рабочей группы Тор-ATLAS набора данных были также доведены до публикации [55, 56]. Была оценена возможность регистрации тяжелого $t\bar{t}$ -резонанса с шириной $0,02 M_{Z'}$. В качестве примера был выбран дополнительный электрически нейтральный Z' -бозон с массами $M_{Z'} = 700, 1000, 1500, 2000$ и $3000 \text{ ГэВ}/c^2$. Лептон-струйный канал распада $t\bar{t}$ -пары был использован для восстановления инвариантной массы резонанса, при этом основным фоновым процессом было прямое рождение $t\bar{t}$ -пары. Остальные источники фоновых процессов давали незначительный вклад. Кроме того, был применен новый дополнительный критерий на поперечный импульс «адронного» t -кварка, который позволил улучшить точность восстановления инвариантной массы резонанса. Было оценено минимальное сечение рождения $t\bar{t}$ -резонанса, позволяющее зарегистрировать его на уровне достоверности 5σ при различных значениях интегральной светимости LHC и различных критериях отбора событий (с учетом идентификации b -кварка и без такой возможности).

Завершением предварительного этапа работ по физике топ-кварка (до этапа набора данных) стал обзор «Топ-кварк от тэватрона до LHC» [57], в котором описаны исследования, касающиеся «стандартной» физики топ-кварка. В нем приведена краткая история поиска этого самого тяжелого из существующих кварков, подробно описано открытие топ-кварка на установке CDF в 1995 г. Обсуждались каналы и методы обнаружения и возможности измерения массы топ-кварка в различных каналах распада $t\bar{t}$ -пары на pp -коллайдере LHC. Были рассмотрены также возможности исследований в области топ-физики на начальной стадии работы LHC.

Уже при непосредственной подготовке к приему первых данных LHC в группе были изучены перспективы наблюдения в эксперименте ATLAS (при энергии 10 ТэВ) тяжелого нейтрального резонанса [442]. В качестве примера рассматривался узкий Z' -бозон с массой $1 \text{ ТэВ}/c^2$, распадающийся на топ-анти топ кварковую пару. Была оптимизирована процедура выбора критерия отбора истинных Z' -резонансов посредством процесса $Z' \rightarrow t\bar{t}$. Это позволило значительно подавить неустранимый фон от прямого образования $t\bar{t}$ -пар, а также соответствующий комбинаторный фон. Для выделения и реконструкции $t\bar{t}$ -пар был использован только так называемый лептон-струйный канал распада $t\bar{t}$ -пары. Анализ был основан на официально сгенерированных коллаборацией ATLAS наборах данных, содержащих как «сигнальный процесс» $Z' \rightarrow t\bar{t}$, так и «фоновый процесс» от прямого $t\bar{t}$ -рождения (рис. 4.18, слева). Было установлено, что при энергии сталкивающихся протонов 10 ТэВ и интегральной светимости 1 фб^{-1} инклюзивное сечение процесса $pp \rightarrow Z' \rightarrow t\bar{t}$ должно быть не меньше 10,5 пб, для того чтобы можно было обнаружить

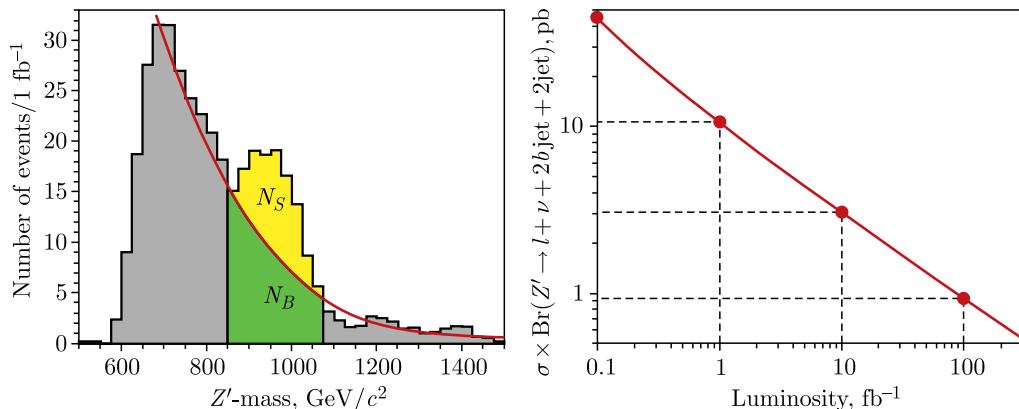


Рис. 4.18. Слева: наложение сигнальных и фоновых событий, сгенерированных при энергии 10 ТэВ и интегральной светимости 1 fb^{-1} . Показано, что если сечение процесса $pp \rightarrow Z' \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b} + l\nu + 2$ струи превышает 10,5 пб, то на уровне достоверности 5σ возможно обнаружение сигнала от Z' -резонанса с инвариантной массой 1 ТэВ/ c^2 . Справа: корреляция между светимостью и минимальным сечением указанной реакции, необходимым для обнаружения этого резонанса (уровень 5σ).
Из [442]

этот процесс на уровне достоверности в пять стандартных отклонений (5σ). На основе этого критерия обнаружения получена зависимость необходимого значения минимального сечения вышеупомянутого процесса ($pp \rightarrow Z' \rightarrow t\bar{t}$) от интегральной светимости для энергии pp -столкновений 10 ТэВ (рис. 4.18, справа).

В 2011 г. на основе приобретенного опыта и первых данных ATLAS с общей статистикой $163,5 \text{ пб}^{-1}$ (при энергии 7 ТэВ) группой был проведен первый тестовый поиск такого тяжелого нейтрального резонанса. При этом использовались сгенерированные методом Монте-Карло наборы данных для сигнала $Z' \rightarrow t\bar{t}$ и различных фоновых процессов (прямое рождение $t\bar{t}$ -пары, W/Z + струи, $W + t$, одного t -кварка и КХД-мультиструйных конечных состояний). Сигнальный Z' -резонанс был сгенерирован с массами 800, 1000 и 1300 $\text{ГэВ}/c^2$ в инклюзивном процессе $pp \rightarrow Z' \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b} + l\nu + 2$ струи. Для реконструкции $t\bar{t}$ -пары был использован только канал распада с одним мюоном и несколькими адронными струями. Те же критерии отбора были применены для анализа вклада от основного фонового процесса $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow$ все что угодно (прямое образование $t\bar{t}$ -пары в Стандартной модели).

В отличие от анализа цепочки распада $Z' \rightarrow t\bar{t} \rightarrow \mu +$ струи, выполненного коллаборацией ATLAS [443, 444], в проведенном исследовании была использована дополнительная информация о наличии двух b -струй и проведена полная реконструкция всех промежуточных частиц. Вместе с некоторыми дополнительными критериями эти два условия позволили выполнить более детальный поиск сигнала Z' -резонансов в процессе $pp \rightarrow Z' \rightarrow t\bar{t} \rightarrow W^-W^+b\bar{b} \rightarrow b\bar{b} + l\nu + 2$ струи. Эту процедуру предполагалось использовать для дальнейшего анализа в качестве дополнительного метода к традиционно используемому подходу [443, 444], поскольку она позволя-

ла найти четкую сигнатуру ожидаемого процесса и значительно снизить комбинаторный фон. К сожалению, на обработанной статистике не удалось наблюдать сколько-нибудь значимого превышения измеренного числа событий над ожиданием Стандартной модели. Тем не менее был сделан вывод, что минимальное сечение рождение Z' -резонанса, например, с массой $1000 \text{ ГэВ}/c^2$, в процессе $Z' \rightarrow t\bar{t} \rightarrow 2b\text{-струи} + 2 \text{ струи} + l + \nu$ должно быть не менее $15,0 \text{ пб}$, чтобы его можно было увидеть (на уровне достоверности 5σ) при данной светимости. Планировалось продолжить применение данного метода на полной статистике 2011 г. [445, 446].

В коллаборации с греческими коллегами (рук. Н. Джокарис) был предложен новый метод измерения массы топ-кварка на ЛНС, основанный на использовании только «лептонной информации» [447, 448]. Применимость этого метода была исследована на основе анализа лептон-струйного канала распада пары топ-кварков ($t\bar{t} \rightarrow \text{лептон} + \text{струи адронов}$) в детекторе ATLAS при энергии 10 ТэВ . Наклон линейной зависимости среднего поперечного импульса лептона как функции массы топ-кварка и отношение сигнала к фону являются ключевыми факторами данного метода (рис. 4.19): чем больше оба этих значения, тем точнее может быть определена масса топ-кварка данным методом. Далее предполагалось провести калибровку зависимости среднего поперечного импульса лептона от массы топ-кварка на основе более широкого набора смоделированных данных для разных масс топ-кварка, а также более тщательного исследования фоновых процессов [449].

В результате обсуждений проблемы взаимосвязи масс топ-кварка и бозона Хиггса фактически по инициативе Никоса Джокариса появился обзор «О механизме Хиггса образования масс в Стандартной модели» [4]. Поскольку выяснение происхождения масс элементарных частиц являлось на тот момент одной из главных проблем современной физики, а также то, что именно обнаружение бозона Хиггса (и исследование его свойств) было основной задачей запуска ЛНС, в этом обзоре подробно был рассмотрен механизм Хиггса, объясняющий в рамках Стандартной модели возникновение масс у всех элементарных частиц. Помимо этого большое внимание было уделено параметру λ , ответственному за квадратичное самодействие полей Хиггса, а также связанным с ним ограничениям на массу самого бозона Хиггса, вытекающим из таких условий, как унитарность, тривиальность и стабильность (вакуума). В частности, была проиллюстрирована процедура формирования ненулевого значения параметра λ , обусловленная петлевыми квантовыми поправками в эффективном потенциале. В качестве примера были

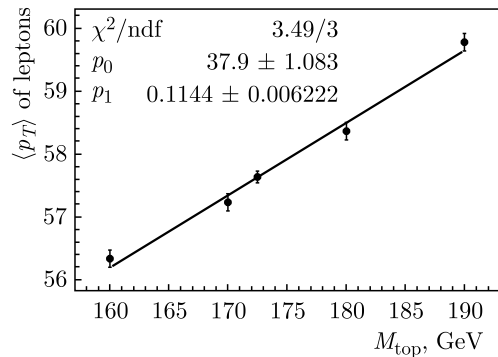


Рис. 4.19. Зависимость среднего поперечного импульса лептона, $\langle p_T \rangle$, от «задаваемой» массы топ-кварка. Анализ проведен с учетом совместного моделирования сигнальных и фоновых событий. Из [449]

даны предсказания для масс топ-кварка и бозона Хиггса, которые получаются в случае равенства единице юкавской константы связи топ-кварка и параметра λ [4].

4.4.5. О возможности поиска монополя. Как известно, в 1931 г. П. Дирак показал, что существование в природе магнитного заряда позволяет объяснить квантование электрического заряда. При этом магнитный заряд g_M связан с электрическим зарядом e соотношением $eg_M = n\hbar c/2$, где $n = \pm 1, \pm 2, \dots$. Минимальный магнитный заряд (монополя Дирака) $g_D \simeq 69e$. Кроме объяснения факта квантования электрического заряда существование в природе магнитных зарядов восстанавливало бы симметрию в уравнениях Максвелла. Было показано (см., например, [450–455]), что в рамках концепции объединения всех взаимодействий (Grand Unification) в результате спонтанного нарушения калибровочной группы с образованием «электромагнитной» подгруппы $U(1)$ неизбежно возникают магнитные монополи. Массы таких монополей обычно соотносились с масштабом объединения 10^{17} ГэВ (см., например [456, 457]), что делало бессмысленным их поиск на коллайдерах даже самых высоких энергий. Однако появились объединительные модели на основе дополнительных размерностей, которые позволяют монополям иметь массу 1–15 ТэВ, благодаря объединению взаимодействия на масштабах энергий меньших планковского [458, 459]. Это открывает уникальную возможность поиска таких монополей при энергиях ЛНС.

В 2006 г. совместно с белорусскими коллегами (рук. Ю. А. Курочкин) в ОИЯИ была предпринята попытка исследования возможностей использования установки ATLAS для поиска монополя Дирака посредством его распада на два фотона [460]. При этом слияние двух фотонов (испускаемых начальными протонами) рассматривалось как основной канал образования монополей в протон-протонных столкновениях на ЛНС (рис. 4.20, справа), т. е. изучалась задача двухфотонного образования и последующего детектирования пары монополь–антимонополь при энергиях ЛНС: $pp \rightarrow \gamma\gamma + X \Rightarrow M + \bar{M} + X$ [461, 462]. Поскольку монополь (с минимальным магнитным зарядом) будет ионизировать вещество, такое как ядро тулия ($Z = 69$), то именно эту большую ионизирующую способность монополей предполагалось использовать в качестве сигнала его присутствия в детекторе (см. также п. 4.3).

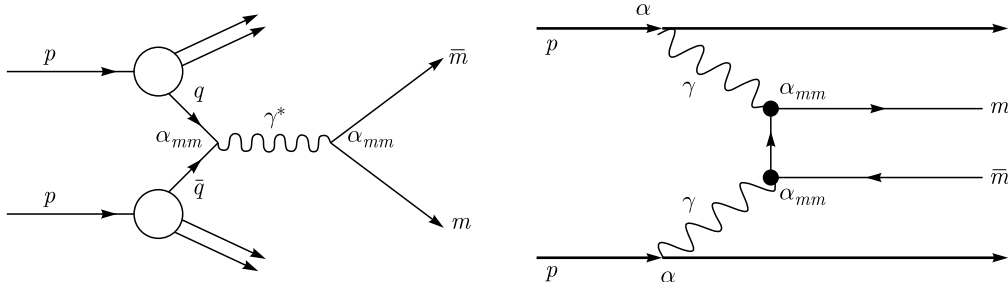


Рис. 4.20. Варианты образования пары монополь–антимонополь в pp -столкновениях: слева — механизм Дрелла–Яна, справа — слияние фотонов

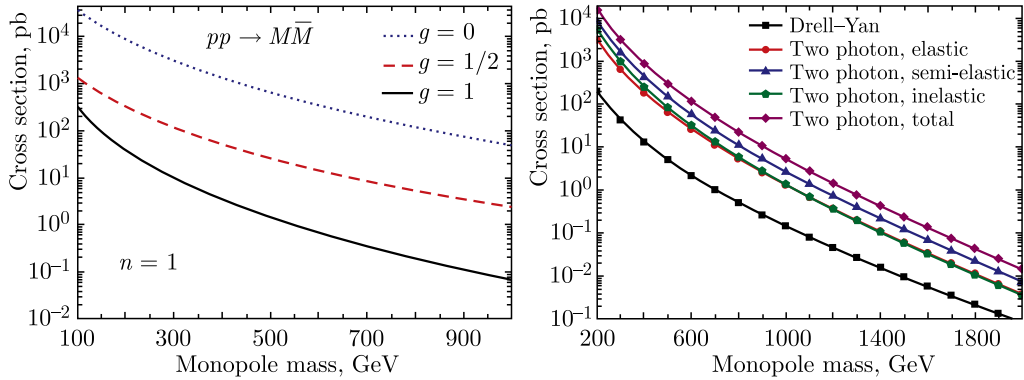


Рис. 4.21. Слева: полные сечения рождения пары монополю–антимонополь двумя фотонами для разных спинов монополя. Справа: вклады различных механизмов образования монополей в полное сечение при 14 ТэВ. Видно, что слияние двух фотонов дает максимальный вклад в сечение прямого образования монополей на ЛНС. Из [460, 461]

В рамках коллаборации с участием наших коллег (на уровне генераторов событий) были выполнены исследования перспектив обнаружения монополей с помощью установки ATLAS [463]. Было показано, что детектор ATLAS вполне приспособлен к поиску магнитных монополей с большим поперечным импульсом p_T . Такая сигнатура событий должна была бы проявляться в виде ярко выраженного трека во внутреннем детекторе и высокой степенью ионизационных потерь в электромагнитном калориметре. При этом ливень в калориметре предполагался очень узким, что позволяло легко разделять монополи и электроны высоких энергий. Были получены оценки верхних пределов для сечения образования (механизм Дрелла–Яна, рис. 4.20, слева) монополей в зависимости от их массы, и было показано, в частности, что можно достичь ограничения на значения массы в $0,95 \text{ ТэВ}/c^2$ при интегральной светимости $0,5 \text{ фб}^{-1}$.

Другой канал образования пары дираковских монополю–антимонополь со спином-1/2 — путем слияния двух фотонов при упругом (рис. 4.21, справа) столкновении протонов (при энергии 14 ТэВ) — был исследован на генераторном уровне (MadGraph) в работе [464]. Было показано, что основная масса ожидаемых событий (распределения образованных монополей и антимонполей) вполне доступна для регистрации детектором ATLAS. Предполагалось участие в анализе первых реальных данных на предмет поиска возможных проявлений монополей.

4.4.6. В направлении поиска суперсимметрии (SUSY). Поиск проявлений SUSY на ЛНС, в котором собиралась участвовать дубненская группа ATLAS, впервые был рассмотрен весной 2004 г. на самом первом рабочем совещании, специально посвященном обсуждению участия ОИЯИ в физической программе эксперимента ATLAS [465].

В частности, уже тогда было отмечено, что в отличие от Стандартной модели SUSY описывает «всю физику» (массы всех частиц и все константы взаимодействия) конечным набором параметров. Например, в mSUGRA-версии

SUSY таких параметров всего 4. В этом, с одной стороны, всеобъемлющая сила концепции SUSY (описывает физику от сверхвысоких до сверхнизких энергий), а с другой — исключительная сложность ее экспериментального обнаружения. По существу, для доказательства обнаружения SUSY необходимо все наблюдаемые отклонения от предсказаний Стандартной модели описать одним, вполне фиксированным набором параметров конкретной SUSY-модели.

Как известно, на коллайдере LHC «недостающая» энергия и большой поперечный импульс — общий фирменный знак «новой» физики, в том числе и суперсимметрии (с ненарушенной R -четностью, рис. 4.22). Другой потенциально важный SUSY-сигнал на LHC — это заряженный бозон Хиггса, который, вообще говоря, может и не иметь отношения к SUSY, но в концепции SUSY он неизбежен.

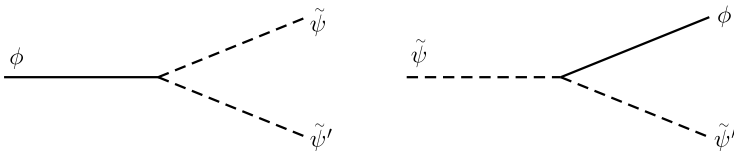


Рис. 4.22. При сохранении R -четности в любой вершине взаимодействия присутствуют всегда две суперсимметричные частицы (отмеченные тильдой — $\tilde{\psi}$). Поэтому они рождаются и исчезают только парами и легчайшая SUSY частица стабильна, ей не на что распасться без нарушения R -четности

В суперсимметричных моделях с сохранением R -четности суперпартнеры обычных частиц (SUSY-частицы) могут быть созданы только в парах, что приводит к существованию стабильной легкой суперсимметричной частицы (LSP).

Важнейший «побочный продукт» идеи SUSY — это легчайшая SUSY-частица, обычно нейтралино (стабильная, массивная, нейтральная, слабо-взаимодействующая) — как правило, хороший кандидат на роль частицы галактической темной материи во Вселенной. К сожалению, в ускорительном эксперименте можно обнаружить только потенциального кандидата на роль частиц темной материи в виде, скажем, стабильных, «невзаимодействующих» нейтралино, для доказательства этой сущности нужны эксперименты по прямому детектированию темной материи [466], которые могут позволить доказать их галактическое происхождение. И, тем не менее, ускорительные ограничения на массы SUSY-частиц, и особенно ограничения на массу легчайшей SUSY-частицы, крайне важны как «целеуказания» для прямого поиска темной материи в наземных условиях, поскольку в рамках единой концепции SUSY вероятность этого поиска описывается упомянутым выше единым набором параметров. Это хороший пример взаимного дополнения ускорительного и неускорительного поисков SUSY.

Итак, SUSY будет обнаружена только тогда, когда вся совокупность отклонений от Стандартной модели будет объяснена универсальным набором SUSY-параметров. Поэтому имеет место «круговая охота на SUSY», когда для доказательства ее существования необходимо привлекать максимальное число источников информации, таких как коллайдер LHC, изоэтранные экс-

перименты по прямому (а также косвенному) детектированию частиц темной материи, редкие распады частиц, в частности с нарушением аромата, данные наблюдательной астрофизики, космологии и т. п.

Из-за неизвестных априори значений масс открытие частиц SUSY (а также заряженных бозонов Хиггса) является очень серьезным вызовом для современной ускорительной физики элементарных частицы. Поэтому приходится искать и тщательно изучать любые возможные характерные свидетельства проявления (сигнатуры) частиц SUSY, которые могли бы служить доказательством ожидаемого открытия SUSY.

Минимальная суперсимметричная версия Стандартной модели (MSSM) с универсальными условиями мягкого нарушения суперсимметрии (mSUGRA) обладает минимальным набором свободных параметров (через которые можно вычислить практически любые наблюдаемые): m_0 , $m_{1/2}$, $\text{sign } \mu$, A_0 , $\tan \beta = v_2/v_1$, где m_0 и $m_{1/2}$ — общие массы всех скалярных и всех спинорных суперпартнеров на масштабе объединения всех взаимодействий, μ — параметр смешивания бозонов Хиггса, A_0 — параметр «мягкого» нарушения суперсимметрии и $\tan \beta$ — отношение вакуумных средних двух полей Хиггса. Эти параметры не произвольны, они уже в значительной степени ограничены имеющимися экспериментальными и наблюдаемыми данными (см., например, рис. 4.23). На основе упомянутых выше параметров (в качестве начальных условий на масштабе объединения) в рамках mSUGRA можно полностью рассчитать все массы всех SUSY-частиц (суперпартнеров) путем решения ренормгрупповых уравнений.

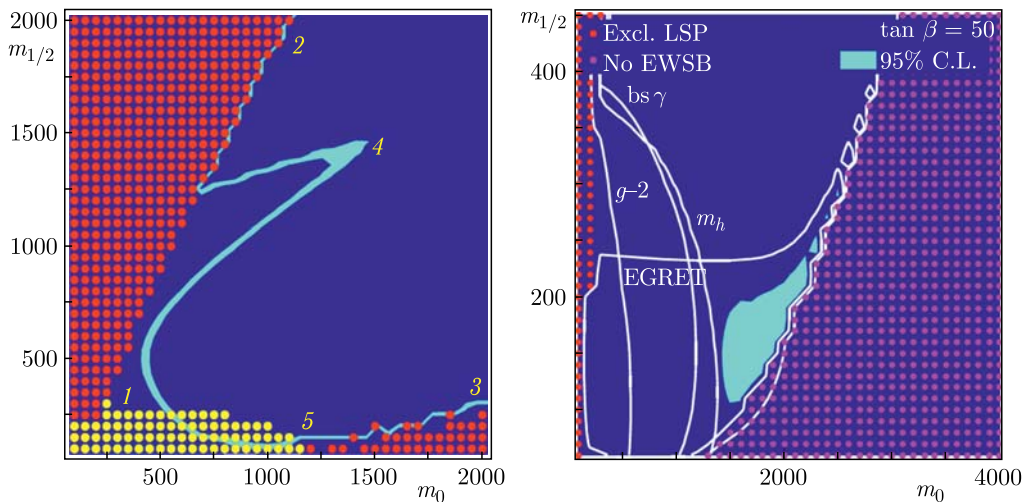


Рис. 4.23. Слева: пространство разрешенных значений параметров mSUGRA m_0 – $m_{1/2}$. Голубая линия ограничивает область, разрешенную данными астрофизики. Различные разрешенные области параметров обозначены цифрами. EGRET-область отмечена цифрой 5. Справа: выделенная голубым область представляет собой увеличенную EGRET-область параметров $\tan \beta = 50$, $\mu > 0$ и $A_0 = 0$. Точками отмечены уже исключенные области (где, скажем, stau — LSP, или не происходит нарушения электрослабой симметрии, или слишком легкий бозон Хиггса)

В силу этой «вездесущности» SUSY первые работы по систематическому исследованию вопроса обнаружения SUSY на коллайдере LHC были предприняты в 2006 г. после подключения к группе тайл-калориметра дубненских теоретиков (рук. Д. И. Казаков) [467]. Оригинальное предложение касалось изучения возможности обнаружения на LHC сигналов суперсимметрии [468, 469] в так называемой EGRET-области SUSY, которая в то время представляла особый интерес в связи с результатами прямого детектирования частиц темной материи (путем наблюдения годовой модуляции сигнала) в эксперименте DAMA [470–474] и косвенным указанием на возможный сигнал от аннигиляции частиц темной материи в распределении гамма-квантов в космических лучах в эксперименте EGRET [475, 476]. Анализ EGRET-области (рис. 4.23) показывал, что, грубо говоря, масса легкой SUSY-частицы — наилучшего кандидата на роль темной материи — должна быть на уровне $100 \text{ ГэВ}/c^2$.

Именно по этой причине группа начала исследование возможности наблюдения на LHC сигнала от рождения двух SUSY-глюино, $\tilde{g}\tilde{g}$, характеристики которых определяются как раз EGRET-областью пространства параметров mSUGRA.

На партонном уровне пара глюино рождается за счет так называемого слияния глюонов (через виртуальный глюон: $gg \rightarrow g^* \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$, рис. 4.24), затем каждое глюино сначала распадается на $b\bar{b}$ -пару и второе (по массе) нейтрально $\tilde{\chi}_2^0$, которое в свою очередь распадается на лептонную ($\mu^+\mu^-$ или e^+e^-) или квартовую ($q\bar{q}$, $q = u, d, c, s$) пару и LSP-нейтрально $\tilde{\chi}_1^0$.

Таким образом, имеется дилептонный канал распада $\tilde{g}\tilde{g}$ -пары: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g} + X \rightarrow 4 b\text{-струи} + 2l^+l^- + 2\tilde{\chi}_1^0 + X$ (рис. 4.24, слева). Другой канал распада пары глюино — лептон-струйный: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g} + X \rightarrow 4 b\text{-струи} + l^+l^- + q\bar{q}\text{-струи} + 2\tilde{\chi}_1^0 + X$ (рис. 4.24, справа). Здесь и ранее X обозначает все другие вторичные частицы.

В EGRET-области сечение образования пары глюино (посредством глюон-глюонного слияния $gg \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$) в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 14 \text{ ТэВ}$ составляло достаточно большую величину 17,3 пб. Кроме того, в EGRET-области

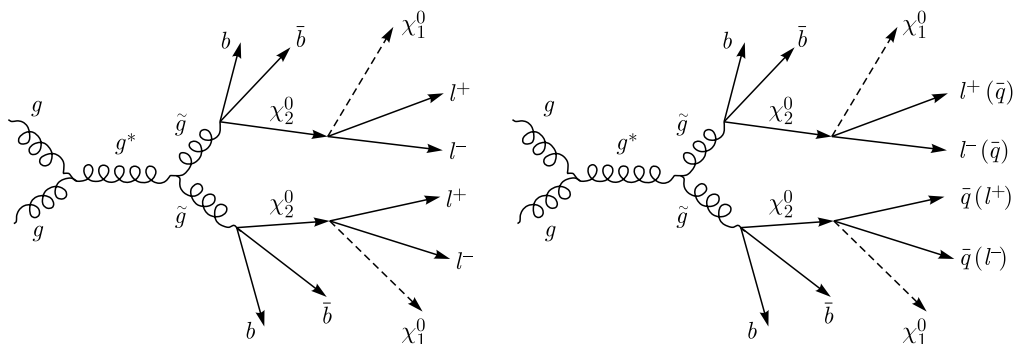


Рис. 4.24. Слева: дилептонный распад $\tilde{g}\tilde{g}$ -пары с образованием четырех b -струй (или четырех вторичных вершин) и двух пар противоположно заряженных лептонов. Два нейтрально, $\tilde{\chi}_1^0$, не детектируются. Справа: лептон-струйный и многоструйный каналы распада $\tilde{g}\tilde{g}$ -пары с четырьмя b -струями, одной парой противоположно заряженных лептонов и парой легких кварков (легких адронных струй). Из [477, 478]

легчайшие нейтралы являлись хорошими кандидатами на роль частиц холодной темной материи и естественным образом объясняли избыток рассеянного галактического гамма-излучения, зарегистрированного космическим аппаратом EGRET. Именно по этим причинам представлялось весьма важным в 2007–2009 гг. понять перспективы изучения данной области SUSY на основе первых данных LHC.

Выделение из фона искомым $\tilde{g}\tilde{g}$ -событий предполагалось осуществлять за счет очень отчетливой сигнатуры, когда продуктами распада каждого из глюино являлась бы одна $b\bar{b}$ -пара, одна или две пары заряженных лептон-антилептонов и одно нейтралы. Достаточно большая величина недостающей поперечной энергии, уносимой двумя стабильными нейтралы, — важная характеристика этих событий, которая позволяла бы в очень сильной форме подавить фоновые события от процессов в рамках Стандартной модели. В частности, было показано, что предложенные отчетливые сигнатуры рассмотренных SUSY-процессов могут дать вполне реальную возможность регистрации глюино при энергиях LHC. Более того, тщательный анализ характеристик рассмотренных событий позволяет, в принципе, определить наиболее предпочтительное в EGRET-области значение mSUGRA-параметра $m_{1/2}$ [477], что крайне важно с точки зрения отнесения данных событий на счет действительно SUSY, а не других возможных моделей за рамками Стандартной модели.

Эти исследования были обобщены на случай лептонных и адронных конечных состояний при распаде двух SUSY-глюино $\tilde{g}\tilde{g}$ [478]. Было показано, что распределения реконструированных инвариантных масс двух противоположно заряженных лептонов (или двух струй от легких кварков), образованных в трехчастичных распадах $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 l^+ l^-$ и $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 q \bar{q}$, обладают специфическим пороговым поведением, которое позволяет оценить разность масс двух нейтралы: $\tilde{\chi}_2^0$ и $\tilde{\chi}_1^0$ (и тем самым параметр $m_{1/2}$).

Действительно, характеристики всех рассмотренных событий позволяют определить наиболее предпочтительное в EGRET-области значение mSUGRA-параметра $m_{1/2}$ (на уровне достоверности более 6σ при статистике данных 300 fb^{-1}) [478].

Итак, усилиями данной группы была предложена новая mSUGRA-область, весьма перспективная для прямого исследования на LHC. В этой предпочтительной с точки зрения эксперимента EGRET-области имели место достаточно большие значения скалярного массового параметра m_0 и достаточно малые значения массового параметра фермионов $m_{1/2}$. Все имеющиеся ускорительные и наблюдательные ограничения были приняты во внимание. Далее, легчайшее нейтралы LSP, будучи наилучшим кандидатом на роль частицы холодной темной материи, естественным образом объясняло избыток диффузных галактических гамма-лучей, наблюдаемых космическим аппаратом EGRET. Кроме того, это LSP очень хорошо соответствовало обнаруженному в эксперименте DAMA эффекту годовой модуляции сигнала, которая является уникальным доказательством прямого наблюдения галактических частиц темной материи. Если бы эксперименты на LHC были столь удачными, что доказали бы существование области EGRET, то в этом случае можно было бы

говорить об одновременном решении двух важнейших проблем — обнаружении SUSY и темной материи. Именно в этом смысле EGRET-область была уникальна и кардинально отличалась от всех других пробных или эталонных областей SUSY, которые исследовались на стадии подготовки экспериментов на LHC.

Исследование EGRET-области было начато с анализа возможности рождения и регистрации пары глюино $\tilde{g}\tilde{g}$ на LHC. Как уже упоминалось, характерная сигнатура их распада (рис. 4.24) — это избыток событий (над предсказаниями Стандартной модели), содержащих $4b$ -кварковых струи, большой недостающий поперечный импульс (энергию) и 2 пары противоположно заряженных лептонов (дилептонный канал распада), или 4 легких кварковых струи (мультиструйный канал), или одну пару противоположно заряженных лептонов и 2 легких кварковых струи (лептон-струйный канал) [469, 477, 478].

Многоструйные каналы распада двух глюино являлись наиболее вероятными, но очень трудными для анализа из-за многочисленных фоновых процессов (КХД и др.). Дилептонный канал распада — почти бесфоновый, но ожидаемое число событий слишком мало, чтобы быть надежно обнаруженным (по крайней мере, на ранней стадии LHC). Наиболее перспективным с точки зрения поиска глюино из EGRET-области был лептон-струйный канал распада глюино. Было показано, что даже при низкой светимости LHC 10 fb^{-1} можно было ожидать (в случае существования таких глюино) примерно 50 сигнальных событий в лептон-струйном канале распада этих глюино (рис. 4.25, слева).

Для того, чтобы сделать заключение об обнаружении SUSY на основе некоторого набора так называемых SUSY-подобных событий, необходимо определить набор SUSY-параметров, который бы описывал все доступные SUSY-подобные наблюдаемые. С этой целью была исследована возможность экспериментального определения предпочтительного в EGRET-области значения параметра $m_{1/2} = 180 \text{ ГэВ}$ и был проведен специальный анализ возмож-

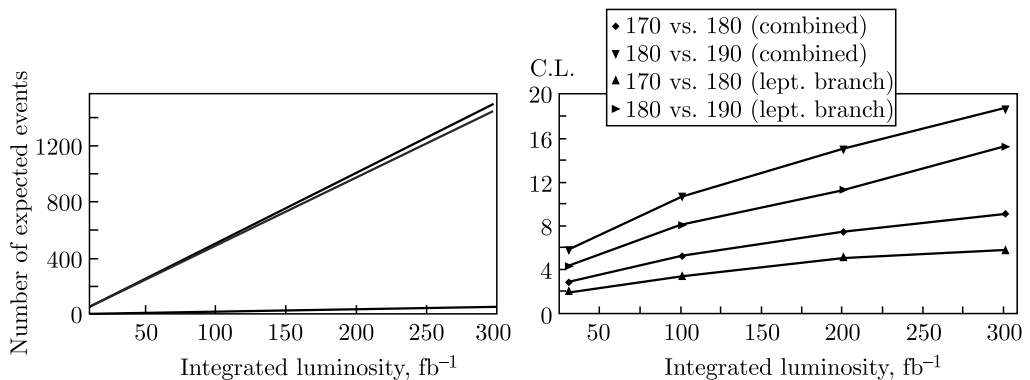


Рис. 4.25. Слева: число ожидаемых лептон-струйных (средняя линия), дилептонных событий (нижняя) и их сумма (верхняя) как функция интегральной светимости LHC для $m_{1/2} = 180 \text{ ГэВ}$. Справа: ожидаемый уровень достоверности для разделения значения параметра $m_{1/2}$ в EGRET-области в зависимости от интегральной светимости LHC. Из [478]

ности отделения на основе данных этого значения от близких ему значений $m_{1/2} = 170$ и 190 ГэВ (рис. 4.25, справа). На уровне достоверности 3σ эти точки можно было бы отделить от $m_{1/2} = 180$ ГэВ за 3 года работы LHC на светимости $10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Совершенно очевидно, что исследование EGRET-области не может ограничиться только процессом рождения двух глюино. Необходимо было расширить данный анализ путем учета новых каналов распада $\tilde{g}\tilde{g}$ -пары, включив распад $\chi_3^0 \rightarrow \chi_2^0 + l^+l^-/q\bar{q}$ с последующим лептонным или адронным распадом χ_2^0 . Кроме того, для открытия суперсимметрии на LHC очень важно было включить в рассмотрение другие доступные для наблюдения SUSY-процессы в EGRET-области, например, значимые процессы рождения пар чарджино-нейтралино.

Именно этими задачами группа тайл-калориметра занималась до 2009 г. Помимо доминирующих каналов образования глюино были дополнительно рассмотрены так называемые слабые каналы образования нейтрино и чарджино [467, 479], которые, распадаясь, давали бы в конечном состоянии несколько энергичных лептонов [469, 480] и/или адронных струй совместно с большой потерянной поперечной энергией (рис. 4.26).

Проведенный в 2007–2008 гг. на уровне генераторов анализ процессов с различным числом заряженных лептонов в конечном состоянии показал (С. Н. Карпов и др.), что «трилептонный» инклюзивный процесс (см., например, рис. 4.26, граф 3) обладает наилучшим соотношением сигнал/фон в EGRET-области. Кроме того, его сечение с учетом распада в конечном состоянии достаточно велико, чтобы его использовать для начального поиска SUSY. Обнаружить надежные указания на наличие SUSY можно было бы уже при средней (10 фб^{-1}) или даже при малой ($1\text{--}3 \text{ фб}^{-1}$) интегральной

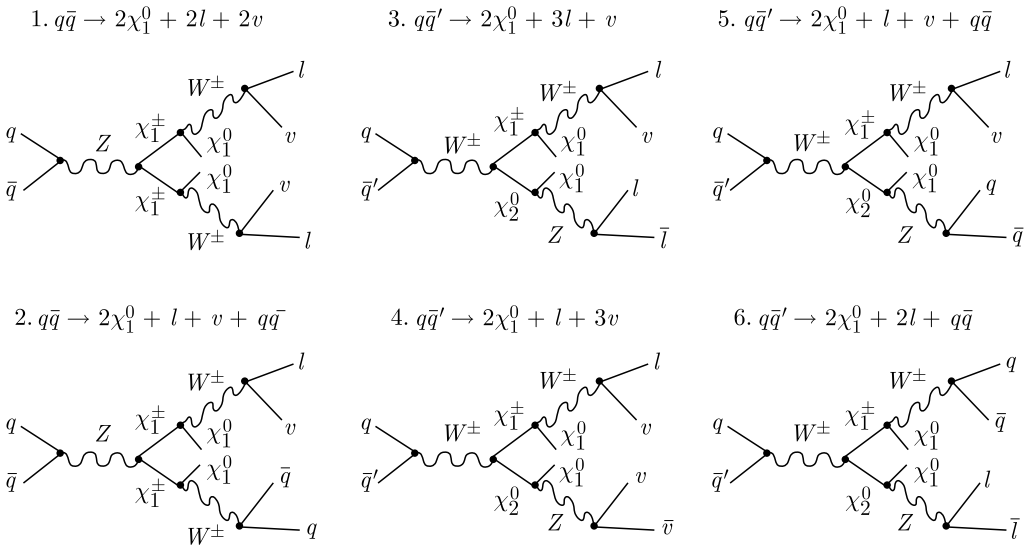


Рис. 4.26. Примеры диаграмм образования нейтрино и чарджино в EGRET-области. Из [467, 478]

светимости LHC. При большой светимости LHC ($100\text{--}300 \text{ фб}^{-1}$) величина сигнала в EGRET-области ожидается достаточной для оценки значения некоторых параметров SUSY.

Напротив, процессы с одним и двумя заряженными лептонами в конечном состоянии (см., например, рис. 4.26, графы 1 и 4) являются менее перспективными для обнаружения SUSY в EGRET-области при малой и средней светимости LHC. Однако они весьма важны для оценки параметров суперсимметрии. Только сравнение нескольких процессов (трилептонного, дилептонного и однолептонного) позволит определить, находятся ли параметры SUSY в EGRET-области или в какой-то другой.

Для надежного выделения сигнала во всех трех случаях необходимо также делать дополнительный отбор событий с использованием отличий их кинематических переменных и фоновых процессов. Это должно существенно улучшить соотношение сигнал/фон. Для получения в каждом из процессов реалистичных значений числа событий, которые могли бы быть зарегистрированы при разной светимости LHC, необходимо было использовать специальное программное обеспечение коллаборации ATLAS. Оно учитывало реальную конфигурацию детектора, эффективность реконструкции треков, погрешности измерения энергии, импульса, угловых переменных и других величин. Помимо этого для оценки эффективности регистрации и правил отбора событий необходимо было выполнить анализ официальных данных коллаборации ATLAS, полученных методом Монте-Карло. Однако до 2009 г. такой набор данных для EGRET-области получить не удалось.

Процессы с более чем тремя лептонами в конечном состоянии ($\rightarrow 4l^\pm, 5l^\pm, 6l^\pm + X$) представлялись бесперспективными для обнаружения SUSY в EGRET-области даже при большой светимости LHC (100 фб^{-1}). Из-за их малого сечения ($< 1 \text{ фб}$) практически невозможно выделить из фона достаточное число сигнальных событий. Скорее всего, эти моды можно будет использовать только для получения вспомогательных ограничений сверху на соответствующие им параметры.

Процессы с распадом калибрино, $\chi_n^{0,\pm}$, на лептоны и кварк-антикварковые пары имеют в несколько раз большую величину произведения сечения на вероятность распада (брэнчинг), чем чисто лептонные процессы. Однако для соответствующих фоновых процессов эта величина также значительно больше. Кроме того, в этом случае добавляются дополнительные источники фона от КХД-процессов. Тем не менее с точки зрения анализа параметров SUSY эти процессы также необходимо принимать во внимание. Их характеристики не должны противоречить величинам, полученным для чисто лептонных мод распада.

Для таких лептон-кварковых мод распада калибрино было выполнено дополнительное исследование в данной группе. Эти работы начаты на основе специально сгенерированного по правилам коллаборации набора данных [481] для изучения перспектив поиска SUSY (в EGRET-области) с помощью установки ATLAS в событиях с одним инклюзивным лептоном и несколькими адронными струями и с большой потерянной поперечной энергией $pp \rightarrow l + 4 \text{ струи} + E_{T_{\text{miss}}} + X$. С помощью Монте-Карло моделирования и специальной методики выделения сигнала путем обрезания фоновых событий

(cut-based method) была продемонстрирована возможность наблюдения сигнала SUSY в этой области.

Полученные наблюдаемые для сигнальных событий (несколько распределений, типичных для поиска SUSY) были сравнены с фоновыми ожиданиями от процессов Стандартной модели и с аналогичными предсказаниями для других реперных точек mSUGRA-модели. Исследование было проведено для энергии 14 и 10 ТэВ с интегральной светимостью 1 и 200 фб⁻¹ соответственно. Было показано, что в EGRET-области величина ожидаемого сигнала в канале $pp \rightarrow l + 4 \text{ струи} + E_{T_{\text{miss}}} + X$ превышала 5σ (3σ) для 14 ТэВ (10 ТэВ) [481].

Результаты этих исследований, а также дальнейшие предложения дубненской группы по учету инклюзивных многоструйных событий (5–8 струй) легли в основу коллаборационной стратегии поиска SUSY при энергии коллайдера 10 ТэВ [482, 483]. Было замечено, что в EGRET-области более предпочтительными являются процессы с одним заряженным лептоном, нейтрино и шестью либо восьмью адронными струями в конечном состоянии. Процессы с меньшим числом струй (в том числе и исследовавшийся ранее канал) имеют меньшую вероятность либо могут возникать вследствие потерь части струй при регистрации и идентификации в детекторе, а также от фона Стандартной модели. Поэтому сотрудниками ОИЯИ было предложено перейти к изучению процессов с более сложной сигнатурой конечных состояний $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g} \rightarrow 2\chi_1^0 + 1l + 1\nu + 6(8) \text{ струй} + E_{T_{\text{miss}}} + X$. Это предложение было сформулировано и представлено С. Н. Карповым на совещании «SUSY ETmiss subgroup meeting» коллаборации ATLAS в Женеве. Была показана перспективность исследования процессов с указанным конечным состоянием при дальнейшем увеличении интегральной светимости ЛHC. Было принято решение о придании этой работе «официального» статуса в рамках рабочей SUSY-группы ATLAS с возложением всей ответственности за нее на сотрудников ОИЯИ.

К сожалению, ни первые данные ЛHC, ни последующие, накопленные за время Run-I, не имели достаточно убедительного числа событий, где бы потерянная недостающая энергия в событиях могла бы быть указанием на сигнатуры «новой» физики за рамками Стандартной модели. Остается ждать и надеяться на Run-II.

4.4.7. Солнце в эксперименте ATLAS. Интересная возможность использовать мюонную систему установки ATLAS «не по назначению» была предложена С. Н. Карповым [484, 485]. Было показано, что потенциально детектор ATLAS может быть использован для изучения космических лучей: в частности, для поиска кратковременных мюонных всплесков, обнаруженных ранее на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) во время мощных солнечных вспышек. Это позволило бы пролить свет на возможную связь таких всплесков с солнечными космическими лучами высокой энергии.

По сравнению с БПСТ благодаря меньшей толщине грунта над детектором ATLAS, а также большей рабочей площади предполагаемый сигнал должен иметь большую амплитуду как в абсолютной величине темпа счета мюонов,

так и в отношении «сигнал/фон». Энергия мюонов, регистрируемых детектором ATLAS, и первичных протонов, породивших эти мюоны в атмосфере, в среднем в 4 раза ниже, чем на БПСТ. В то же время энергия первичных протонов будет в десятки раз больше, чем в случае нейтронных мониторов, используемых обычно для регистрации солнечных космических лучей.

Запуск LHC и установки ATLAS в 2009 г. и последующие несколько лет работы совпали с периодом нарастания солнечной активности, что повышало вероятность обнаружить мюонные всплески от мощных вспышек при условии непрерывной регистрации мюонов космических лучей с фиксацией времени и направлений прихода мюонов к детектору. Решение этой задачи позволило бы определить верхнюю границу и форму спектра солнечных космических лучей при высоких энергиях, что является весьма важным вопросом для целого ряда моделей ускорения и испускания частиц в межпланетную среду во время мощных солнечных вспышек.

4.4.8. Подготовка к исследованию структуры протона. Сектор элементарных частиц (начальник Г. И. Лыкасов) был образован в ЛЯП для разработки физической программы эксперимента ATLAS, а также участия в анализе данных этого эксперимента.

Тесное сотрудничество этого сектора, особенно на начальной стадии, было с дубненской группой тайл-калориметра. В нем родилось несколько оригинальных и важных направлений исследований на LHC. К ним можно смело отнести исследования внутреннего чарма (и бьюти) в протоне, изучение роли глюонных функций распределения, обоснование поиска киральных бозонов, поиск SUSY в событиях с большим числом адронных струй, исследование бозе-эйнштейновских корреляций в области очень больших множественностей, поиск прелестных барионов и т. п.

Глюоны. Вопрос о том, что LHC помимо всем известной роли «фабрики топ-кварков» вполне может быть и полноценной «фабрикой глюонов», был поднят в Дубне достаточно рано, когда было сделано предложение (доклад Д. Бандурина в ЛЯП, 2004 г.) об исследовании возможности измерения на LHC функций распределения глюонов на основе анализа событий типа « γ/Z +струя» [419]. В дальнейшем изучению возможностей измерения глюонных функций распределения в протоне группой Г. И. Лыкасова было уделено значительное внимание.

Так, в 2010 г. инклюзивные спектры адронов, рожденных в pp -столкновениях при высоких энергиях, были исследованы в непертурбативном КХД-подходе на основе кварк-глюонной струнной модели. Помимо традиционного вклада морских кварков в протоне были учтены так называемые неинтегрированные распределения глюонов, которые растут с ростом поперечного импульса глюонов. Учет этого вклада для pp -столкновений привел к предсказанию увеличения инклюзивных спектров адронов и их множественности в центральной области по быстроте, что лучше соответствовало данным [486].

В 2011 г. была предложена новая форма глюонных (неинтегрированных) функций распределения в протоне, которая учитывает зависимость от (небольшого) поперечного импульса партонов и которая применима для описания как полужестких, так и мягких адронных процессов на LHC [487, 488].

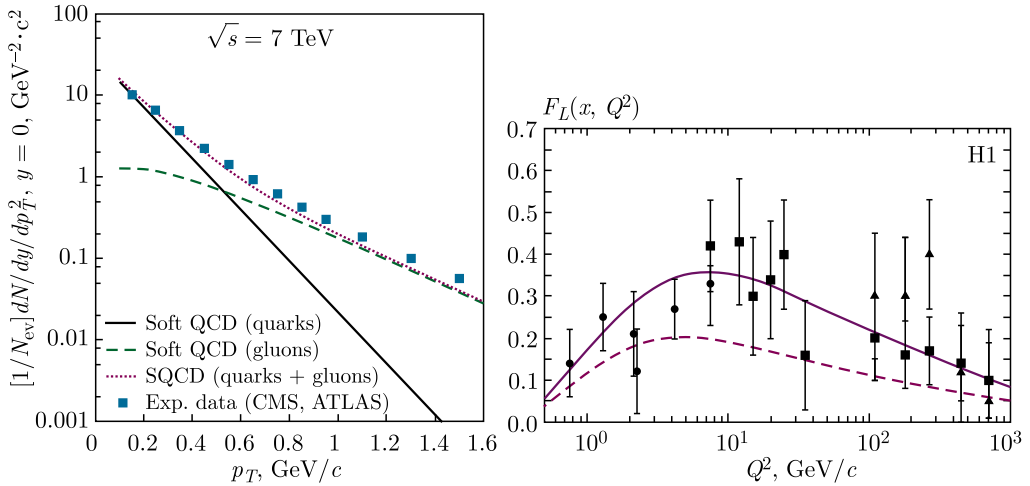


Рис. 4.27. Слева: спектр заряженных адронов, рожденных в pp -соударениях при энергии 7 ТэВ, в зависимости от их поперечного импульса [489–491]. Сплошная кривая — вклад от кварк-кваркового взаимодействия; штриховая — вклад от взаимодействия непертурбативных глюонов; точечная — сумма этих вкладов; квадраты — данные ATLAS и CMS. Справа: Q^2 -зависимость продольной структурной функции при $x \sim 10^{-4}$ [489], которая непосредственно связана с плотностью глюонов. Сплошная кривая — расчет с учетом Q^2 -эволюции глюонной плотности, описывающей данные LHC (приведенные слева); штриховая — расчет без учета Q^2 -эволюции распределения глюонов

Была дана новая интерпретация данных о спектрах заряженных адронов при небольших поперечных импульсах, полученных коллаборацией ATLAS. На основе этих данных была определена форма распределения непертурбативных глюонов в протоне при их малых поперечных импульсах. С помощью предложенной функции распределения был исследован эффект насыщения глюонной плотности при малых переданных импульсах, а также показано, что, анализируя совместно данные LHC в мягкой кинематической области и данные HERA по глубоконеупругому электрон-протонному рассеянию, можно оценить масштаб насыщения распределения глюонов при малых Q^2 (передачах четырехимпульса) [489–491]. На рис. 4.27, слева приведены расчеты суммарного спектра заряженных адронов для энергии LHC и данные ATLAS и CMS при небольших поперечных импульсах этих адронов, а на рис. 4.27, справа — расчеты продольной структурной функции и данные HERA в зависимости от переменной Q^2 [489–491]. Имеется хорошее совместное описание данных LHC в мягкой кинематической области и данных HERA при малых значениях бьеркеновской переменной x .

Теоретические исследования глюонных функций распределения во всей кинематической области продолжены в работах [492–495].

Тяжелые кварки. Впервые в ОИЯИ важность экспериментов на LHC как для определения роли тяжелых кварков в структуре протона, так и для постоянного их мониторингирования была отмечена в работе [496], где был дан краткий обзор процессов лепто- и адророждения очарованных (c) и прелест-

ных (b) кварков при высоких энергиях. Было показано, что существующие теоретические и экспериментальные данные о распределениях очарованных и прелестных кварков в протоне не удовлетворительны. Была предложена процедура для изучения этих распределений при энергиях ЛНС.

В рамках модифицированной модели кварк-глюонных струн (с учетом внутреннего движения кварков в протоне) был выполнен цикл работ, в котором проанализировано рождение очарованных и прелестных адронов. Получены предсказания для процессов мягкого образования прелестных барионов в направлении вперед для столкновения протонов при энергии коллайдера ЛНС. Специально был рассмотрен случай рождения Λ_b -бариона [497–499]. Анализ позволил получить важную информацию о характере траекторий Редже тяжелых b - и \bar{b} -мезонов, а также о форме распределения морских b -кварков в протоне [500–504].

Эти работы показали необходимость обратить особое внимание на роль так называемого внутреннего или скрытого очарования (чарма) и прелести (бьюти) в протоне (см. рис. 4.28 и, например, [505–507]), вклад которых до недавнего времени был ассоциирован только с процессами лепто- и адророждения вперед адронов, содержащих тяжелые c - и b -кварки [508–510].

Поиск внутреннего чарма, странности и бьюти на ЛНС. Согласно предположению С. Бродского [505, 511], есть «внешний» (extrinsic) и «внутренний» (intrinsic) вклады (компоненты) кварк-глюонной структуры протона. Считается, что внешние (или морские пертурбативные) кварки и глюоны «возникают» за счет КХД-динамики (глюонов) на малых временах и обусловлены большими переданными импульсами. Их функции распределения удовлетворяют стандартным уравнениям КХД-эволюции. Вклады внешних кварков $q_{\text{ex}}(x)$ в суммарные распределения существенны главным образом при малых значениях переменной x и исчезают с ростом доли импульса x этих кварков. Они логарифмически зависят от массы тяжелых кварков M_Q , тогда как внутренняя (intrinsic) часть квантового вклада $q_{\text{in}}(x)$ — некая другая часть протонной структуры, не связанная с пертурбативными КХД-процессами глюонного расщепления, практически нулевая при малых x , она доминирует над внешней (extrinsic) компонентой при достаточно больших $x > 0,1$, а также зависит от массы тяжелых кварков в виде $1/M_Q^2$.

Первоначально [505, 511] было предположено существование пятикваркового (типа Фока) состояния в протоне — $|uudc\bar{c}\bar{c}\rangle$, которое включало в себя три валентных uud -кварка и пару очарованных c -, \bar{c} -кварков. Предполагалось, что $c(x) = \bar{c}(x)$ (ВНПС-модель). Однако, в принципе, внутренние кварки и антикварки не обязаны иметь одинаковые формы распределения, в отличие от внешних кварков и антикварков, которые возникают в результате КХД-расщепления глюонов.

Формы $q_{\text{ex}}(x)$ заметно отличаются от $q_{\text{in}}(x)$. Распределения внешних тяжелых кварков, генерируемых глюонами, более мягкие, чем распределения породивших их глюонов, на фактор $\simeq (1-x)$. Наоборот, внутренние тяжелые кварки в протоне $|uudq_{\text{in}}\bar{q}_{\text{in}}\rangle$ доминируют при больших x , и распределения внутренних (тяжелых) кварков похожи на распределения составляющих (валентных) кварков. При этом, как уже отмечалось, допустимо, что

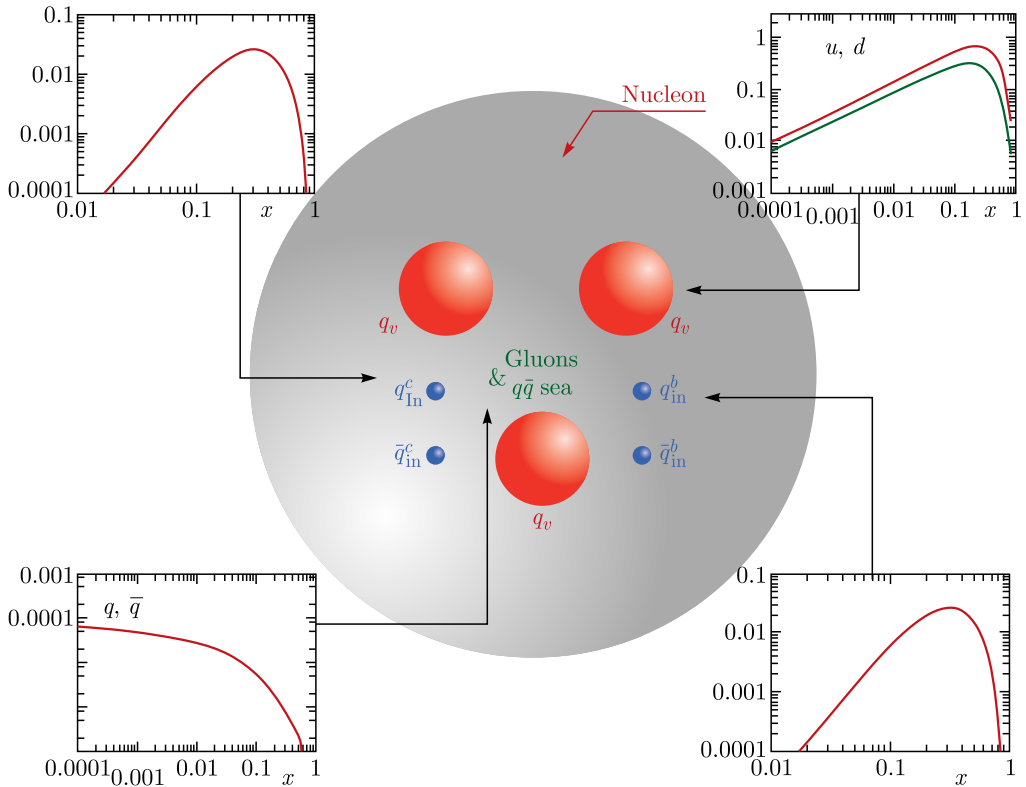


Рис. 4.28. Схематическое представление нуклона в виде трех валентных кварков q_v , кварк-антикварковых пар $q\bar{q}$ и глюонов, а также пар внутренних (intrinsic) очарованных ($q_{in}^c \bar{q}_{in}^c$) и прелестных ($q_{in}^b \bar{q}_{in}^b$) кварков. Справа сверху показан пример формы распределения валентных кварков $u(x)$ и $d(x)$ при $Q^2 = 1,7 \text{ ГэВ}^2$; слева внизу — распределение морских (в том числе очарованных) кварков; слева сверху — валентноподобное распределение для внутреннего очарования и справа внизу — валентноподобное распределение для внутреннего бьюти при тех же Q^2 . Из [506]

$q_{in}(x) \neq \bar{q}_{in}(x)$. Рис. 4.28 схематически показывает нуклон, состоящий из трех валентных кварков q_v , глюонов и внутренних и внешних кварк-антикварковых пар. В принципе, внутренние кварки могут быть как легкими (q, \bar{q}), так и тяжелыми (Q, \bar{Q}). Однако вклад последних доминирует над вкладом первых при больших $x > 0,1$, поэтому интерес обычно представляют именно тяжелые внутренние валентноподобные $Q\bar{Q}$ -пары ($Q = s, c, b$).

Признание того факта, что в условиях ЛНС вылетающие вперед и содержащие тяжелые кварки адроны (лидирующие частицы) — это уникальный источник информации о вкладе валентноподобных компонент тяжелых кварков в структуру протона [509, 510], существование которых пока еще не доказано, но и не опровергнуто, стимулировало сотрудников ЛЯП начать поиск других возможностей для исследования этих структурных компонент нуклона на ЛНС. И такие новые возможности были найдены.

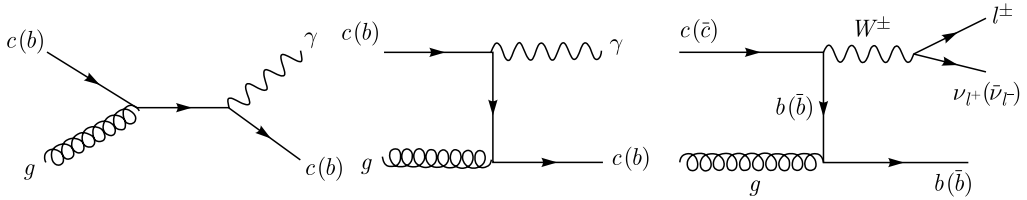


Рис. 4.29. Внутренний тяжелый $c(b)$ -кварк из начального протона в результате жесткого кварк-глюонного подпроцесса $c(b)g \rightarrow \gamma c(b)$ и/или $cg \rightarrow W^\pm b$ переходит в наблюдаемое конечное состояние. Из [512, 513]

Впервые было показано, что образование в pp -столкновениях содержащих тяжелые кварки адронов, которые обладают большими значениями поперечного импульса, тоже является новым источником информации о валентноподобных (внутренних) вкладах тяжелых кварков в структуру протона. На уровне партонов (кварков и глюонов) были найдены элементарные подпроцессы (рис. 4.29), а также выделены соответствующие им сигнатуры конечных состояний pp -взаимодействий, которые оказались наиболее чувствительными к валентноподобным (внутренним) вкладам тяжелых кварков.

В 2013 г. были сформулированы первые новые предсказания для поиска внутреннего чарма и внутренней странности в протоне на LHC. Были сделаны предсказания о возможном наблюдении в эксперименте ATLAS проявления этих экзотических кварковых состояний в протоне (внутреннего чарма) в процессах рождения прямых фотонов или векторных W -бозонов, сопровождающихся образованием c -струй или b -струй соответственно. Были четко сформулированы наиболее оптимальные кинематические области (быстрота–поперечный импульс) для этого поиска [512, 513].

На основе тщательного Монте-Карло моделирования было показано, что учет таких кварковых состояний может увеличить спектры (выходы адронов) по поперечному импульсу p_T фотонов, c - и b -струй, а также лептонов, образующихся от распада W -бозона, в 2–3 раза при больших значениях p_T ($p_T > 100$ ГэВ/ c) по сравнению с расчетами, не учитывающими вклад внутреннего чарма в протоне (рис. 4.30, внизу, зеленая штрихпунктирная кривая), что предполагалось проверить в эксперименте ATLAS. На рис. 4.30 приведены результаты расчетов в рамках КХД с учетом высших поправок (NLO) как в предположении возможного существования вклада внутреннего чарма с вероятностью 3,5 %, так и без учета этого вклада.

Итак, именно в Дубне было обосновано, что коллайдер LHC (при энергии столкновений протонов 7–14 ТэВ) представляет собой еще один уникальный источник новой информации о внутренней (валентноподобной, непертурбативной) компоненте тяжелых кварков в протоне. В частности, теоретический анализ показал, что такие процессы, как $pp \rightarrow \gamma + c(b) + X$, при определенных кинематических условиях являются многообещающими с точки зрения чувствительности к этим внутренним валентноподобным компонентам тяжелых кварков в протоне [514]. Это положило начало циклу работ по поиску и исследованию возможных наблюдаемых, доступных на LHC и способных дать информацию о внутреннем чарме и бьюти в протоне.

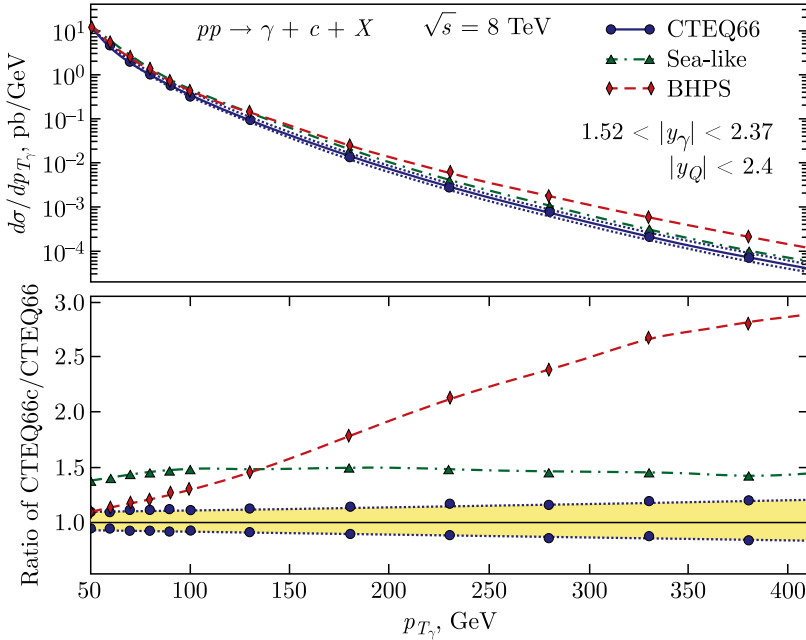


Рис. 4.30. Вверху: распределение по поперечному импульсу фотона $p_{T\gamma}$ из реакции $pp \rightarrow \gamma + c + X$ при 8 ТэВ в интервале быстрот фотона $1,52 < |y_\gamma| < 2,37$ и c -струи $|y_Q| < 2,4$. Синяя сплошная кривая — расчет без учета внутреннего чарма в протоне, красная штриховая — расчет с учетом вклада внутреннего чарма. Внизу: красная штриховая кривая — отношение расчетов с учетом внутреннего чарма (партонное распределение — CTEQ66c) и без его учета (партонное распределение — CTEQ66). Расчеты выполнены в рамках КХД с учетом высших поправок (NLO) в предположении существования вклада внутреннего чарма с вероятностью 3,5%. Из [513]

Было показано, что процессы инклюзивного образования $c(b)$ -струй в сопровождении векторных бозонов типа $pp \rightarrow W/Z + c(b) + X$ и $pp \rightarrow \gamma + c + X$ являются источником важной информации о внутренней валентноподобной компоненте тяжелых кварков в протоне. Помимо этого с целью достижения максимальной чувствительности к величине вклада этой компоненты было предложено использовать отношение дифференциального сечения образования $Z + Q$ -струи к дифференциальному сечению образования $W + Q$ -струи как функцию поперечного импульса струи [515].

Другая очень чувствительная к величине внутреннего чарма в протоне наблюдаемая была предложена в работе [516]. Показано, что отношение сечений $\gamma/Z + c$ и $\gamma/Z + b$, проинтегрированное по $p_T > p_T^{\min}$ с $p_T^{\min} \geq 100$ ГэВ, может быть использовано для определения из данных ЛHC весового коэффициента w (рис. 4.31), ответственного за величину вклада внутреннего чарма как фоковского состояния в протон.

Преимущество использования этого отношения связано с тем, что в нем в значительной мере сокращаются теоретические неопределенности, тогда как эти неопределенности в соответствующих спектрах велики. Именно по этой причине поиск вклада внутреннего чарма в отношении $\sigma(\gamma/Z + c)/\sigma(\gamma/Z + b)$

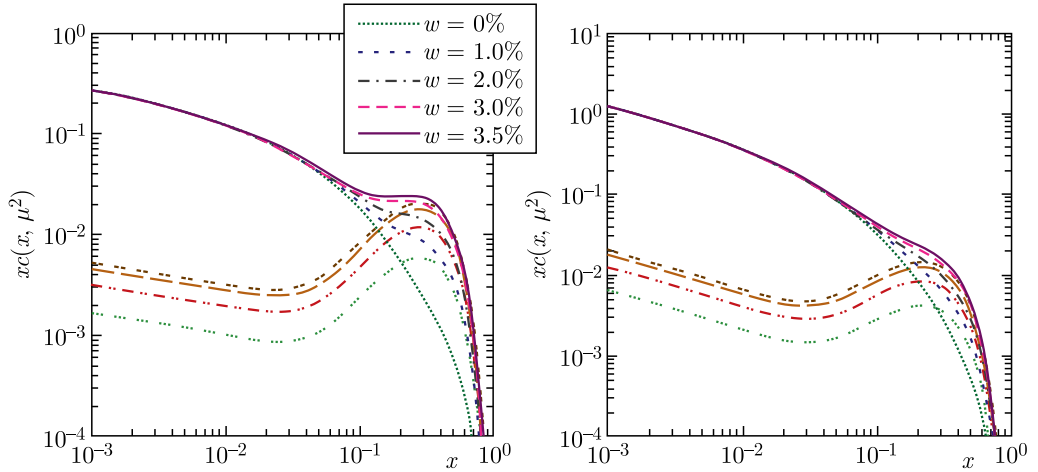


Рис. 4.31. Полная функция распределения плотности очарованных кварков в протоне $x c(x, \mu^2)$ как функция x при различных значениях весового коэффициента w . Слева: $\mu^2 = 10 \text{ ГэВ}^2$. Справа: $\mu^2 = 10^4 \text{ ГэВ}^2$. Из [516]

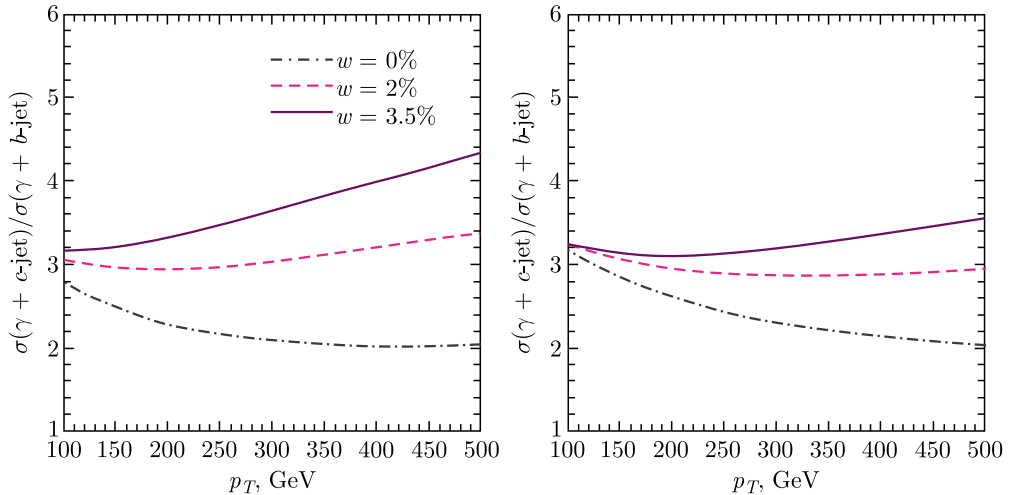


Рис. 4.32. Отношение $\sigma(\gamma + c)/\sigma(\gamma + b)$ как функция поперечного импульса фотона p_T при энергии протонов 8 ТэВ (слева) и 13 ТэВ (справа). Из [516]

представляется более обещающим. При наличии этого вклада (рис. 4.32) это отношение остается примерно постоянным (слегка растущим) при больших поперечных импульсах p_T γ/Z -бозонов и их псевдобыстротах $1,5 < \eta < 2,4$. Если же вклада нет, то это отношение убывает с ростом p_T [516].

В дальнейшем эти исследования распространились на возможности других ускорительных комплексов и детекторов, таких как СВМ, NICA и т. п. [506, 517]. Более того, по результатам проделанной теоретической работы сотрудникам ЛЯП было предложено написать обзор о возможности исследования внутреннего чарма и бьюти в коллайдерных экспериментах («The Physics of Heavy Quark Distributions in Hadrons: Collider Tests») [507].

4.4.9. Новые киральные бозоны. Коллаборацией ATLAS ведется поиск новых киральных аномально взаимодействующих с кварками и лептонами векторных Z^* - и W^* -бозонов [518–521], физическая необходимость и стратегия поиска которых была предложена и всесторонне обоснована физиками ОИЯИ. По существу, эта задача — уникальный вклад ОИЯИ в обширную программу физических исследований на LHC [522]. Действительно, идея о необходимости существования киральных векторных бозонов принадлежит сотрудникам ОИЯИ [518, 519, 523, 524], ими же была сформулирована задача поиска этих объектов на установке ATLAS [525]. Эта задача была принята коллаборацией и выполнена на данных первого периода работы LHC (2010–2013 гг.) под руководством и с решающим участием дубненцев (см. п. 5.2).

В настоящее время продолжают исследования возможностей поиска киральных бозонов в событиях с двумя адронными струями [520, 526–528].

Теоретические предпосылки существования таких киральных бозонов мотивированы классом моделей «новой» физики, связанных главным образом с так называемой «проблемой иерархии» Стандартной модели. Эта проблема порождается неестественно большой разницей в энергетических масштабах электрослабого ($\simeq 10^2$ ГэВ) и гравитационного ($\simeq 10^{19}$ ГэВ) взаимодействий или, иными словами, стабильностью массы бозона Хиггса. Эта стабильность объясняется существованием неких физических механизмов (например SUSY), которые приводят к сокращению радиационных поправок и обуславливают массу бозона Хиггса на уровне $125 \text{ ГэВ}/c^2$.

Одна из возможностей решения проблемы иерархии реализуется в теориях, в которых бозон Хиггса не рассматривается как элементарная частица, например, в моделях составного бозона Хиггса. Нейтральные бозоны типа Z^* и заряженные бозоны W^* в таких теоретических сценариях являются возбужденными состояниями бозонов электрослабого сектора Стандартной модели. Кроме того, как было показано в [519, 520], существование нового типа тяжелых Z^* - и W^* -частиц может быть связано с существованием фундаментальных тензорных квантовых полей. Взаимодействия этих полей с полями материи могут иметь ряд интересных свойств, реализующихся в новых наблюдаемых эффектах, например, изменении киральности участвующих в подобных взаимодействиях частиц. Именно поэтому новые частицы получили название киральных бозонов. Отличительной особенностью этих бозонов является переворот спина взаимодействующих с ними частиц материи (кварков и лептонов), что приводит к уникальной угловой зависимости наблюдаемых величин. Практически во всех таких моделях значения масс киральных бозонов предсказываются в области достижимости LHC. Подтверждение этих новых теоретических идей посредством экспериментального обнаружения рождения бозонов типа Z^* , W^* представляется важным для развития теоретической и экспериментальной физики высоких энергий.

Итак, ключевым свойством нейтральных и заряженных векторных Z^* - и W^* -бозонов является тензорный тип связи с фермионами Стандартной модели, отличающий их от других типов тяжелых бозонов. Например, для

возбужденного кирального Z^* -бозона он схематически имеет вид:

$$L_{\text{excited}}^{Z^*} = \frac{g}{2\Lambda} \bar{\psi} \sigma^{\mu\nu} \psi (\partial_\mu Z_\nu^* - \partial_\nu Z_\mu^*).$$

Здесь g — константа связи $SU(2)_W$ слабой калибровочной группы; Λ — масштаб композитности; ψ — фермионное поле. В известном смысле эти бозоны действительно являются возбужденными состояниями, поскольку только орбитальный момент $L = 1$ дает вклад в полный угловой момент, в то время как суммарный спин системы равен нулю. Это свойство проявляется в их связях через производные с фермионами.

В отличие от минимальной калибровочной связи Стандартной модели, где во взаимодействии участвуют только левые или правые фермионы (рис. 4.33), эти тензорные токи «перемешивают» левые и правые фермионы [518, 520]. Такая связь может быть обоснована на уровне квантовых петель в перенормируемых теориях и представляет собой эффективное взаимодействие Z^* -бозона с фермионами Стандартной модели [524].

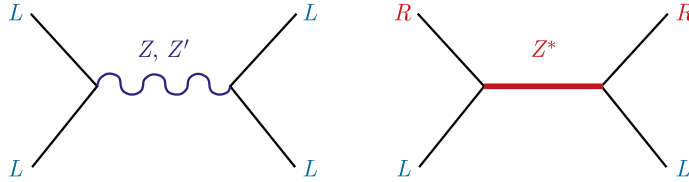


Рис. 4.33. В отличие от обычных бозонов (слева) тензорный характер взаимодействия с киральными векторными бозонами не сохраняет киральность, т. е. перемешивает левые и правые фермионы (справа). Из [518, 520]

Эти возбужденные бозоны, как и бозоны Хиггса, имеют ненулевой киральный заряд, и согласно симметрии Стандартной модели они составляют электрослабый дублет (Z^*W^*) [523] с внутренними квантовыми числами, идентичными дублету бозонов Хиггса:

$$L = \frac{g}{M} (\partial_\mu W_\nu^{*-} - \partial_\nu \bar{Z}_\mu^*) \cdot \bar{D}_R \sigma^{\mu\nu} \begin{pmatrix} U_L \\ D_L \end{pmatrix} + \frac{g}{M} (\bar{U}_L \bar{D}_L) \sigma^{\mu\nu} D_R \cdot \begin{pmatrix} \partial_\mu W_\nu^{*+} \\ \partial_\mu Z_\nu^* \end{pmatrix}.$$

Масштаб композитности Λ здесь выбран равным массе бозона, M , а U и D обозначают верхние и нижние кварки и лептоны. В данном случае экспериментально наблюдать Z^* -бозон можно по его лептонным ($Z^* \rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-$) и кварковым ($Z^* \rightarrow d\bar{d}, s\bar{s}, b\bar{b}$) модам распада. Вероятность распада по каждому из трех лептонных каналов предсказывается для Z^* на уровне 8,3%. При этом резонанс Z^* является узким, значение ширины распада Z^* лежит на уровне 3,4% его (полюсной) массы [518, 520, 521].

По сравнению с другими тяжелыми (калибровочными Z' и W') бозонами переносимое Z^*W^* -дублетом полей взаимодействие оказывается дополнительно подавленным в процессах при низких энергиях малостью отношения импульса к масштабу композитности Λ , поэтому поиск возбужденных бозонов особенно мотивирован для ЛНС и будущих коллайдеров высоких энергий. В публикации М. В. Чижова [523] впервые обсуждались возможности поиска новых киральных бозонов на адронных коллайдерах

(тэватрон и ЛHC). При этом считалось, что массы этих бозонов могут быть оценены из данных прецизионных низкоэнергетических экспериментов, таких как $4,5\sigma$ -рассогласование между измеренным и предсказанным значениями вероятности распада тау-лептона на пионную пару или $3,3\sigma$ -отклонение предсказания от экспериментального значения для аномального момента мюона ($g-2$).

Вторая основополагающая работа в этом направлении появилась в 2008 г. [518], в ней уже был поставлен вопрос о возможности резонансного образования на ЛHC новых киральных бозонов, детектирование которых предлагалось посредством наблюдения специфических особенностей в процессе Дрелла–Яна. Было аргументировано, что нейтральные киральные бозоны могут быть зарегистрированы сначала, как обычно, по брейт-вигнеровскому резонансному пику в распределении инвариантных масс дилептонов. Действительно, как и для других теоретически предсказываемых тяжелых резонансов (Z' -бозонов, G^* -гравитонов, частиц Калуцы–Клейна, технимезонов, квантовых черных дыр и т.д.), возбужденные нейтральные Z^* -бозоны могут быть обнаружены как резонансные пики в распределениях по дилептонной инвариантной массе подобно хорошо известным дополнительным калибровочным Z' -бозонам (рис. 4.34). Дилептонные конечные состояния e^+e^- и $\mu^+\mu^-$ являются наиболее чистыми каналами для поиска тяжелых нейтральных резонансов. Их преимущество заключается в том, что основной неустранимый фон от процесса Дрелла–Яна в области предполагаемого резонансного пика обычно дает вклад на два порядка меньше величины сигнала.

При этом Z^* -бозоны имеют уникальную сигнатуру (дилептонных пар). Во-первых, якобиановский пик отсутствует в распределении по поперечному импульсу. Во-вторых, угловое распределение лептонов в системе Коллинза–Сопера для больших инвариантных масс лептонов под пиком имеет характерную форму «хвоста ласточки» (рис. 4.35). Именно эти особенности в распределениях по поперечным импульсам, углам и псевдобыстротам конечных лептонов позволяют отличить их от других тяжелых нейтральных резонансов.

На рис. 4.35 дано сравнение смоделированных на основании теоретических расчетов распределений по поперечному импульсу и косинусу угла в системе Коллинза–Сопера для лептонов от распада Z' - и Z^* -бозонов.

Как известно, если фермионы, рождающиеся в распадах Z - или Z' -бозонов на «симметричных» pp -коллайдерах в системе центра масс, характери-

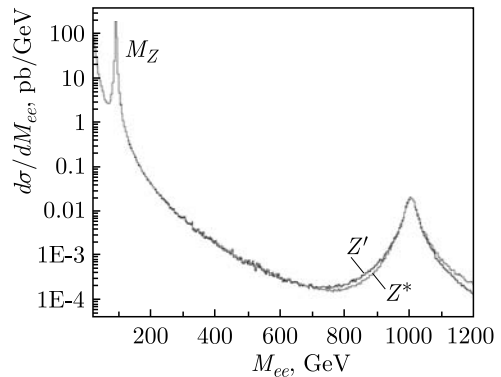


Рис. 4.34. Распределения электрон-позитронных пар, рожденных в pp -столкновениях, по инвариантной массе пары. Показаны ожидаемые пики новых бозонов Z' и Z^* массой 1 ТэВ

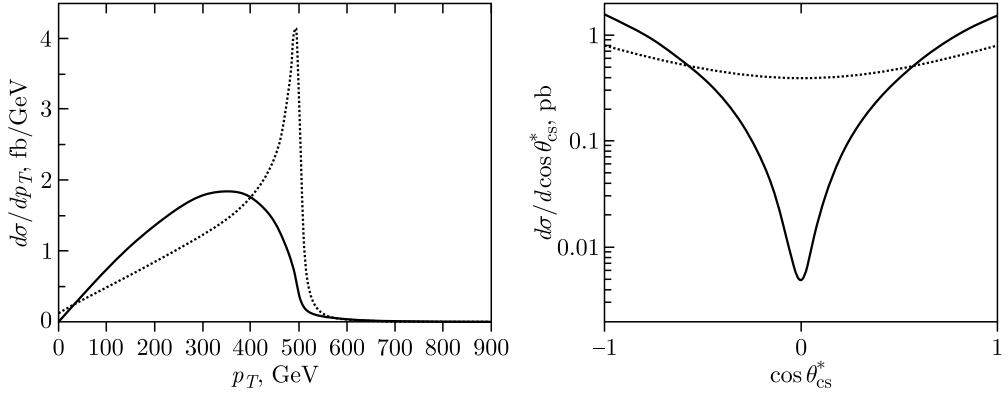


Рис. 4.35. Распределение лептонов распада по поперечному импульсу (слева) и распределение по косинусу угла (справа) между лептонами распада и направлением движения тяжелого бозона в системе покоя последнего (система отсчета Коллинза–Сопера) для Z' -бозонов (пунктирная кривая) и Z^* -бозонов (сплошная) с массой 1 ТэВ/ c^2

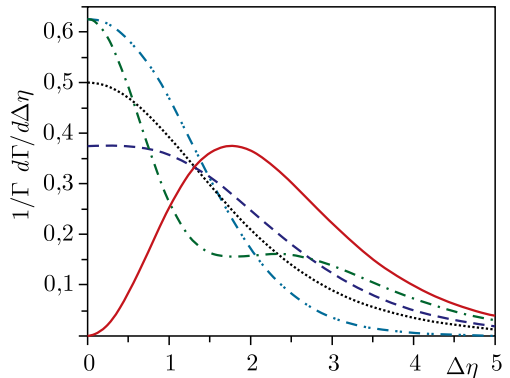
Таблица 4.1. Распределения фермионов в двухчастичных распадах резонансов различного типа по углу их вылета в системе Коллинза–Сопера. Показаны распределения для векторных калибровочных Z -, Z' -бозонов, H — бозона Хиггса, G^* — гравитона Рэндалла–Сандрума, Z^* -бозона

Тип резонанса	Спин	Форма распределения частиц распада
Z, Z'	1	$1 + \cos^2 \theta$
H	0	1
$q\bar{q} \rightarrow G^*$	2	$1 - 3 \cos^2 \theta + 4 \cos^4 \theta$
$gg \rightarrow G^*$		$1 - \cos^4 \theta$
Z^*	1	$\cos^2 \theta$

зуются угловыми распределениями вида $d\sigma/d\cos\theta \sim (1 + \cos^2\theta)$, то киральные Z^* -бозоны, описываемые тензорным взаимодействием, дают угловые распределения фермионов в конечном состоянии вида $d\sigma/d\cos\theta \sim \cos^2\theta$, где θ — угол рассеяния между пучком и разлетающимися фермионами [520]. В табл. 4.1 показаны угловые распределения фермионов распада для различных типов нейтральных резонансов. По существу, введение частиц типа Z^* -бозона завершает полноту этой таблицы. Более того, продукты распада возбужденных бозонов обладают ранее не исследованной формой углового распределения, что позволяет применить новую стратегию их поиска как в лептонной [528], так и в адронной моде [527] их распада.

С точки зрения экспериментальной физики высоких энергий одной из удобных для изучения угловых характеристик лептонов распада является разность их псевдобыстрот. Полезным свойством этой переменной в коллайдерных экспериментах является ее постоянство при преобразованиях Лоренца вдоль оси пучков. Распределения по этой переменной в распадах различных типов нейтральных бозонов (массой 1 ТэВ/ c^2), полученные путем теоретических вычислений, показаны на рис. 4.36. Резонанс типа Z^* -бозона характеризуется уникальным распределением по разности псевдобыстрот лептонов —

Рис. 4.36. Распределение по разности псевдобыстрот между лептонами распада для бозонов с массой $1 \text{ ТэВ}/c^2$. Штриховая кривая — Z -, Z' -бозоны спина 1; пунктирная — резонансы спина 0, такие как бозон Хиггса; штрих-пунктирные линии — резонансы спина 2 (G^* -гравитон), рождающиеся в столкновениях кварков (зеленая) и глюонов (голубая); сплошная линия — разность псевдобыстрот лептонов в распадах Z^* -бозонов



в отличие от других типов резонансов, которые имеют максимум при $\Delta\eta = 0$, он исчезает при этом значении и имеет максимум при $\Delta\eta = \ln(3 + \sqrt{8}) \approx 1,76$. В системе покоя резонанса это число соответствует углу $\theta = 45^\circ$ между направлением вылета двух конечных фермионов и направлением начального пучка. Таким образом, в случае экспериментального обнаружения нового резонанса характерные особенности кинематических распределений позволят отличить Z^* -резонанс от тяжелых скалярных и векторных бозонов даже при небольшой статистике обнаруженных событий.

Фон от процессов Дрелла–Яна Стандартной модели (обмен γ и Z -бозоном) концентрируется главным образом в центральной области $\Delta\eta \approx 0$ и может быть подавлен путем введения ограничения типа $\Delta\eta > \Delta\eta_{\min} \approx 1,0$, которое слабо действует на сигнал от Z^* -бозона. Это замечательное свойство позволяет увеличить эффективность поиска пика кирального резонанса и осуществить его идентификацию по дилептонному каналу [528].

Продолжение исследований этого свойства привело к тому, что в работе [526] было обращено внимание на возможность обнаружения проявлений «новой» физики в двухструйных событиях, образованных в результате адронных столкновений. Принято считать, что практически все модели «новой» физики предсказывают, что эти две струи, будучи продуктами распада экзотического состояния, «населяют» центральную по быстрой области, т. е. значения их быстрот $y_{1,2} \sim 0$. Распады же возбужденных Z^* -бозонов на две струи не дают вклад именно в эту область. Наличие таких бозонов приводит к избытку двухструйных событий по отношению к практически постоянному в терминах $\chi = \exp|y_1 - y_2|$ фону КХД как раз вне этой области. При определенном выборе параметров такое поведение приводит к провалу в центральной области распределения по инвариантной массе двух струй, в то время как основная часть экзотических моделей, наоборот, предсказывает наличие горба в этой области (рис. 4.37). Поэтому необходимо внимательно отнестись к вопросу оптимального выбора кинематических ограничений, используемых обычно для подавления вклада фоновых процессов [528].

После работы [518] в ОИЯИ начались систематические исследования возможностей поиска киральных Z^* -бозонов на ЛНС. В 2009 г. сотрудниками ОИЯИ на базе сгенерированного по правилам коллаборации набора данных был проведен анализ возможности регистрации нового нейтрального Z^* -бозо-

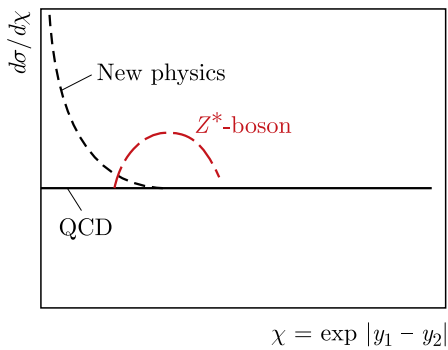


Рис. 4.37. Схематическое изображение различия вкладов «новой» физики, КХД и нейтрального кирального бозона в распределение двухструйных событий по переменной $\chi = \exp |y_1 - y_2|$

на на установке ATLAS. Был построен генератор событий для инклюзивного pp -образования Z^* -бозона с распадом последнего на электрон-позитронную пару ($pp \rightarrow Z^* \rightarrow e^+e^-$), и получены предварительные результаты для оценки чувствительности детектора ATLAS к этому процессу на базе полного моделирования детектора [525]. Впоследствии эти работы были завершены несколькими коллаборационными публикациями [529–534] (см. также п. 5.2).

Были исследованы перспективы поиска экзотических киральных бозонов на ЛНС и будущих коллайдерах сверхвысоких энергий [535]. На рис. 4.38 приводятся оценки экспериментальной чувствительности для более высоких энергий (супер-ЛНС и др.) при различных интегральных светимостях.

В частности, во втором сеансе работы ЛНС возможно обнаружение Z^* -бозона с массой до $5,3 \text{ ТэВ}/c^2$ или до $6,2 \text{ ТэВ}/c^2$ в варианте сверхвысокой светимости. При сверхвысокой энергии столкновений (33 ТэВ) возможно обнаружение вдвое более тяжелых бозонов при той же интегральной светимости [535, 536].

В работе [537] было замечено, что если расширить скалярный сектор Стандартной модели за счет дополнительных хиггс-подобных дублетных состояний, то объединение калибровочных констант можно получить на масштабе $5 \cdot 10^{13} \text{ ГэВ}$. В результате эти скалярные степени свободы в виде киральных векторных Z^* - и W^* -бозонов вполне могут быть наблюдаемыми

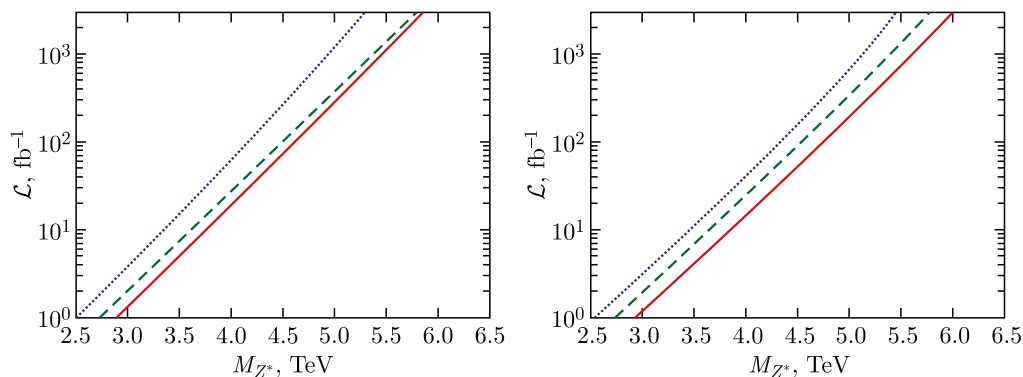


Рис. 4.38. Потенциал обнаружения (слева) и исключения (справа) Z^* -бозонов на основе данных pp -столкновений с энергией 13 ТэВ . Показана необходимая для обнаружения или исключения существования Z^* -бозона интегральная светимость столкновений в канале с двумя мюонами (пунктирная линия), двумя электронами (штриховая) и в комбинации димюонного и диэлектронного каналов (сплошная). Из [535]

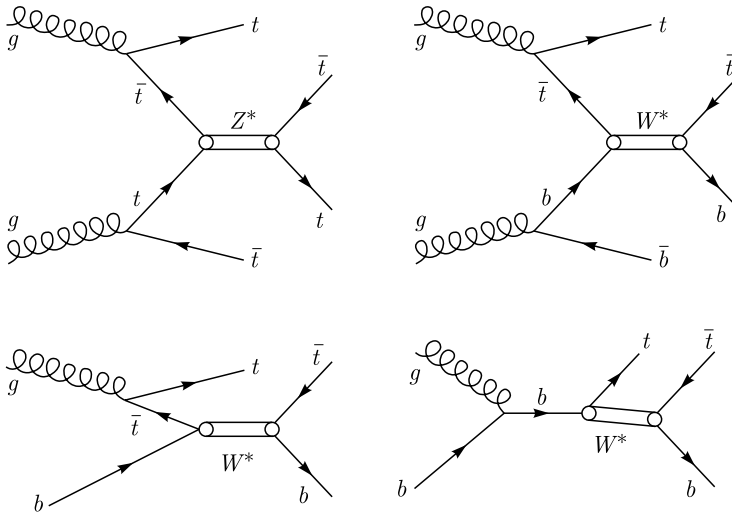


Рис. 4.39. Новые каналы pp -рождения и распада киральных бозонов (на тяжелые кварковые состояния $t\bar{t}t\bar{t}$, $t\bar{t}b\bar{b}$ и $t\bar{t}b$), пригодные для экспериментального поиска на следующих этапах работы LHC. Из [537]

на масштабе порядка 1 ТэВ. «Предпочтительная» связь киральных бозонов именно с тяжелыми кварками, с одной стороны, объясняет их ненаблюдение на первом этапе работы LHC (Run-I), а с другой — оставляет надежду на их возможное обнаружение в каналах с тяжелыми кварками (рис. 4.39) на втором (Run-II) и последующих этапах работы LHC [537].

Итак, следует подчеркнуть, что обоснование возможности и необходимости поиска на установке ATLAS киральных векторных бозонов — это заслуга именно сотрудников ОИЯИ и их заметный вклад в фундаментальную программу физических исследований на LHC [522]. На этапе Run-I эта задача была выполнена под руководством дубненцев. В настоящее время исследования продолжают, и мы надеемся на новые интересные результаты.

4.4.10. Поиск и идентификация дополнительных бозонов, гравитонов и т. п. Исследования возможности использования так называемой асимметрии «центр–край» [538] для идентификации проявлений дополнительных нейтральных Z' -бозонов, пространственных измерений и других эффектов в процессах типа Дрелла–Яна на LHC начались в ОИЯИ в 2005 г. с доклада А. А. Панкова (Гомель, Белоруссия) [539]. Процесс адронного рождения гравитона G (спин 2) и его последующий распад на электронную пару на партонном уровне описываются двумя подпроцессами — аннигиляцией кварков и слиянием глюонов: $q\bar{q} \rightarrow \gamma, Z, G \rightarrow e^+e^-$, $gg \rightarrow G \rightarrow e^+e^-$. В Стандартной модели процесс адронного рождения электронных пар определяется преимущественно механизмом Дрелла–Яна $q\bar{q} \rightarrow \gamma, Z \rightarrow e^+e^-$.

Асимметрия центр–край A_{CE} представляет собой удобную наблюдаемую величину, которая позволяет определять спин массивного нейтрального резонанса по угловым характеристикам двух заряженных лептонов от его распада.

Она определяется как отношение сечений [538, 540]:

$$A_{\text{CE}} = \frac{\sigma_{\text{CE}}}{\sigma}, \quad \text{где} \quad \sigma_{\text{CE}} \equiv \left[\int_{-z^*}^{z^*} - \left(\int_{-1}^{-z^*} + \int_{z^*}^1 \right) \right] \frac{d\sigma}{dz} dz \quad \text{и} \quad \sigma \equiv \int_{-1}^1 \frac{d\sigma}{dz} dz.$$

Здесь σ_{CE} — разность сечений в центральной и крайней областях, а σ — полное сечение, $z = \cos \theta_{\text{cm}}$ и θ_{cm} — угол вылета лептона по отношению к направлению движения протона в системе центра масс лептонной пары. Далее, z^* — кинематический параметр, который делит область изменения $-1 \leq z \leq 1$ на центральную и крайнюю, причем $0 < z^* < 1$.

В Стандартной модели (где есть только γ -фотон и Z -бозон, спин 1) имеем $A_{\text{CE}}^{\text{CM}} = \frac{1}{2}z^*(z^{*2} + 3) - 1$. Откуда $A_{\text{CE}}^{\text{CM}} = 0$, если параметр z^* равен $z_0^* = (\sqrt{2} + 1)^{1/3} - (\sqrt{2} - 1)^{1/3} \simeq 0,596$, что соответствует углу $\theta_{\text{cm}} = 53,4^\circ$. Для промежуточной частицы со спином 2 (гравитон G) угловые распределения лептонов существенно отличаются от распределений в Стандартной модели и A_{CE} имеет сложную зависимость от z^* , в результате которой $A_{\text{CE}}^{\text{ADD}} \neq 0$ в точке $z^* = z_0^*$. Таким образом, отклонение $A_{\text{CE}}^{\text{ADD}}$ от $A_{\text{CE}}^{\text{CM}}$ будет указывать на обмен промежуточными состояниями невекторного типа, например, тензорными (скалярными) бозонами (рис. 4.40). В этом состоит главная привлекательность асимметрии центр–край при анализе характеристик дилептонных процессов. Наличие адронной структуры сталкивающихся протонов несколько усложняет ситуацию.

В 2005 г. была образована небольшая группа, которая начала практически заниматься вопросом возможности регистрации и идентификации гравитонов (частиц со спином 2) на установке ATLAS с помощью асимметрии центр–край. В течение трех лет (2006–2009 гг.) был проведен ряд моделирований установки (быстрое, а затем и полное моделирование с использованием ATHENA) и учтено влияние установки ATLAS на возможность использования предложенной наблюдаемой. Был сделан цикл докладов на рабочих совещаниях дубненской группы [542].

В 2010 г. совместно с белорусскими коллегами был опубликован заключительный анализ этой проблемы [541], в котором полностью завершено исследование перспективы обнаружения и определения природы тяжелых

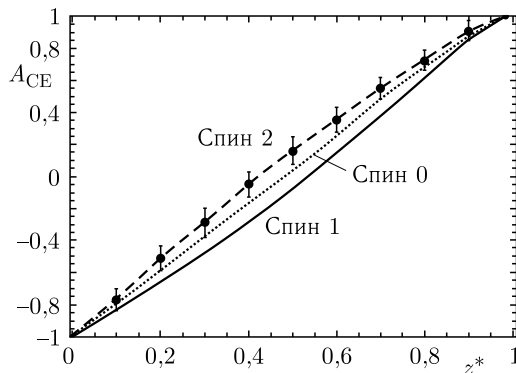


Рис. 4.40. Асимметрия центр–край как функция z^* для скалярных, векторных и тензорных резонансов с массой $1,5 \text{ ТэВ}/c^2$. Вертикальные штрихи на кривой гравитонного резонанса со спином 2 указывают 1σ -статистические неопределенности для асимметрии центр–край при интегральной светимости 100 фб^{-1} . Из [541]

гравитонных резонансов в их распадах на e^-e^+ -пару в эксперименте ATLAS. В качестве примера были рассмотрены гравитоны в модели с дополнительными пространственными измерениями Рэндалл–Сандрума. Для идентификации спина гравитона был выполнен сравнительный анализ эффектов новых тяжелых резонансов с разными спинами — скалярных (суперсимметричное снейтрино), векторных (новый калибровочный Z' -бозон) и тензорных (гравитон). Идентификация гравитонов выполнена с помощью интегральной асимметрии центр–край. Были определены максимально достижимые на LHC значения масс гравитонов, необходимые для обнаружения (идентификации) гравитонов, составляющие $2,1 \text{ ТэВ}/c^2$ ($1,2 \text{ ТэВ}/c^2$) и $3,9 \text{ ТэВ}/c^2$ ($2,9 \text{ ТэВ}/c^2$) при уровне достоверности 5σ (95 %) для констант связи гравитонов, равных $k/M_{\text{Pl}} = 0,01$ и $0,1$ соответственно. Проведенный анализ является наиболее общим, так как в нем впервые учтена возможность существования скалярных резонансов, что может значительно влиять на количественные оценки порогов идентификации [541].

Эти исследования были продолжены в совместных работах по вопросу о прецизионном измерении угла смешивания $Z-Z'$ и его влиянии на вероятность адронного рождения W -бозонов [543–545], по поиску и идентификации дополнительных пространственных измерений в образовании фотонных и лептонных пар на LHC [540].

В результате проведенного многопланового исследования было показано, что тяжелые резонансы, существование которых предсказывается моделями, выходящими за рамки Стандартной модели, могут быть обнаружены одними из первых на LHC. Процесс Дрелла–Яна, описывающий адронное рождение лептонных пар, является одним из наиболее эффективных каналов поиска новых промежуточных состояний благодаря сильной подавленности фоновых процессов и высокой эффективности идентификации лептонных пар. Это же во многом относится и к процессу адронного рождения фотонных пар. Если тяжелый резонанс будет обнаружен в лептонном канале, например, в виде пика (или плеча) в распределении по инвариантной массе лептонной пары, то следующим шагом в исследовании природы резонансного состояния будет определение его спина. Идентификация спина осуществляется с помощью двух наблюдаемых величин — полного резонансного сечения и асимметрии центр–край. Более того, в противоположность полному резонансному сечению асимметрия центр–край позволит разделять эффекты от резонансов с разными спинами во всей разрешенной области пространства параметров. Приведенные количественные результаты по определению порогов идентификации гравитона основаны на наиболее общем анализе резонансных эффектов по сравнению с ранее выполненными исследованиями, так как, помимо векторных, дополнительно учитывают возможность существования скалярных резонансов [546].

5. РОЛЬ ОИЯИ В ПОЛУЧЕНИИ ГЛАВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ATLAS (RUN-I)

После того как детектор ATLAS был создан и успешно введен в эксплуатацию (2009 г.), главной задачей ОИЯИ стало получение на нем новых физических результатов (а также участие в обеспечении бесперебойной работы всех подсистем установки ATLAS).

В этот период (2009–2014 гг.) — совпавший по времени с первым этапом (Run-I) набора, обработки и анализа данных при энергии сталкивающихся пучков 7 и 8 ТэВ (с.ц.м.) — деятельность сотрудников ОИЯИ сводилась к следующим основным направлениям. Первое — обработка данных и получение физических результатов, на основе которых также были уточнены характеристики работы подсистем детектора. Далее, ОИЯИ успешно выполнил свои обязательства по обеспечению штатной работы детектора ATLAS (участие в сменах в комнате управления, суточное дежурство экспертов по отдельным подсистемам и другие эксплуатационные и сопутствующие работы, такие, как контроль качества данных, обеспечение работы компьютерных, в том числе Грид, структур коллаборации). Кроме того, ОИЯИ начал работы по модернизации установки ATLAS и коллайдера LHC. Были определены основные направления этой деятельности, в результате чего был предложен и утвержден отдельный проект именно по участию ОИЯИ в модернизации установки ATLAS в рамках единой темы Проблемно-тематического плана ОИЯИ.

5.1. Участие в запуске, наладке и эксплуатации LHC и установки ATLAS

Сотрудники физических отделов ЛФВЭ ОИЯИ внесли заметный вклад в успешный запуск (2009 г.) экспериментальных установок ALICE, ATLAS и CMS. Нельзя не отметить тот уникальный факт, что сотрудники ускорительного отделения ЛФВЭ также проявили себя с самой лучшей стороны и фактически обеспечили как успешный запуск, так и устойчивую работу всего Большого адронного коллайдера LHC.

Действительно, в совместном проекте ЦЕРН–ОИЯИ была разработана, создана и внедрена аппаратура для демпфирования когерентных бетатронных колебаний (в диапазоне частот от 3 кГц до 20 МГц) сгустков протонов в LHC [547, 548]. Эта система подавления колебаний (рис. 5.1) обеспечивала стабильность пучка при инъекции, ускорении и в режиме столкновений при рекордной энергии пучков, высокой интенсивности и расчетной частоте следования сгустков.

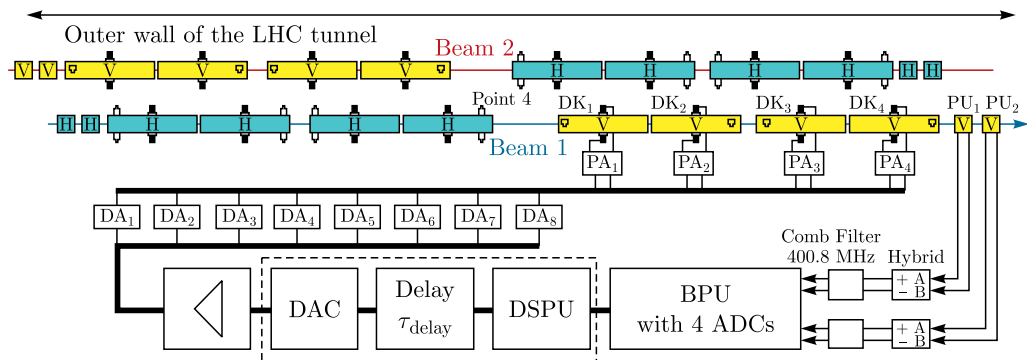


Рис. 5.1. Схематический вид системы подавления колебаний (LHC Damper) и блок-схема подсистемы обратной связи для мониторингирования вертикальных колебаний. Из [547]

К 2006 г. в ОИЯИ и на российских предприятиях (в рамках Соглашения ЦЕРН–Россия–ОИЯИ) в полном объеме было осуществлено проектирование и изготовление входящих в эту систему 20 электростатических дефлекторов и 20 мощных широкополосных усилителей (рис. 5.2). Окончательная сборка и наладка усилителей и дефлекторов была выполнена в ЦЕРН в 2007 г. В результате успешного завершения работ по запуску всей системы подавления поперечных колебаний были достигнуты параметры, полностью соответствующие спецификациям LHC [548].

Профессор В. П. Саранцев (ОИЯИ) в 1991 г. был инициатором предложения об участии коллектива дубненских специалистов под руководством И. Н. Иванова (заместителя директора ЛСВЭ) в создании системы подавления когерентных колебаний пучка в LHC. Профессор Д. Боусард и профессор Т. Линнекер выбрали ОИЯИ в качестве единственного партнера ЦЕРН в этом проекте [549]. В 1996 г. проект был включен в перечень работ, проводимых в рамках соглашений ЦЕРН–Россия–ОИЯИ.

На Всероссийской ускорительной конференции в Звенигороде (2008 г.) первый официальный доклад по запуску данной системы был сделан руководителем работ с дубненской стороны В. М. Жабицким [550, 551]. Итоги работы этой аппаратуры во время Run-I LHC были доложены руководителем работ из ЦЕРН (В. Хёфль) на международной ускорительной конференции [552], где был особенно отмечен вклад группы ОИЯИ.

В 2010 г. группа, в состав которой входили Е. В. Горбачев, В. М. Жабицкий, Н. И. Лебедев, А. А. Макаров, Н. В. Пиляр, С. В. Рабцун (ОИЯИ), В. Хёфль, Р. Луерс, Э. Монтесинос, Д. Валух (ЦЕРН), была удостоена первой премии ОИЯИ в области научно-методических работ за «создание и запуск мощных устройств системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка в LHC».

Написанный руководителем этой группы В. М. Жабицким обзор «Динамика пучка в синхротронах с цифровыми широкополосными системами подавления когерентных поперечных колебаний заряженных частиц» [553] в 2014 г. был отмечен премией Международной академической издательской

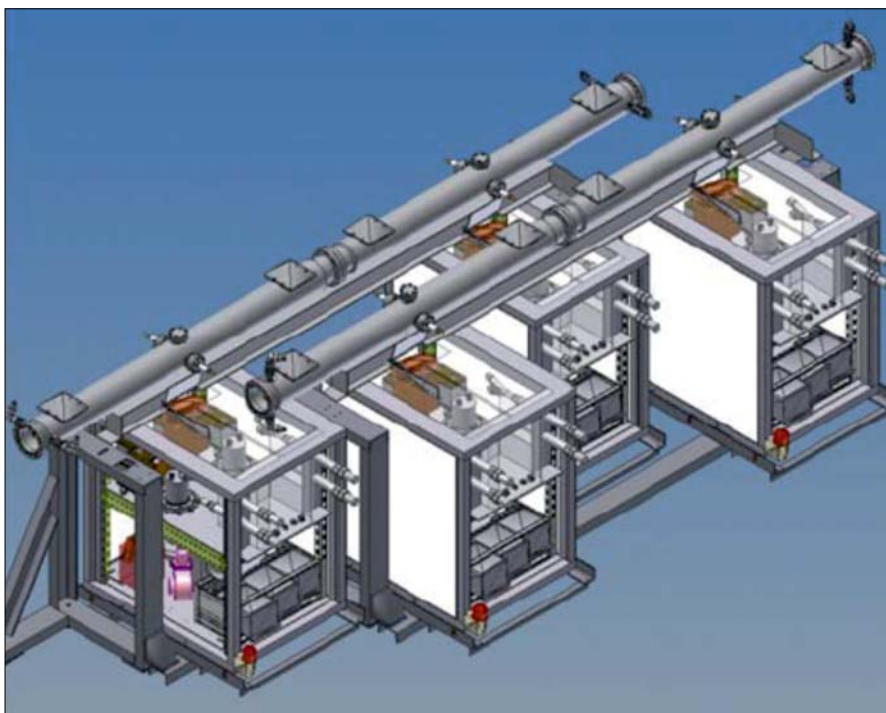


Рис. 5.2. Вверху: дефлекторы и мощные усилители системы подавления в туннеле ускорителя LHC. Внизу: общий вид модуля системы подавления для циркулирующих пучков (4 дефлектора и 4 мощных усилителя). Из [548]

компании «Наука/Интерпериодика» за лучшую публикацию в издаваемых ею журналах.

Значимость обсуждаемых результатов невозможно переоценить, они, будучи логическим следствием многолетней работы в этом направлении сотрудников ускорительного отделения ЛФВЭ (см., например, [549, 554–558]), гарантировали стабильную работу LHC на всем протяжении Run-I и обеспечили решение главной задачи этого этапа — обнаружение бозона Хиггса.

5.1.1. Эксплуатация жидкоаргонового калориметра ATLAS. На всем протяжении работы установки ATLAS сотрудники сектора «Физика на ATLAS» ЛФВЭ успешно выполняли принятые на себя обязательства по обеспечению стабильной и бесперебойной работы жидкоаргонового калориметра ATLAS. Эти обязательства включали в себя ремонт и отладку электронных блоков, мониторинг качества работы каналов считывания, участие в сеансах в качестве экспертов по вызову (expert-on-call) и «HEC local expert», а также участие в сменах в контрольной комнате ATLAS во время работы LHC.

Вклад сотрудников ЛФВЭ в эксплуатацию детектора ATLAS, в разработку и внедрение соответствующего компьютерного обеспечения, а также в физическую программу эксперимента был уже представлен выше и изложен во многих публикациях [60, 70, 213, 559–561].

В дополнение к этому А. А. Солошенко в рамках рабочей группы Tau Combined Performance коллаборации занимался вопросом разработки алгоритмов для он-лайн реконструкции, идентификации и энергетической калибровки тау-лептонов, распадающихся на адронные конечные состояния. Разработанные алгоритмы были использованы в наборе данных 2012 г. при энергии 8 ТэВ [562]. Эти работы впоследствии послужили основой для запуска и наладки системы реконструкции тау-лептонов установки ATLAS при энергии протонных столкновений 13 ТэВ [563, 564].

5.1.2. Эксплуатация тайл-калориметра ATLAS. На этапе создания установки ATLAS сотрудники ЛЯП отвечали за производство мюонных камер (п. 3.5), производство и монтаж поглотителя баррельной части тайл-калориметра (п. 3.3), проведение расчетов магнитных полей (п. 3.8), разработку и установку программного обеспечения (п. 3.6) и ряд других вопросов.

После запуска установки ATLAS одной из главных задач ЛЯП стало обеспечение бесперебойной работы тайл-калориметра. С 2009 по 2014 г. сотрудник лаборатории И. А. Минашвили и С. Немечек (Прага) являлись основными ответственными за поддержание в рабочем состоянии (Maintenance) этого калориметра (рис. 5.3). Оба они выполняли работу так называемых экспертов по вызову (по системе контроля детектора), дежурство которых осуществляется по целым неделям. Кроме того, И. А. Минашвили отвечал в группе тайл-калориметра за организацию дежурств в главной комнате управления (control room) установкой ATLAS.

В здании 175 ЦЕРН под руководством И. А. Минашвили осуществлялась проверка и наладка электроники считывания тайл-калориметра. Там же под его руководством усилиями сотрудников ОИЯИ выполнялась настройка, мо-



Рис. 5.3. Руководитель коллаборации ATLAS Дэйв Чарлтон и председатель совета коллаборации Говард Гордон и награжденные ATLAS Outstanding Achievement Award 2015 И. А. Минашвили и С. Немечек

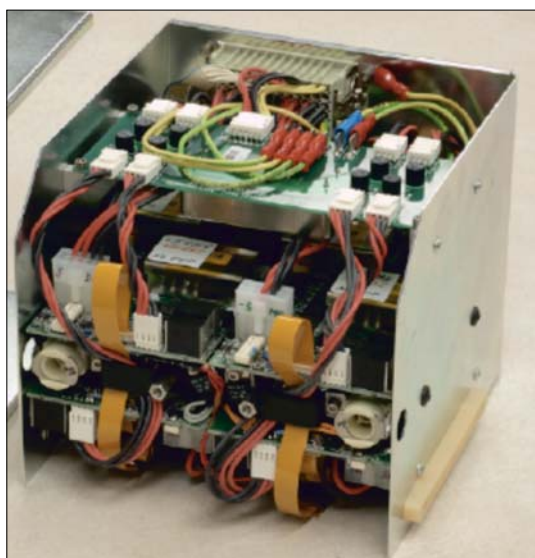


Рис. 5.4. Внешний вид модуля источника низковольтного питания fLVPS (finger Low Voltage Power Supply)

дернизация и паспортизация модулей низковольтного питания (fLVPS) электроники фотоумножителей (рис. 5.4).

В зоне ответственности ОИЯИ находился вопрос разработки новой аппаратуры для монтажа элементов калориметра и постоянная работа по ремонту, наладке и сертификации элементов fLVPS [140, 565–567]. Были проведены различные калибровки модулей калориметра с различными типами fLVPS, а также отработана процедура тестирования элементов и их наладки во время периодов остановки работы детектора.

Помимо этого в здании 175 проводились работы с тестовым фрагментом калориметра (Slice of TileCal), который полностью соответствует тем, что расположены под землей в реальном детекторе ATLAS. Постоянный контроль за этим фрагментом, его калибровки, исследования его поведения и т.п. позволяли прогнозировать характер работы соответствующих элементов тайл-калориметра под землей в условиях реального эксперимента. Еженедельно проводились рабочие совещания группы эксплуатации тайл-калориметра, на которых оперативно решались возникавшие проблемы [568].

Для обеспечения надежного функционирования тайл-калориметра сотрудники ОИЯИ участвовали в модернизации аппаратуры контроля и диагностики работы электроники калориметра и осуществляли техническую поддержку работы всего детектора ATLAS [67, 69, 144]. Они участвовали в сменах по набору экспериментальных данных и в процедурах проверки качества первичных экспериментальных данных (Data Quality validation), набираемых на адронном тайл-калориметре.

Группе сотрудников ОИЯИ в ЦЕРН было доверено участвовать в ремонте и наладке калориметра, в замене элементов питания в шахте ATLAS и запуске калориметра после остановки ускорителя. Для обеспечения геометрического контроля адронного калориметра ATLAS ОИЯИ участвовал в разработке и запуске как самой аппаратуры, так и ее математического обеспечения.

На всем протяжении Run-1, с целью правильного определения энергетических и временных параметров восстановления данных, сотрудники ОИЯИ принимали участие в проведении сеансов калибровки тайл-калориметра ATLAS тремя различными способами: с помощью специализированного подвижного цезиевого ($Cs-137$) гамма-источника, методом инъекции заряда, а также с помощью лазерной системы (рис. 5.5). В частности, в последнем случае была изучена работа соответствующей электроники считывания и обнаружена ее высокая стабильность (вариации были меньше 0,6%). Был развит метод корректного вычисления калибровочных констант, учитывающий вариации сигналов с различных фотоумножителей. Определены точности определения этих констант для различных частей тайл-калориметра и т.п. [569].

Группа сотрудников ОИЯИ (рук. Ю. А. Кульчицкий) выполнила E/p -калибровки (см. п. 3.4) калориметра на основе сгенерированного набора minimum-bias событий. Полученный опыт позволил в дальнейшем провести электромагнитную и адронную калибровки калориметрического комплекса на реальных событиях. В частности, была отработана процедура электромагнитной калибровки тайл-калориметра с использованием одиночных заряженных адронов, образованных в событиях с minimum-bias триггером или с распадом тау-леп-

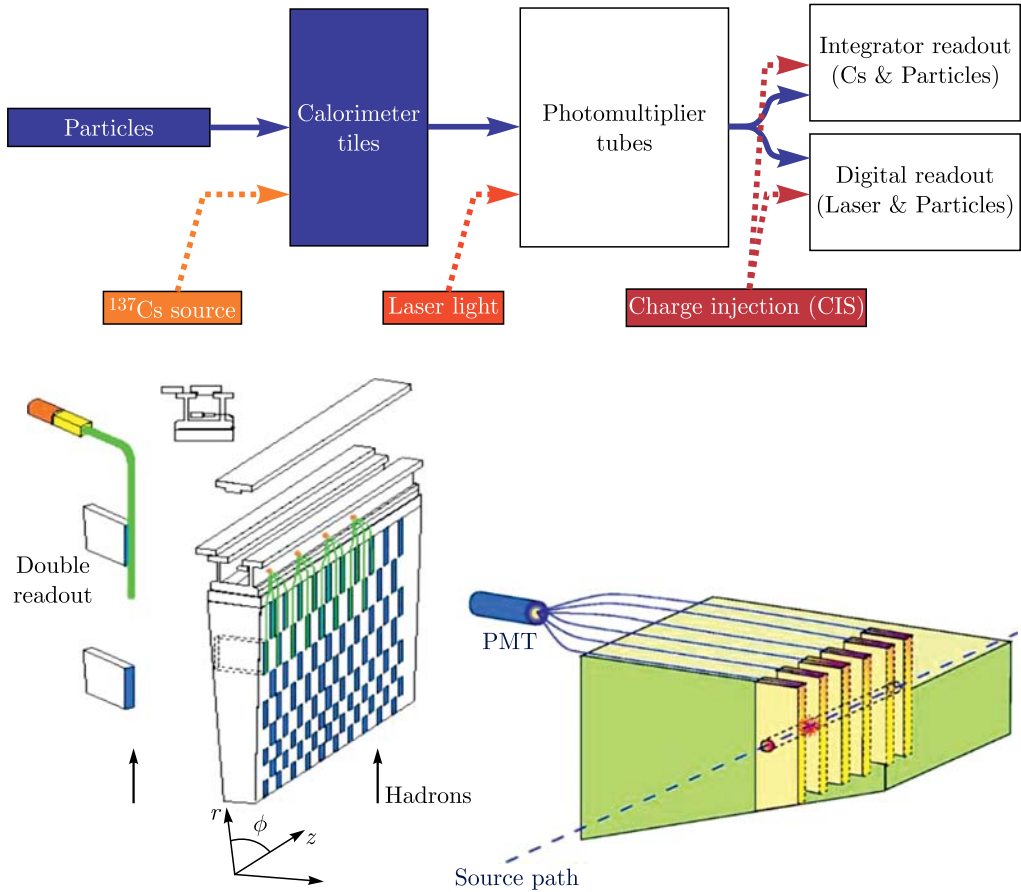


Рис. 5.5. Три системы калибровки тайл-калориметра ATLAS. Система инъекции заряда (CIS) калибрует ADC. Лазерный луч контролирует отклики ФЭУ. Использование движущегося цезиевого источника (внизу) позволяет калибровать весь «оптический путь» от пластин сцинтилляторов и WLS-фибров до окончательных сигналов с ФЭУ

тонов в адронной моде, а также in-situ адронная E/p -калибровка калориметрического комплекса с использованием одиночных заряженных адронов и т. п. (см., например, [67, 69, 192, 570]).

Помимо этого в 2010 г. с участием Е. В. Храмова было проведено детальное Монте-Карло исследование отклика тайл-калориметра на электроны и пионы, а также проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными результатами комбинированного теста калориметра, выполненного в 2004 г. на пучке H8 ускорителя SPS в ЦЕРН. Был вычислен важный параметр тайл-калориметра (sampling fraction) как для отдельно взятого калориметра, так и в комбинированной конфигурации. Наблюдалось осциллирование отклика на электроны и пионы из-за изменения этого параметра (sampling fraction variation). Эффект оказался значительно меньше для пионов, чем для электронов, более того, этот эффект был в значительной мере подавлен в слу-

чае полноценной конфигурации ATLAS по сравнению со случаем отдельно взятого тайл-калориметра [571].

С. Н. Карпов принимал участие в моделировании и валидировании отклика тайл-калориметра ATLAS. Им было исследовано и улучшено качество прохождения оптических и электрических сигналов, доказана их адекватность на реальных данных [572].

Итак, адронный тайл-калориметр — это важнейшая часть детектора ATLAS. Как отметил О. В. Соловьянов, он показал отличную работоспособность и высокое качество работы во время Run-I и Run-II коллайдера LHC. В частности, система постоянной калибровки тайл-калориметра позволила хорошо контролировать его энергетический масштаб. ОИЯИ играл и продолжает играть существенную роль в работе, поддержке, анализе характеристик и модернизации тайл-калориметра детектора ATLAS [147].

5.1.3. Обеспечение радиационной безопасности. Сотрудники ОИЯИ, значительное время находящиеся в ЦЕРН, приняли участие в работе группы обеспечения безопасности работы всей установки ATLAS, направленной на определение радиоактивной дозы, которая может быть получена рабочими в подземной зоне во время остановки и наладки детектора ATLAS.

Важен постоянный (с 2009 г.) вклад физиков ОИЯИ (В. Ю. Батусова, С. Н. Малюкова, М. Шияковой и др.) в обеспечение дежурства в главной комнате управления ATLAS в качестве руководителей группы дежурных по обеспечению безопасности работы детектора, так называемых Shift Leader in Matter of Safety (SLIMOS). Между коллаборацией ATLAS и ОИЯИ была достигнута специальная договоренность о совместном обеспечении этих работ.

Помимо дежурства в качестве начальника смены по вопросам безопасности В. Ю. Батусов принимал непосредственное участие в анализе видео и других материалов (As Low As Reasonably Achievable (ALARA)), записанных в ходе технической остановки коллайдера LHC. Эти записи были осуществлены с целью оценки тех радиационных доз, которые участники коллаборации могли бы получить, работая в подземном экспериментальном зале ATLAS в течение технической остановки LHC. Результаты такого анализа важны для правильного планирования работ в экспериментальном зале в периоды больших (Long Shutdown) остановок ускорителя LS1 (2013–2014 гг.), LS2 (2018–2019 гг.) и LS3 (2023–2025 гг.). На основании почти 600 часов записей различных технических операций и использования результатов моделирования радиационных полей программой FLUKA была рассчитана радиационная доза, получаемая при выполнении каждой операции для трех больших остановок ускорителя. В связи со значительно большей дозой, которую получают работники в период LS2 и особенно LS3, были предложены варианты оптимизации выполнения некоторых работ, в основном вблизи пучковой трубы коллайдера.

Итак, практически на всем протяжении Run-I (2009–2014 гг.) сотрудники ОИЯИ принимали участие в регулярных дежурствах-сменах в главной комнате управления установкой ATLAS (ЦЕРН). В зоне ответственности ОИЯИ были такие подсистемы, как адронный тайл-калориметр и жидкоаргоновый калориметр, мюонная система, система контроля качества данных DAQ, внут-

ренный детектор, а также система радиационной безопасности. О работах сотрудииков ЛИТ в этом направлении было рассказано в пп. 3.6 и 3.7.

5.1.4. Прецизионный лазерный инклинометр — продукт эксперимента ATLAS. Этот прибор представляет собой первый в мире двухкоординатный угловой сейсмограф, позволяющий измерять микросейсмическую угловую активность поверхности Земли. В основе его работы лежит запатентованная сотрудниками ЛЯП (Ю. А. Будаговым, М. В. Ляблиным) идея [573] об измерении угла наклона поверхности путем регистрации смещения положения пятна отраженного от жидкости лазерного луча (рис. 5.6).

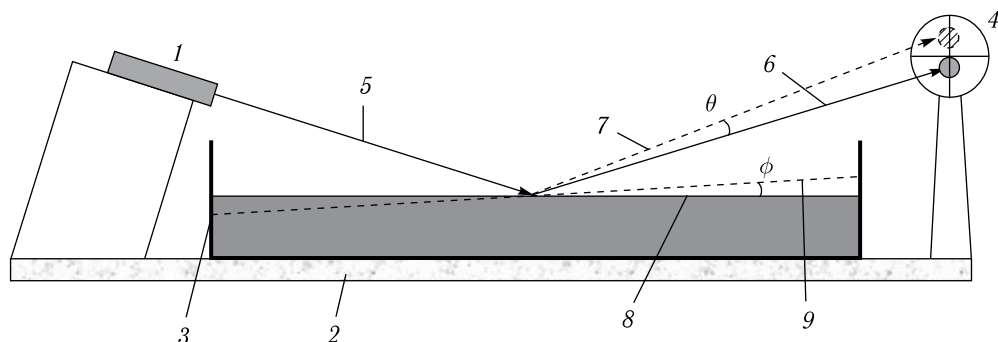


Рис. 5.6. Схема устройства для измерения угла наклона: 1 — лазер; 2 — основание; 3 — кювета с жидкостью; 4 — позиционно-чувствительное фотоприемное устройство; 5 — лазерный луч; 6 — отраженный лазерный луч; 7 — лазерный луч, смещенный относительно первоначального положения; 8 — начальное положение поверхности жидкости; 9 — положение поверхности жидкости после наклона основания. Из [573]

Эта замечательная идея родилась в рамках долгосрочного и плодотворного участия сотрудников ОИЯИ в разработке и обслуживании контрольно-измерительной аппаратуры эксперимента ATLAS. Она возникла благодаря большому опыту, накопленному во время организации производства как сцинтилляционных детекторов для CDF-мюонного триггера, так и модулей адронного тайл-калориметра установки ATLAS.

Прецизионный лазерный инклинометр (ПЛИ) открыл новые возможности в регистрации угловых колебаний поверхности Земли сейсмического происхождения за промежутки времени от нескольких суток до долей секунд с самой высокой чувствительностью $0,1$ нрад/Гц^{1/2} [198].

Промышленный (профессиональный) экземпляр ПЛИ (рис. 5.7) был первоначально создан в ЛЯП ОИЯИ [574], а в 2015 г. был передан в ЦЕРН для усовершенствования и совместного исследования эффективности прибора в вопросе мониторингования стабильности пучков ЛНС по программе ЦЕРН «Высокая светимость ЛНС» (HL-LHC).

Информация, полученная с ПЛИ, позволяет создавать сейсмоизолированные исследовательские платформы нового поколения [575]. Эти платформы крайне востребованы для производства прецизионных электронных компонентов, стабилизации современных крупномасштабных физических устано-



Рис. 5.7. Прецизионный лазерный инклинометр. Январь 2017 г.

вок, таких как коллайдеры (LHC, CLIC), гравитационные антенны (VIRGO, LIGO), большие телескопы [197].

Хорошо известно, что ускорители, и особенно коллайдеры, претендующие иметь высокую светимость, могут сильно страдать от колебаний земной поверхности любого происхождения. Наиболее «опасными» в этом смысле являются землетрясения, а в ряде случаев невозможно избежать также влияния сейсмозумов промышленного происхождения (взрывов, обвалов и т. п.).



Рис. 5.8. Ю. А. Будагову премию им. В. П. Джелепова за «развитие и создание уникальной лазерно-метрологической системы для измерения угловых колебаний поверхности Земли» вручают директор ОИЯИ В. А. Матвеев и главный ученый секретарь ОИЯИ Н. А. Русакович

ПЛИ способен отслеживать вибрации поверхности Земли с высокой точностью. Сравнение их с колебаниями орбиты ЛНС показали, что ПЛИ «видит» землетрясение раньше, чем орбита ЛНС начинает колебаться. При этом обнаруженные ПЛИ колебания коррелируют с потерями пучка на коллиматорах и колебаниями светимости. Таким образом, было показано, что землетрясения могут полностью «гасить» пучок HL-LHC [576].

Качество ПЛИ-мониторинга может быть заметно увеличено за счет когерентной работы нескольких правильно откалиброванных [577, 578] ПЛИ-устройств, установленных в туннеле ЛНС. Такая совокупность устройств вполне может обеспечить активную обратную связь и, например, вовремя сигнализировать операторам ЛНС о приближении большого землетрясения, предотвращая тем самым незапланированные «сбросы пучка».

Кроме того, данные с ПЛИ позволяют определять зоны накопления сейсмической энергии, что очень важно для раннего предсказания самих землетрясений [579].

За разработки, связанные с прецизионным лазерным инклинометром, их руководитель Ю. А. Будагов в 2016 г. был удостоен премии ОИЯИ им. В. П. Дзелепова (рис. 5.8).

Итак, в тесном сотрудничестве ОИЯИ, эксперимента ATLAS и ЦЕРН не только был разработан совершенно новый инструмент, но и было проведено исследование возможности мониторинга и «обратного», регулирующего воздействия его на коллайдер высоких энергий. Как сказал один из руководителей этих работ Б. Ди Джироламо (ЦЕРН), «этот прибор — пока еще ребенок, шаг за шагом идущий в блестящее будущее» [576].

5.2. ОИЯИ в анализе данных эксперимента ATLAS

Сразу после запуска коллайдера ЛНС в 2009 г. и начала штатной эксплуатации установки ATLAS дубненская группа приступила к работе с экспериментальными данными. На их основе сначала было выполнено несколько «локальных» попыток получения физических результатов, которые имели, скорее, образовательное значение и не дошли до стадии коллаборационных публикаций. Они очень кратко описаны ниже. Более подробно обсуждаются результаты ОИЯИ, в той или иной мере вошедшие в официальные публикации коллаборации ATLAS.

5.2.1. «Локальные» физические результаты группы ОИЯИ раннего этапа. На основе данных 2010 г. в ЛЯП был выполнен поиск заряженного экзотического Θ^+ -бариона, состоящего из пяти кварков, по моде его возможного распада на протон и нейтральный каон. Был проанализирован набор данных, полученных при энергии 7 ТэВ во время периодов светимости А, В и С (примерно 76 млн событий типа minimum-bias). Нейтральный каон был идентифицирован с помощью его двухчастичного V0-подобного распада на заряженные пионы, а протоны были идентифицированы посредством измерения потери энергии во внутреннем детекторе ATLAS. Не удалось обнаружить никакого узкого резонансного состояния в ожидаемой области инвариантных

масс протона и каона, в отличие от хорошо наблюдаемых пиков известных частиц — $K^{*+}(890)$, Λ - и $\Lambda(1520)$ -барионов [580, 581].

В 2010 г. на основе первых minimum-bias данных с установки ATLAS сотрудниками ОИЯИ были проведены поиск и идентификация $\rho(770)$ - и $\varphi(1020)$ -мезонов, образованных в столкновениях протонов LHC при 7 ТэВ [582, 583]. Поиск $\varphi(1020)$ -мезонов проводился на основе их распадов на два заряженных каона на основе данных, накопленных во время первых месяцев работы ускорителя LHC (с энергией протонов 3,5 ТэВ и светимостью примерно 405 мкб^{-1}). Эти каоны были идентифицированы путем измерения потерь энергии во внутреннем пиксельном детекторе треков установки ATLAS. Для фитирования данных были использованы различные подходы. Все они показали, что измеренные параметры $\varphi(1020)$ -мезона (масса и ширина) находятся в согласии с мировыми данными [582, 584] (см. также [585]).

Интерес к оценке массы $\rho(770)$ -мезона, образованного в pp -столкновениях на LHC, был вызван тем, что в то время значение массы этого мезона (определяемое по $\rho^0(770) \rightarrow \pi^+\pi^-$) в адронных процессах оказывалось систематически заниженным по сравнению с его значением, получаемым при рождении ρ -мезона в e^+e^- -процессах. Более того, эта «адронная» масса ρ -мезона зависела как от его поперечного импульса, так и от множественности сопровождающих его рождение частиц [586]. Сотрудниками ОИЯИ был проведен весьма кропотливый анализ, однако результаты получились неоднозначными и довести этот анализ до коллаборационной публикации так и не удалось [583, 587].

В ноябре 2010 г. начался сеанс работы LHC на ионах свинца при уникальной энергии 2,7 ТэВ на нуклон. В 2011 г. группа ОИЯИ (рук. В. Н. Поздняков) приняла участие в проведении сеансов набора данных и их анализе с целью исследования взаимодействий тяжелых ионов на установке ATLAS. В результате обработки Pb–Pb (свинец–свинец) данных 2010 г. было найдено несколько сотен *ультрапериферических столкновений* типа гамма–гамма и гамма–ядро с выходом димюонных пар, которые содержали вполне различимый сигнал от распада J/ψ -мезонов [588, 589]. Образование мюонных пар в ультрапериферических ядерных (двухфотонных и фотон-померонных) взаимодействиях было исследовано уже более подробно на основе данных 2011 г. (светимость $0,14 \text{ нб}^{-1}$) [590]. В результате были получены оценки для сечений процессов $AA \rightarrow AA + \gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ (при $2 < W_{\mu\mu} < 12 \text{ ГэВ}$) и $AA \rightarrow AA + \gamma\gamma \rightarrow J/\psi$ на уровне 13 и 1,1 мб соответственно. Было измерено дифференциальное сечение фоторождения J/ψ при $1,5 < y < 2,5$ (рис. 5.9), среднее значение которого согласуется с результатами, приведенными в [591].

На тех же свинец–свинец «ультрапериферических» данных 2011 г. (интегральная светимость $0,14 \text{ нб}^{-1}$) был проведен анализ образования двух заряженных треков (частиц) в событиях, отобранных ZDC-триггером. С помощью генератора событий STARLIGHT эти данные были скорректированы с учетом величины аксептанса и эффективности триггера детектора ATLAS. В результате были получены оценки дифференциальных сечений фоторождения J/ψ -мезонов (при быстроте J/ψ менее 2,5), сопровождающегося электромагнитной диссоциацией рассеянных ионов [592].

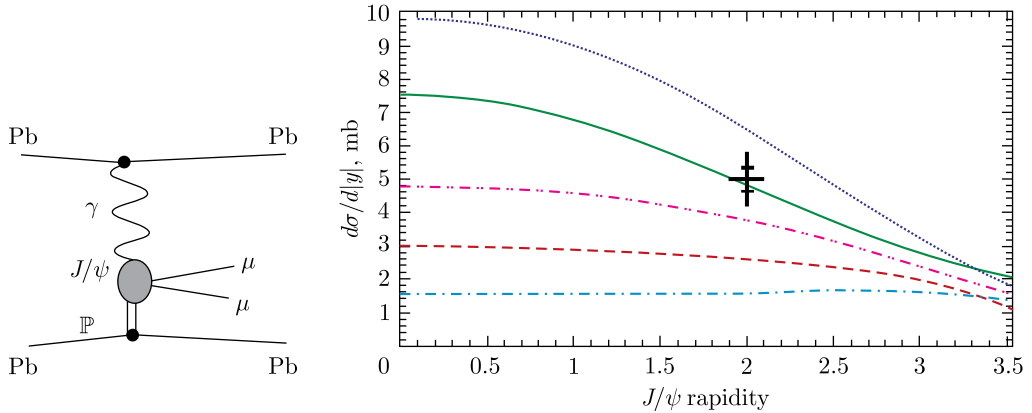


Рис. 5.9. Слева: схема процесса образования J/ψ -мезона. Справа: оценка дифференциального сечения фоторождения J/ψ -мезона (крест) вместе с результатами теоретических вычислений [591]. Из [590]

Работа коллаборации в этом направлении [590] готовится к публикации. Для завершения анализа необходимо провести соответствующие моделирования, определить из данных эффективности триггера и т. п.

Помимо этих результатов, проведенный в Дубне предварительный анализ «ультрапериферических» данных 2011 г. (интегральная светимость $0,14 \text{ нб}^{-1}$) на предмет поиска четырех заряженных треков в конечном состоянии позволил впервые наблюдать на ЛHC реакцию $\gamma\gamma \rightarrow \rho + J/\psi$, т. е. эксклюзивное образование пары мезонов $\rho + J/\psi$ в $\gamma\gamma$ -столкновениях [593].

Этой же группой была предпринята попытка определения полной светимости, набранной на установке ATLAS во время сеанса столкновений тяжелых ионов в 2011 г. Оценки были выполнены на основе анализа мюонных пар, образованных за счет чисто электромагнитного (и хорошо вычисляемого) двухфотонного взаимодействия, возникающего в ультрапериферических Pb–Pb столкновениях на ЛHC при энергии 2,76 ТэВ [594]. Достаточно точное знание этой светимости позволило бы определить абсолютные значения сечений ряда таких процессов, как $\gamma\gamma \rightarrow \rho + J/\psi$ и $AA \rightarrow AA + J/\psi$.

В 2010 г. участники группы ОИЯИ (А. А. Солошенко, И. Л. Писарев и др.) приступили к поиску *заряженного бозона Хиггса* по его возможному распаду на три заряженных лептона в конечном состоянии [428, 595]. Эти лептоны, в свою очередь, — продукты распада суперсимметричных частиц чарджино и нейтралино: $H^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_{1,2}^\pm \tilde{\chi}_{1,\dots,4}^0 \rightarrow 3 \text{ лептона} + E_{\text{miss}}$, на которые заряженный бозон Хиггса способен распадаться в рамках минимальной суперсимметричной Стандартной модели (MSSM). Данный канал распада предоставляет возможность обнаружить заряженный бозон Хиггса в той области пространства параметров модели, которая недоступна распадам на частицы Стандартной модели. Рассматриваемый распад предполагает, что заряженный бозон Хиггса имеет достаточно большую массу (не менее $250 \text{ ГэВ}/c^2$) и образуется совместно с топ-кварком.

В распаде бозона Хиггса на чарджино и нейтралино рассматривались все возможные кинематически доступные их комбинации и моды распада, дающие в конечном состоянии три заряженных лептона (электроны и/или мюоны), два легчайших нейтралино и несколько нейтрино (см. п. 4.3). На начальном этапе был проведен анализ четырехмерного пространства параметров модели для выработки стратегии поиска H^\pm -бозона на основе данных Монте-Карло, сгенерированных для выбранных контрольных точек и имеющихся в хиггсовской рабочей группе HSG5.

Работы по поиску заряженного бозона Хиггса были продолжены в 2011 г. С использованием разработанных алгоритмов был проведен анализ накопленных в 2010 г. экспериментальных данных. Событий с сигнальной сигнатурой обнаружено не было. Пока этот канал поиска заряженного бозона Хиггса подробно не исследовался в коллаборации. Тем не менее опыт отбора событий и работы с достаточно большим количеством лептонов в конечном состоянии представляется очень полезным для поиска и исследования других проявлений суперсимметрии и физики за рамками Стандартной модели.

На статистике $163,5 \text{ пб}^{-1}$ в ОИЯИ был выполнен новый поиск *узкого нейтрального Z' -резонанса по его распаду на пару топ-анти топ-кварков* (см. п. 4.4.4). При этом в процессе анализа распада $Z' \rightarrow t\bar{t} \rightarrow 4 \text{ струи} + \mu + \nu$ главным условием отбора событий было требование наличия двух адронных струй от b -кварков. Это требование оказалось очень эффективным, однако даже с его использованием на данной статистике не удалось обнаружить признаков Z' -резонанса [446]. Поиск $t\bar{t}$ -резонансов по их распадам на изолированный лептон и адронную струю был продолжен коллаборацией ATLAS в [443, 444] на статистике $2,05$ и $4,7 \text{ фб}^{-1}$, набранной при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$, а также в [596] на статистике $20,3 \text{ фб}^{-1}$ при $\sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}$.

Работы дубненской группы по исследованию свойств топ-кварков (в частности, определение знака заряда топ-кварка и поиск экзотического кварка 4-го поколения) были отражены, например, в докладах [445, 597, 598].

В середине 2012 г. на основе данных при 7 и 8 ТэВ были сделаны попытки (Л. К. Гладильным и В. В. Любушкиным) исследования образования Ξ_b -барионов (содержащих b -кварк), а также поиск их возбужденных состояний — Ξ_b^* -барионов [599]. Предполагаемая цепочка распадов имела вид $\Xi_b^{*0} \rightarrow \Xi_b^- \pi^+$, далее $\Xi_b^- \rightarrow \Xi^- J/\psi$ и далее $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $\Xi^- \rightarrow \pi^- \Lambda^0 (\pi^- p)$. После существенной оптимизации процедуры отбора событий было найдено указание на наличие сигнала от Ξ_b -бариона (5800 МэВ). В дальнейшем критичной оказалась возможность выделения событий с малыми значениями поперечного импульса треков (в том числе мюонных).

Интерес к экспериментальному изучению *корреляторов* (п. 4.4.1) был вызван попытками использовать их в качестве наблюдаемых величин, способных сигнализировать о качественных изменениях в среде с большим числом частиц (см., например, [433, 434]).

Сразу после запуска ЛHC при энергии протонов 900 ГэВ в minimum-bias событиях было предпринято экспериментальное изучение энергетических корреляторов $K_2(n)$ и $K_3(n)$ и их отношения $R_3(n)$ как функции множественности заряженных адронов. Первый доклад на эту тему был сделан

Ю. А. Кульчицким на рабочем совещании в Дубне весной 2010 г. [600]. Наблюдались заметные флуктуации в измеряемых величинах при ряде значений множественности, но в целом в области больших множественностей было еще недостаточно данных.

Затем последовала целая серия работ дубненской группы (рук. Ю. А. Кульчицкий) в этом направлении. Сначала, помимо упомянутых уже 900 ГэВ-ных данных, в анализе были учтены *minimum-bias* данные при 7 ТэВ, а затем были включены также 7 ТэВ-ные данные, отобранные специальным триггером больших множественностей [601, 602]. Изучалось поведение корреляторов (энергии и импульса) и их отношения в зависимости от множественности заряженных адронов в конечном состоянии. Параллельно были предприняты попытки сделать этот анализ как можно более обоснованным, например, путем учета эффективности восстановления треков частиц в детекторе [434, 603].

Были изучены также корреляторы ($K_2(n)$ и $K_3(n)$) для поперечных импульсов частиц как функции множественности заряженных адронов (отобранных из 7 ТэВ-ных данных *minimum-bias* триггером при $p_T > 0,1$ ГэВ/с и $|\eta| < 2,5$) [604]. Как и ранее, отношение $R_3(n)$ оказалось несколько меньше 1 для событий, у которых максимальный поперечный импульс не превышал (в данном случае) 5 ГэВ/с и множественность $n > 30$. С ростом n до 80 отношение $R_3(n) \simeq 0,5$.

Главное наблюдение — отличие полученных экспериментальных результатов от предсказаний имевшихся в то время Монте-Карло-генераторов [604].

Здесь нельзя не отметить, что «корреляторный» анализ упомянутых выше данных с самого начала представлялся слишком феноменологическим и его результаты не удавалось надежным способом связать с фундаментальными процессами в среде с (очень) большой множественностью, такими как термализация, стохастичность, фазовый переход в равновесное состояние и т. п. Более того, была показана необоснованность использования именно этих корреляторов для таких целей [605–607]. Видимо, поэтому «корреляторный» анализ «не дошел» до стадии коллаборационной публикации, однако накопленный опыт очень пригодился сотрудникам группы в дальнейших исследованиях бозе-эйнштейновских корреляций на основе практически тех же наборов данных.

5.2.2. Бозе-эйнштейновские корреляции в событиях с большой множественностью. В 2010 г. были начаты работы по анализу данных, набранных на LHC в событиях с большой множественностью при энергии столкновений протонов 900 ГэВ и 7 ТэВ. Задача — исследование бозе-эйнштейновских корреляций в событиях, отобранных *minimum-bias* триггером и триггером больших множественностей.

Фактически именно сотрудники ОИЯИ (рук. Ю. А. Кульчицкий) возглавили в 2011–2012 гг. [608, 609] работы коллаборации (см., например, [610–612]) по исследованию бозе-эйнштейновских корреляций на LHC с помощью детектора ATLAS. Как известно, бозе-эйнштейновское усиление выхода одинаковых частиц (при уменьшении их относительного импульса) позволяет получать информацию о характере и масштабе адронизации в изучаемом процессе.

Были исследованы корреляции в системе пар одинаково заряженных частиц (главным образом $\pi^\pm\pi^\pm$) в кинематической области $p_T > 100$ МэВ/с и $|\eta| < 2,5$ при энергии сталкивающихся протонов в системе центра масс 900 ГэВ и 7 ТэВ. Заметное внимание было также уделено анализу неопределенностей при выделении струй, их калибровке и измерению их сечений.

Было выявлено значительное корреляционное усиление в области малых значений разности импульсов Q двух адронов. Специальным образом определенная функция для отношения корреляций $R_2(Q) = C_2(Q)/C_2^{\text{MC}}(Q)$ [613] имела явно выраженный максимум при близких к нулю значениях Q (рис. 5.10). В анализе использовались две основные параметризации нормированной двухчастичной корреляционной функции $C_2(Q) = N^{\pm\pm}(Q)/N_{\text{ref}}(Q)$ — экспоненциальная $C_2(Q) \sim 1 + \lambda e^{-QR}$ и гауссова $C_2(Q) \sim 1 + \lambda e^{-Q^2R^2}$. С их помощью были определены две основные характеристики бозе-эйнштейновского эффекта — радиус корреляций (или размер области излучения) R и параметр подавления (или сила) корреляций λ .

Эффект Бозе-Эйнштейна был изучен в зависимости от множественности заряженных частиц, поперечного импульса двухбозонной (пионной) системы и поперечного импульса каждого бозона в этой системе. Было проведено тщательное исследование кинематической области для выделения бозе-эйнштейновских корреляций, введены поправки на эффективность реконструк-

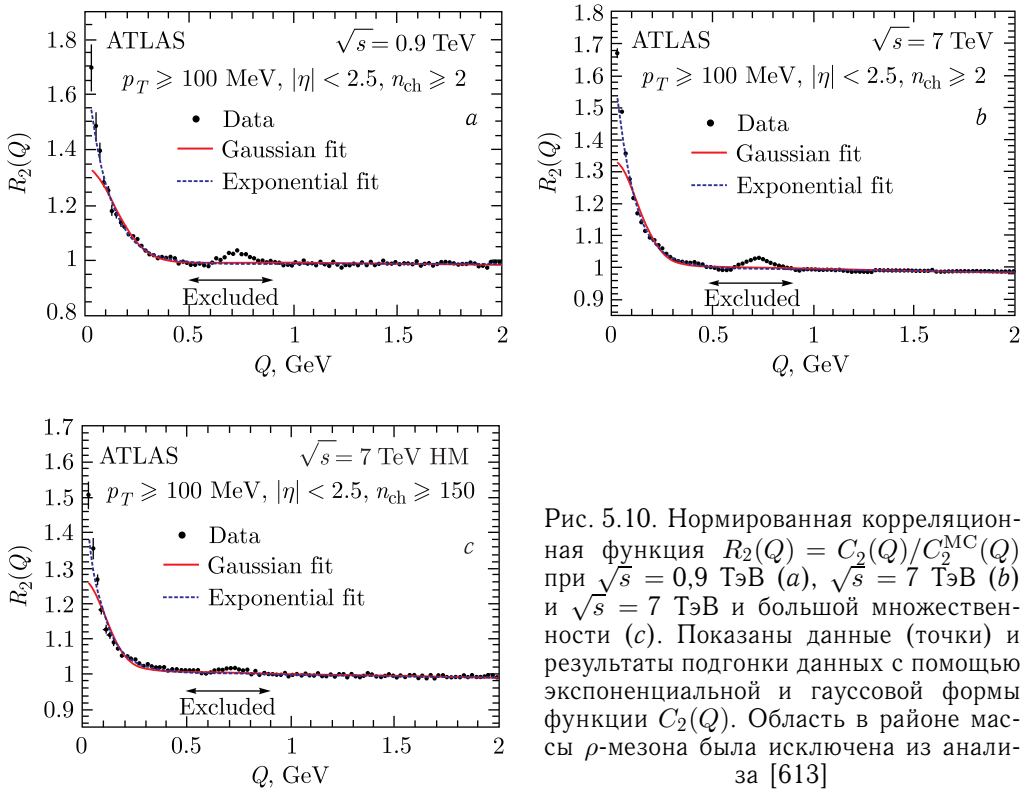


Рис. 5.10. Нормированная корреляционная функция $R_2(Q) = C_2(Q)/C_2^{\text{MC}}(Q)$ при $\sqrt{s} = 0,9$ ТэВ (a), $\sqrt{s} = 7$ ТэВ (b) и $\sqrt{s} = 7$ ТэВ и большой множественности (c). Показаны данные (точки) и результаты подгонки данных с помощью экспоненциальной и гауссовой формы функции $C_2(Q)$. Область в районе массы ρ -мезона была исключена из анализа [613]

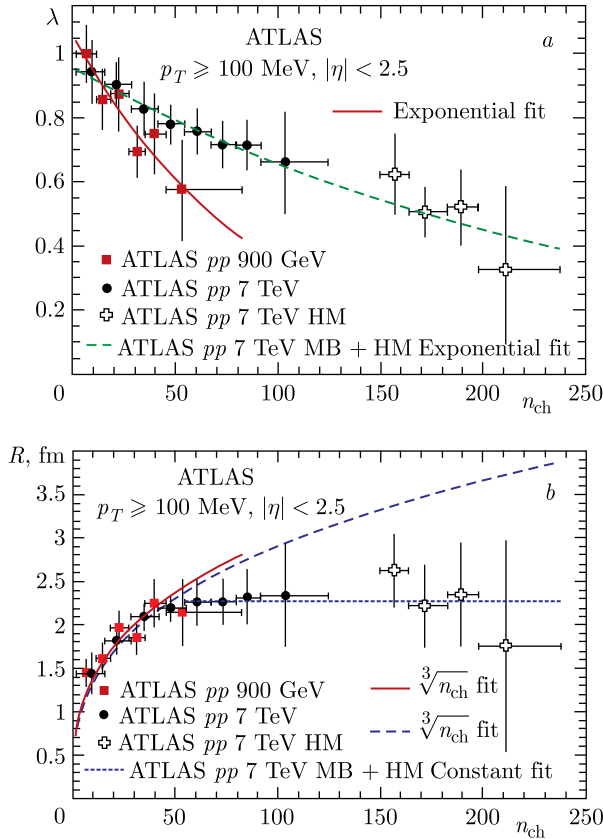


Рис. 5.11. Зависимости силы λ (a) и радиуса R (b) бозе-эйнштейнских корреляций от множественности заряженных частиц, n_{ch} , полученные из фитирования функции корреляций $R_2(Q)$ (рис. 5.10). Сплошная и штриховая кривые — результаты экспоненциального (a) и степенного $n_{ch}^{1/3}$ (b) фитирования данных при $n_{ch} < 55$. Горизонтальная пунктирная линия — результат фитирования данных при 7 ТэВ и $n_{ch} \geq 55$. Ошибки — квадратичная сумма статистических и систематических неопределенностей [613]

ции треков и на кулоновское взаимодействие заряженных адронов в конечном состоянии.

Впервые этот эффект был изучен при очень больших множественностях (до $n \simeq 240$). Было показано, что при энергии 7 ТэВ радиус области излучения (радиус бозе-эйнштейнских корреляций) выходит на постоянное значение (выполаживание радиуса корреляций) при больших множественностях адронов [614, 615]. Рис. 5.11, b иллюстрирует это явление (горизонтальная синяя линия). Для радиуса бозе-эйнштейнских корреляций не было обнаружено заметной энергетической зависимости в рамках погрешностей измерений.

Был подготовлен ряд промежуточных внутренних публикаций («ATLAS Support Note») [614–617], которые завершились статьей коллаборации [613],

в которой были подведены итоги исследования бозе-эйнштейновских корреляций в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 0,9$ и 7 ТэВ на установке ATLAS. В анализе использовались данные при интегральной светимости 7 мкб⁻¹ для 0,9 ТэВ и 190 мкб⁻¹ для 7 ТэВ, отобранные minimum-bias триггером, а также набор данных при 12,4 нб⁻¹, отвечающих событиям с большой множественностью при 7 ТэВ. Полученные результаты обсуждались также в работах [610, 611, 618, 619].

Был выполнен ряд вспомогательных исследований. Например, для анализа эффекта бозе-эйнштейновских корреляций были проведены измерения на установке ATLAS разностей импульсов одинаково заряженных адронов при столкновении протонов высокой энергии 0,9 и 7 ТэВ [616, 617]. Далее были проведены измерения свойств образования заряженных частиц (в особенности за счет мягких КХД-процессов) в pp -столкновениях на ЛНС при энергии от 0,9 до 13 ТэВ и сравнение экспериментальных данных с физическими моделями, внедренными в различные версии Монте-Карло-генераторов. Влияние так называемых *underlying events* на распределения адронов также было изучено и сравнено с теоретическими моделями и т. п. [618, 619].

Исследования двухчастичных бозе-эйнштейновских корреляций были продолжены дубненской командой на основе данных при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ [619, 620].

5.2.3. Вклад странности в структуру нуклона на ЛНС. Сотрудники группы SANC (рук. Д. Ю. Бардин) в 2011 г. приняли участие в КХД-анализе результатов измерения инклюзивных сечений процессов $W \rightarrow \ell\nu$ и $Z \rightarrow \ell\ell$ в эксперименте ATLAS с целью определения вклада моря странных кварков в протоне. При этом принимались во внимание данные глубоконеупругого ep -рассеяния с коллайдера HERA, и анализ был проведен в тесном сотрудничестве с коллегами из DESY. Было получено, что при малых значениях бьеркеновской переменной x ($x \sim 0,01$) имеет место симметричное распределение легких морских кварков и антикварков. Так, при $x = 0,023$ отношение морских s -кварков и d -кварков было получено равным $1,00 \pm 0,25$ при $Q^2 = 1,9$ ГэВ/ c^2 [400]. Эта работа вошла в кандидатскую диссертацию А. Сапронова, защищенную в 2013 г.

5.2.4. Рождение Z -бозонов во взаимодействиях тяжелых ионов. В рамках этого направления исследований в эксперименте ATLAS на основе данных 2011 г. (интегральная светимость 0,15 нб⁻¹) группой из ОИЯИ было реконструировано 1995 Z -кандидатов, образованных в соударениях ядер свинца при энергии 2,76 ТэВ на нуклон. Эти Z -бозоны были реконструированы в двухлептонной моде распада.

Число рожденных Z -бозонов, в пределах экспериментальных погрешностей измерения, пропорционально числу элементарных нуклон-нуклонных взаимодействий, рассчитанных в рамках модели Глаубера. Найдено, что распределение азимутального угла Z -бозона по отношению к плоскости реакции эллиптически изотропно (рис. 5.12). На рисунке показана зависимость числа рожденных Z -бозонов от центральности соударений ядер. Полученные результаты были представлены на конференциях, в частности на «New Frontiers in Physics» (Kolybari, Греция, 2012), и опубликованы [621, 622].

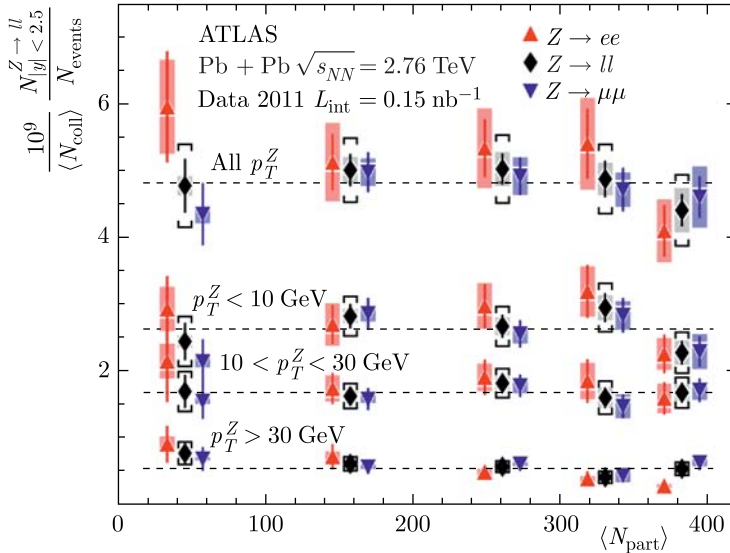


Рис. 5.12. Зависимость числа рожденных Z -бозонов от центральности соударений ядер. Из [621]

5.2.5. Поиск киральных Z^* - и W^* -бозонов. Как уже упоминалось, наличие киральных бозонов было мотивировано классом моделей «новой» физики, главным образом в контексте решения проблемы иерархий. Эти модели предсказывают значения масс бозонов в области достижимости ЛНС. Следует напомнить, что идея о необходимости существования векторных бозонов принадлежит сотрудникам ОИЯИ [518, 519, 523, 524]. Эта задача была принята коллаборацией и выполняется под руководством дубненцев [525]. В настоящее время продолжают исследования возможностей поиска киральных бозонов в событиях с двумя адронными струями [520, 526–528].

Впервые в 2011 г. при энергии $\sqrt{s} = 7$ ТэВ был проведен поиск заряженных и нейтральных киральных векторных W^* - и Z^* -бозонов и получены ограничения на их массы и вероятности образования [623]. Сотрудниками ОИЯИ совместно с коллегами из ПИЯФ (рук. О. Л. Федин) был изучен процесс инклюзивного рождения лептонных пар с большой инвариантной массой, которые могут образовываться в результате реакции $pp \rightarrow W^*/Z^* + X \rightarrow ll' + X$ (рис. 5.13). На этой основе впервые получены пределы на массы этих экзотических бозонов — $1,15$ ТэВ/ c^2 для W^* -бозона и $1,35$ ТэВ/ c^2 для Z^* -бозона [521, 529, 530, 624].

В 2011 г. группа ATLAS в ОИЯИ представила результаты поиска нового возбужденного Z^* -бозона [531, 533]. Результаты были получены на основе анализа данных pp -столкновений с энергией 7 ТэВ в системе центра масс, соответствующих интегральной светимости $4,9$ фб $^{-1}$ в диэлектронном канале (рис. 5.14, справа) и $5,0$ фб $^{-1}$ в мюонном канале (рис. 5.14, слева). Статистически значимых отклонений экспериментальных данных от ожиданий Стандартной модели не наблюдалось. Существование Z^* -бозона исключено с 95 %-й вероятностью вплоть до массы $2,20$ ТэВ/ c^2 (рис. 5.15).

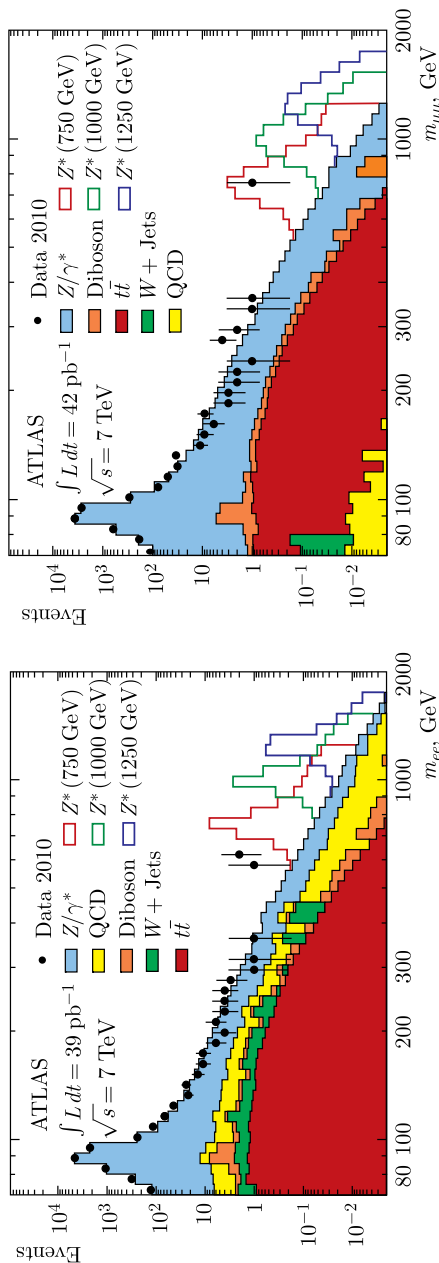


Рис. 5.13. Распределения инвариантных масс двух электронов (слева) и двух мюонов (справа) в сравнении со всеми ожидаемыми фонами и тремя возможными сигналами Z^* -бозонов. Из [529, 530]

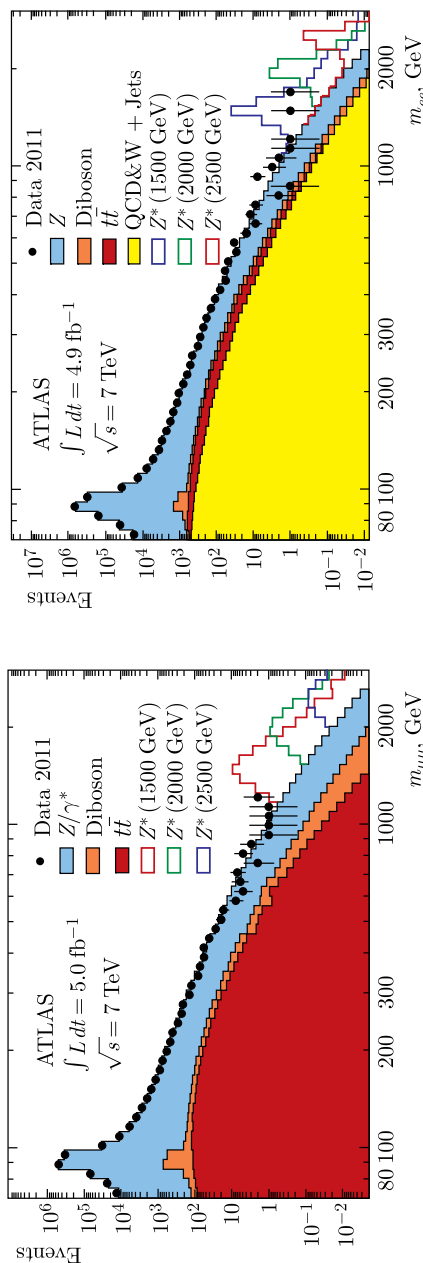


Рис. 5.14. Распределения инвариантных масс димюонов (слева) и диэлектронов (справа). Данные 2011 г. показаны вместе с суммарным фоном Стандартной модели и ожидаемыми сигналами Z^* -бозона. Из [531, 533]

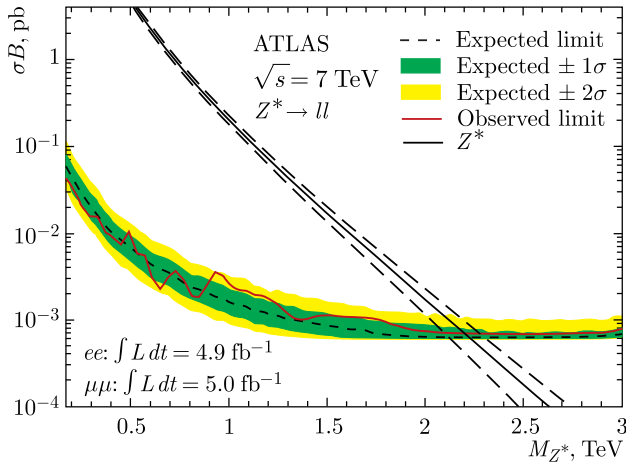


Рис. 5.15. Предел на уровне достоверности 95% на $\sigma B(Z^* \rightarrow l^+l^-)$ как функция массы Z^* -бозона в диапазоне от 0,13 до 3 ТэВ/ c^2 в сравнении с теоретическими ожиданиями. Пересечение кривых исключает Z^* -бозон с массой менее 2,20 ТэВ/ c^2 . Из [531]

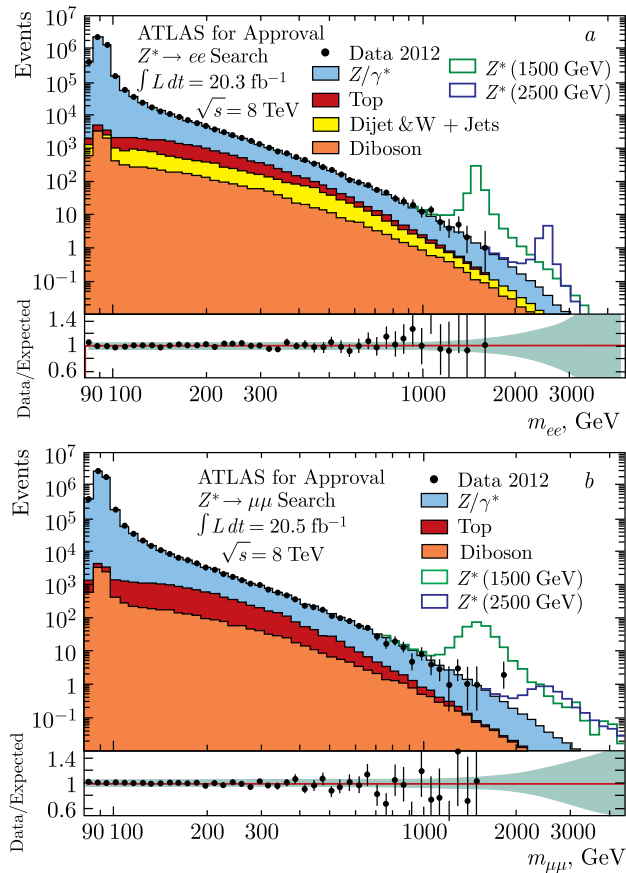


Рис. 5.16. Распределения по эффективной массе e^+e^- -пары (a) и $\mu^+\mu^-$ -пары (b) при энергии протонов 8 ТэВ. Голубая область — события с рождением $H \rightarrow Z/\gamma^*$ -бозона; красная — рождение топ-кварков; желтая — образование двойных струй и W -бозонов совместно со струями; оранжевая — рождение двойных векторных бозонов. Гистограмма зеленого цвета соответствует Монте-Карло-расчетам в предположении рождения Z^* -бозона с массой 1500 ГэВ/ c^2 ; синяя гистограмма — расчет для массы Z^* -бозона 2500 ГэВ/ c^2 . Из [532]

Экспериментальные данные и Монте-Карло-расчеты для числа событий как функции эффективной массы диэлектронов [532, 533] при начальной энергии в системе центра масс 8 ТэВ и интегральной светимости $20,3 \text{ fb}^{-1}$ показаны на рис. 5.16, *a*. Аналогичные распределения по эффективной массе димюонов при 8 ТэВ и интегральной светимости $20,5 \text{ fb}^{-1}$ показаны на рис. 5.16, *b*. Группа ОИЯИ отвечала за проведение исследований по поиску резонанса в мюонном канале его распада. На нижних панелях обоих рисунков приведено отношение данных к теоретическим предсказаниям без учета рождения Z^* -бозона. Как видно из рис. 5.16, данные не содержат указаний на возможное образование Z^* -бозона в pp -столкновениях при начальной энергии 8 ТэВ [532, 625].

На рис. 5.17 показаны полученные пределы на вероятность рождения резонанса (с учетом распада по лептонному каналу) в зависимости от его массы. Видно, что модели резонансов, рассмотренные в данном анализе, исключены при значениях их масс ниже $2,5\text{--}3 \text{ ТэВ}/c^2$ [532]. В частности, верхний предел на инвариантную массу кирального векторного Z^* -бозона составляет $2,85 \text{ ТэВ}/c^2$ [534].

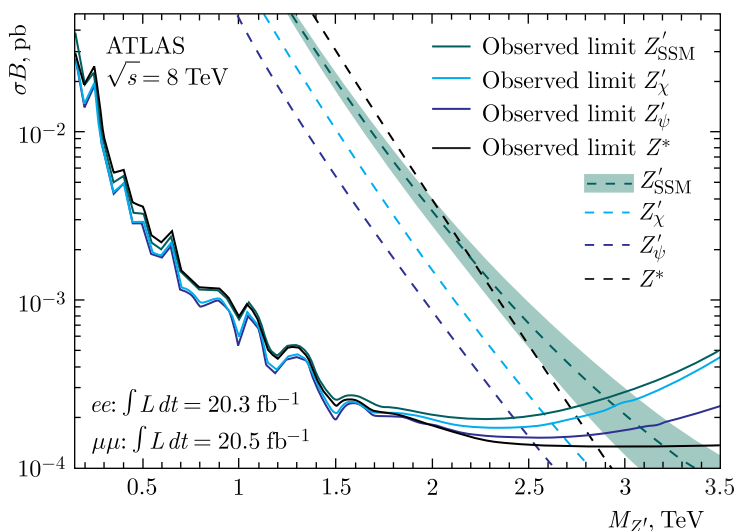


Рис. 5.17. Пределы на вероятность рождения нейтральных массивных резонансов (распадающихся на пару лептонов) в зависимости от их массы при энергии сталкивающихся протонов 8 ТэВ. Из [532]

Поиск W^* -бозона сотрудниками ОИЯИ также был начат на основе первых данных ЛНС [521, 530, 624, 626]. Исследовалась возможность обнаружения состояния с большой массой, которое бы распалось на один изолированный лептон и сопровождалось достаточно большим недостающим поперечным импульсом. Сначала использовались данные протон-протонных столкновений при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ и на небольшой набранной статистике (рис. 5.18). Затем аналогичный анализ (поиск W^* -бозона) при энергии протонных столкновений 7 ТэВ был повторен уже на большей статистике 1 fb^{-1} в [627].

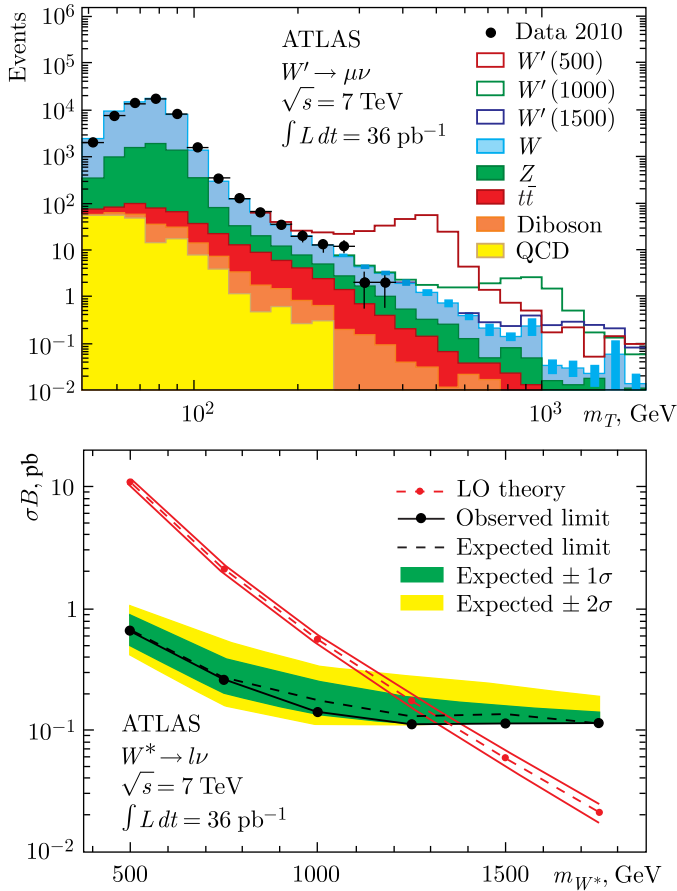


Рис. 5.18. Вверху: распределение событий по так называемой поперечной массе m_T для мюонного канала распада гипотетического заряженного тяжелого W' - или W^* -бозона. Внизу: ограничения (95 %-й уровень достоверности) на сечение образования W^* -бозона с последующим его распадом на лептонную пару как функция массы бозона. Сплошные кривые — полученные ограничения с учетом всех неопределенностей. Из [530]

В дальнейшем верхний предел на массу W^* -бозона $3,21 \text{ ТэВ}/c^2$ был получен в исследованиях по поиску состояний с большим значением инвариантной массы в распадах на лептон (электрон или мюон) плюс недостающий поперечный импульс в $20,3 \text{ фб}^{-1}$ данных при 8 ТэВ [628, 629]. Также были исключены массы ниже $1,75 \text{ ТэВ}/c^2$ для аналогичного состояния в распадах с образованием двух адронных струй [630].

5.2.6. Поиск суперсимметрии в состояниях с большим числом струй.

Поиск суперсимметрии (SUSY) на установке ATLAS с самого начала представлял интерес для группы ОИЯИ (см., например, [481, 631, 632]). Как было упомянуто (п.4.4.6), в EGRET-области параметров модели mSUGRA более предпочтительными оказались процессы с одним заряженным лептоном, нейтрино и шестью либо восьмью адронными струями в конеч-

ном состоянии. Поэтому сотрудниками ОИЯИ было предложено перейти к изучению процессов с более сложной сигнатурой конечных состояний: $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g} \rightarrow 2\chi_1^0 + 1l + 1\nu + 6(8)$ струй + $E_{T_{\text{miss}}} + X$. Это предложение было сформулировано и представлено С. Н. Карповым на совещании «SUSY EtMiss subgroup Meeting» коллаборации [633]. Была показана перспективность исследования процессов с указанным конечным состоянием при дальнейшем увеличении светимости ЛНС. Было принято решение о придании этой работе «официального» статуса в рамках ATLAS SUSY группы с возложением всей ответственности за нее на дубненскую группу. Работы были начаты в 2011 г. [634, 635]. В дальнейшем их возглавил Е. В. Храмов.

В 2012 г. участниками коллаборации ATLAS из ОИЯИ был проведен инклюзивный поиск суперсимметрии на наборе данных 2011 г. при энергии протонных соударений 7 ТэВ. Суммарный объем данных соответствовал интегральной светимости $4,7 \text{ фб}^{-1}$.

Для анализа отбирались события только с одним «жестким» лептоном (электроном или мюоном), потерянной (незарегистрированной) поперечной энергией и, как минимум, с семью адронными струями в конечном состоянии. Большое количество адронных струй, с одной стороны, могло бы свидетельствовать о рождении тяжелых суперсимметричных частиц в промежуточном состоянии, а с другой — говорило бы о практическом отсутствии фона. Этот анализ не обнаружил статистически значимого превышения наблюдаемого числа событий над предсказанием Стандартной модели (рис. 5.19). Кроме того, были поставлены нижние пределы на параметры нескольких моделей суперсимметрии (некоторые из них рассмотрены впервые), таких как mSUGRA/CMSSM, упрощенные SUSY-модели и mSUGRA с билинейным нарушением R -четности [636, 637]. Все детали проведенного анализа при энергии протонных столкновений 7 ТэВ можно найти в документах коллаборации [638, 639].

В 2013 г. был продолжен поиск суперсимметричных частиц в эксперименте ATLAS при начальной энергии сталкивающихся протонов 8 ТэВ [640]. Анализировались данные, полученные при интегральной светимости 20 фб^{-1} , когда в конечном состоянии наблюдались, по крайней мере, один изолированный лептон (электрон или мюон), несколько струй, как содержащих, так и не содержащих b -кварки, и большой недостающий поперечный импульс. Заметного превышения над предсказаниями Стандартной модели наблюдать не удалось. Полученные результаты использовались для установления пределов на значения масс SUSY-частиц для различных упрощенных моделей, предполагающих рождение пар глюино, скварков первого и второго поколения и топ-скварков. Установлены пределы на параметры mSUGRA и модели минимальных дополнительных размерностей [632, 641].

На рис. 5.20 и 5.21 представлены ограничения на значения масс нейтрино и глюино и масс нейтрино и скварка соответственно [632, 641].

Полученные результаты вызвали значительный интерес к данному анализу, который был продолжен и на следующих стадиях Run-I набора данных при энергии pp -столкновений 8 ТэВ. В то же самое время дубненская группа участвовала в анализе данных с одним лептоном, большим потерянным по-

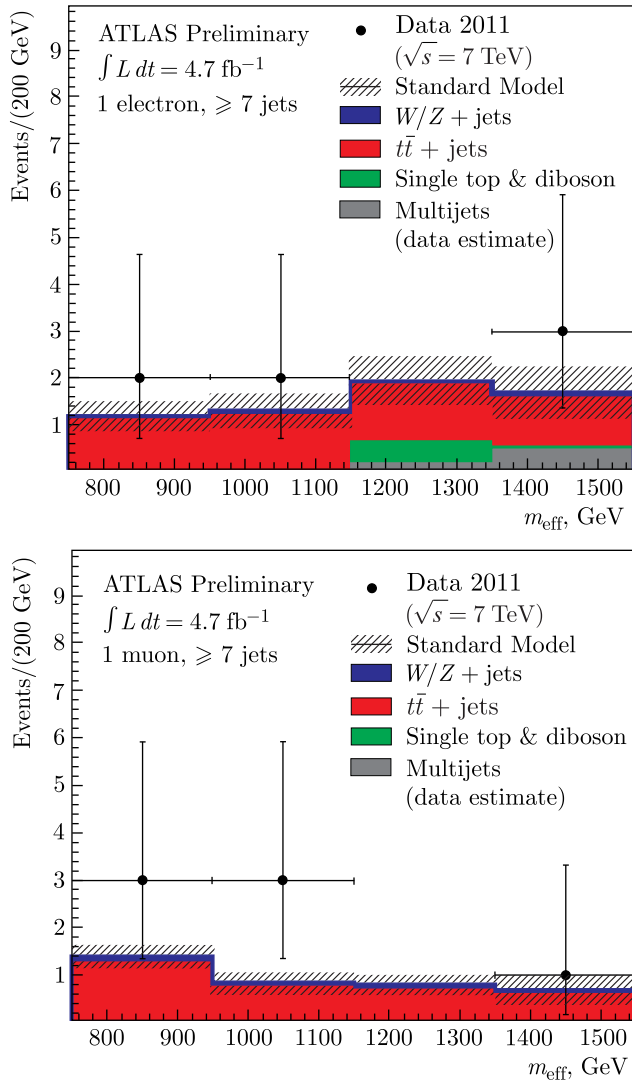


Рис. 5.19. Распределения событий с числом струй больше 7 в электронном (вверху) и мюонном (внизу) каналах как функции восстановленной эффективной массы события (после учета всех ограничений) при энергии протонных столкновений 7 ТэВ. Из [636]

перечным импульсом и 3–6 адронными струями в конечном состоянии. Этот анализ был выполнен и включен в итоговую статью по поиску суперсимметрии на установке ATLAS (Run-I) [642].

Помимо этого дубненцы внесли вклад в работы по поиску образования SUSY-частиц (скварков и глюино) за счет сильных взаимодействий (pp -данные 2012 г., $20,3 \text{ fb}^{-1}$, 8 ТэВ) с последующими их распадами на конечные состояния, содержащие как минимум один изолированный лептон (электрон или мюон), адронные струи и потерянную поперечную энергию [643, 644]. Комбинированный поиск таких скварков и глюино на этом же

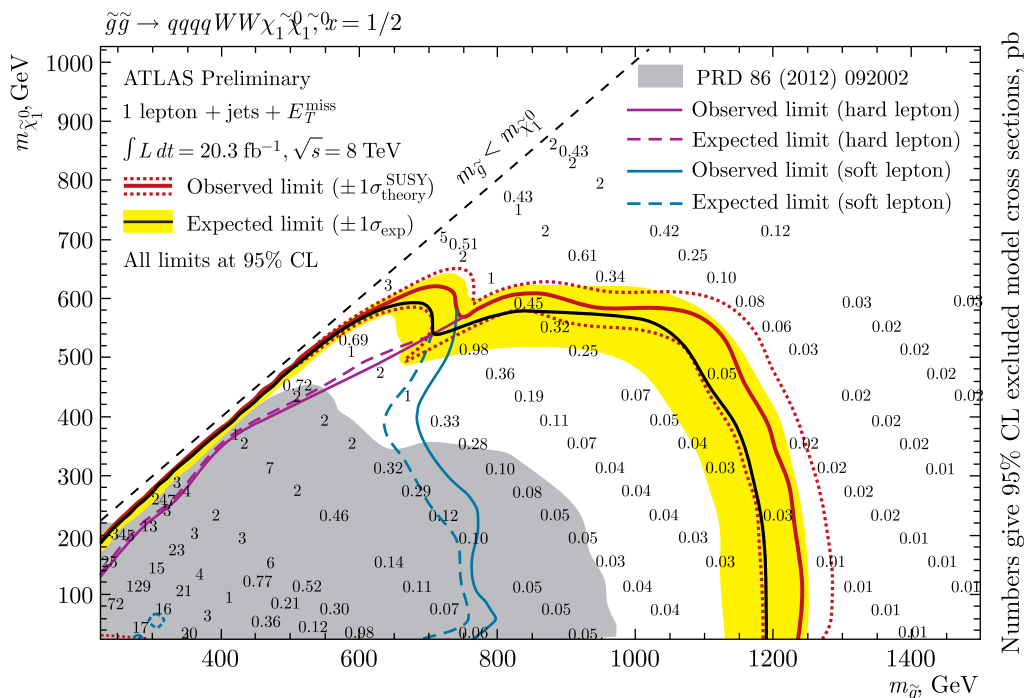


Рис. 5.20. Ограничения на значения масс нейтралино и глюино, полученные из анализа данных при энергии протонных соударений 8 ТэВ. Красная сплошная кривая — наблюдаемый предел для рождения тяжелого лептона; красная штриховая — ожидаемый предел (для тяжелого лептона); синяя сплошная кривая — то же, что и сплошная красная, но для рождения легкого лептона; синяя штриховая — ожидаемый предел (для легкого лептона). Из [632, 641]

наборе данных был представлен в работе коллаборации [645]. На его основе (в рамках упрощенной модели SUSY) были исключены значения масс глюино менее 1,3 ТэВ/ c^2 (95%-й уровень достоверности) при условии, что масса легчайшего нейтралино не превышает 500 ГэВ/ c^2 . Были исключены также массы кварков менее 850 ГэВ/ c^2 (95%-й уровень достоверности) для безмассового нейтралино.

В этом же русле (pp -данные при 8 ТэВ и 20,1 фб $^{-1}$) был проведен поиск сильновзаимодействующих SUSY-частиц на основе анализа конечных состояний, которые, помимо потерянтого поперечного импульса, содержали лептон с большим p_T , достаточно большое число адронных струй, из которых как минимум три были b -струи [646]. В этом анализе также не было обнаружено превышения над предсказаниями Стандартной модели, что, в свою очередь, позволило исключить массы глюино на уровне 1340 ГэВ/ c^2 . Аналогичные результаты были приведены в работе [647], на основе которых были получены также ограничения на радиус компактификации в моделях универсальных дополнительных размерностей и на массы SUSY-частиц различных моделей. В зависимости от модели были исключены значения массы глюино меньше 1,32 ТэВ/ c^2 и массы скварков меньше 840 ГэВ/ c^2 .

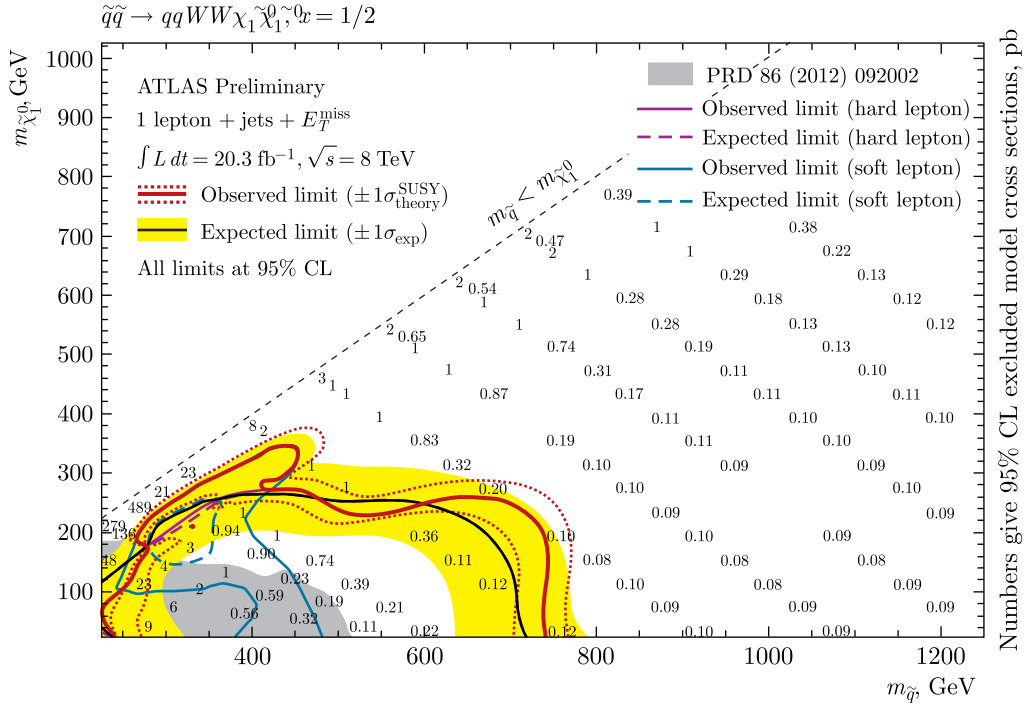


Рис. 5.21. Ограничения на значения масс нейтралино и скварка из анализа pp -данных при 8 ТэВ. Все линии аналогичны кривым на рис. 5.20. Из [632, 641]

На том же наборе pp -данных (2012 г., $20,1 \text{ fb}^{-1}$, 8 ТэВ), но в предположении о так называемом сжатом SUSY-спектре (compressed mass spectra), которому соответствовала топология конечных состояний с $E_{T^{\text{miss}}}$, адронными струями и изолированными мягкими лептонами, был проведен поиск SUSY [648, 649], при этом критерии отбора событий были специально оптимизированы для поиска цветных SUSY-частиц с небольшими разностями масс. Поскольку и в этом анализе не был обнаружен сигнал SUSY, были установлены соответствующие ограничения на массы этих цветных частиц и легчайшего нейтралино и т. п.

Итак, в статье [642] содержится обзор выполненных коллаборацией ATLAS работ по поиску (на наборе pp -данных 2012 г. при 8 ТэВ) глюино и скварков (первого и второго поколения) в конечных состояниях, содержащих струи, недостающий поперечный импульс как с лептонами и/или b -струями, так и без них. Были представлены результаты новых интерпретаций и статистических комбинаций ранее опубликованных результатов, а также новый анализ. Поскольку значительного избытка событий над ожиданием Стандартной модели не наблюдалось, эти данные использовались для установки ограничений в различных моделях. Во всех рассмотренных упрощенных моделях, которые предполагают сохранение R -четности, предел на массу глюино получен превышающим $1150 \text{ ГэВ}/c^2$ при 95%-м уровне достоверности при условии, что масса легчайшего нейтралино (LSP) не больше $100 \text{ ГэВ}/c^2$.

Кроме того, установлены ограничения для масс левых скварков в ряде моделей, таких как феноменологическая $MSSM$ -модель, минимальная модель супергравитации ($mSUGRA$)/ $CMSSM$, сценарии с нарушением R -четности, модель с минимальным нарушением суперсимметрии за счет калибровочного взаимодействия (gauge-mediated), модель с неуниверсальными значениями масс бозонов Хиггса и калибровочным переносчиком взаимодействия, а также минимальная модель универсальных дополнительных измерений.

5.2.7. Поиск бозона Хиггса, образованного совместно с W - или Z -бозоном. Вместе с коллегами из Университета Глазго сотрудники ЛФБЭ участвовали в поиске бозона Хиггса Стандартной модели в совместном рождении его с W -бозоном и с последующим распадом на $b\bar{b}$ -пару [425]. В рабо-

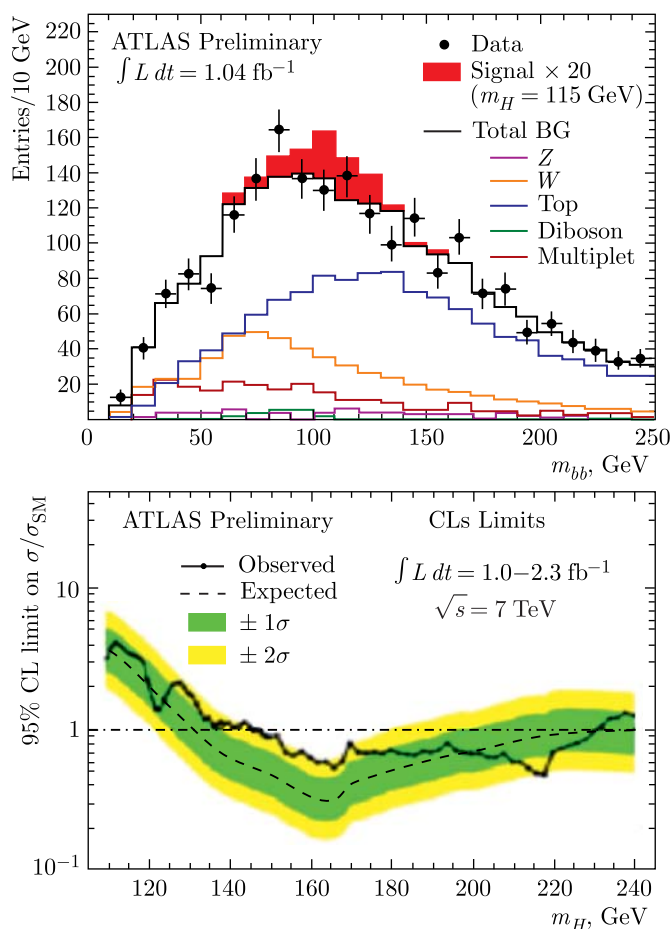


Рис. 5.22. Вверху: экспериментальное распределение по инвариантной массе пары $b\bar{b}$ -струй в WH -процессе вместе с моделированными фоновыми процессами. Внизу: верхний предел на сечение рождения бозона Хиггса в Стандартной модели как функция его массы с учетом всех возможных каналов, деленный на величину, ожидаемую в Стандартной модели. Из [650]

тах коллаборации была показана перспективность обнаружения этой реакции при отборе событий, в которых бозон Хиггса и W -бозон рождаются с большим поперечным импульсом. Совместно с коллегами из хиггсовской группы HSG5 для анализа этой реакции был разработан новый подход, основанный на применении нейронных сетей, который включал также дополнительные (угловые) переменные, определяемые спином распадающихся частиц.

В мае 2011 г. в Дубне было проведено международное совещание хиггсовской рабочей группы ATLAS (см. п. 5.3), где были обсуждены результаты анализа Монте-Карло-событий и применение развитых методов к реальным данным [427, 650]. Промежуточный итог этих работ представлен на рис. 5.22. На достигнутом к 2011 г. уровне статистики эксперимент исключил значение массы бозона Хиггса в интервалах 146–230, 256–282 и 296–459 ГэВ/ c^2 (95 %-й уровень достоверности). Область малых масс $110 < m_H < 140$ ГэВ/ c^2 оставалась наиболее трудной для такого типа анализа и требовала более сложных методик [651].

В 2012 г. физики ЛФВЭ продолжили работу по поиску совместного рождения бозона Хиггса и W -бозона. Была проанализирована вся статистика 2011 г. (5 фб $^{-1}$), результаты были опубликованы [652] и представлены на международной конференции «СНЕР-2012» [653]. Анализ данного процесса необходим для определения спина и констант связи бозона Хиггса. На статистике данных 2012 г. (13 фб $^{-1}$) предел на величину сечения процесса показан на рис. 5.23.

В 2013 г. были продолжены работы по улучшению критериев отбора событий и выбору оптимального набора переменных для подавления вклада фоновых процессов. Совместно проведенный анализ с использованием мно-

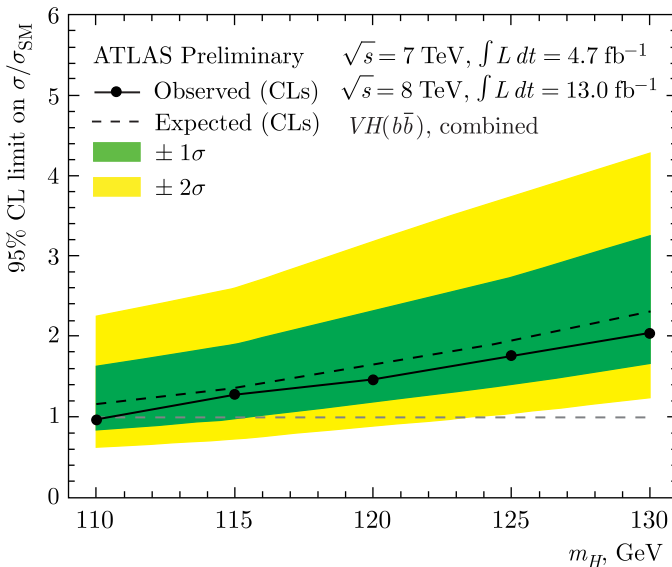


Рис. 5.23. Предел на сечение совместного рождения бозона Хиггса Стандартной модели и W -бозона, полученный на статистике 2012 г. (13 фб $^{-1}$). Из [654]

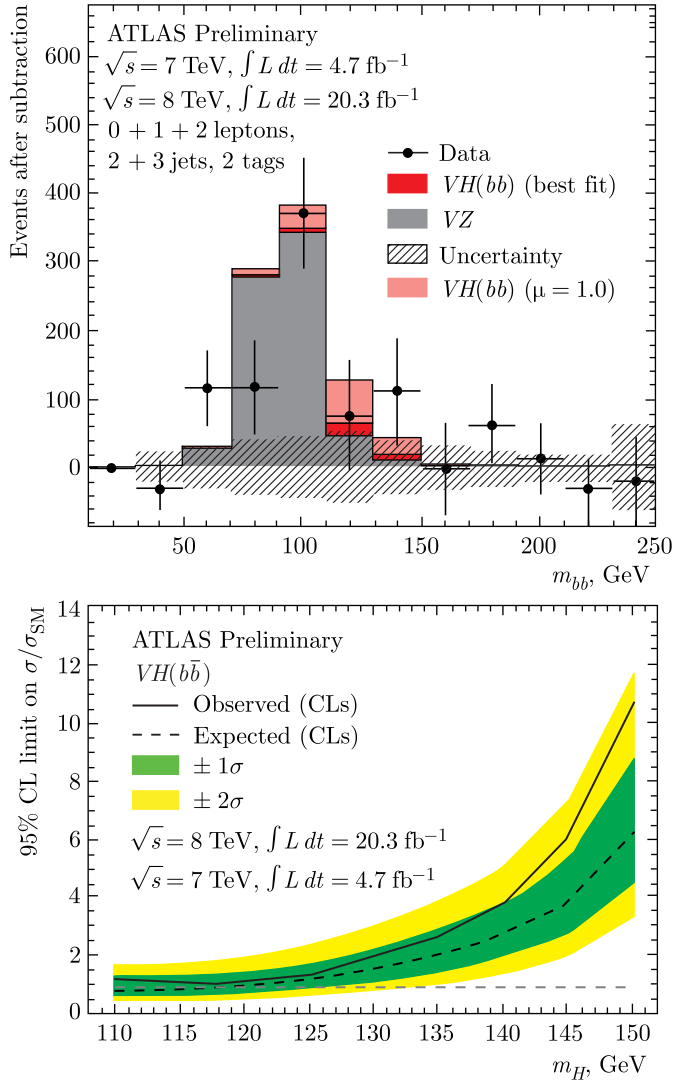


Рис. 5.24. Инвариантная масса двух b -струй (вверху) и верхний предел на сечение совместного рождения бозона Хиггса с W - и Z -бозонами с 95%-м уровнем достоверности (внизу). Из [655]

гопараметрического обрезания экспериментальных данных на полной статистике не привел пока к обнаружению достоверного превышения сигнала над фоном, как это видно из распределения по инвариантной массе двух b -струй (рис. 5.24), где уже вычтен вклад всех фоновых процессов, кроме рождения дибозонов. Верхний предел, полученный для величины сечения образования бозона Хиггса в этом процессе, в 1,4 раза превышает вычисленную в рамках Стандартной модели величину.

По результатам анализа полного набора данных эксперимента ATLAS на этапе Run-I (интегральная светимость при 7 и 8 ТэВ соответственно

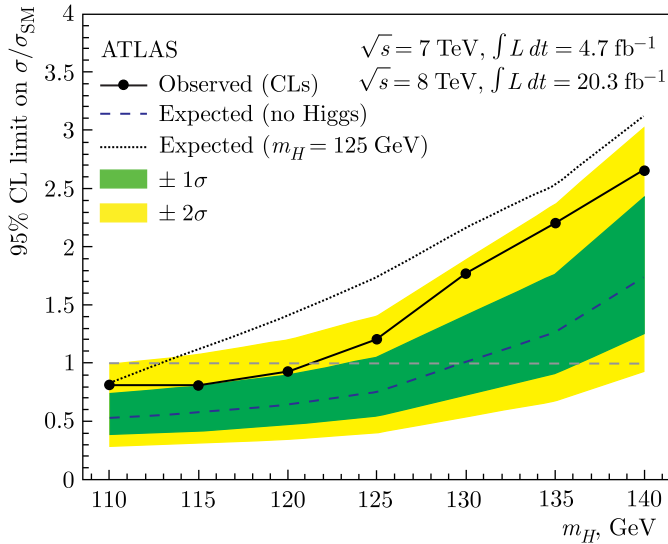


Рис. 5.25. Измеренные (сплошная линия) и ожидаемые (95 %-й уровень достоверности) верхние пределы на сечения рождения бозона Хиггса и W/Z -бозона с последующим распадом $H \rightarrow b\bar{b}$, нормированные на сечения образования бозона Хиггса Стандартной модели, как функции m_H , полученные при 7 и 8 ТэВ. Зеленой и желтой полосами отмечены 1σ - и 2σ -области ожидания в случае отсутствия сигнала. Из [656]

4,7 и 20,3 fb^{-1}) при поиске распада бозона Хиггса Стандартной модели на $b\bar{b}$ -пару было получено, что для бозона Хиггса с массой 125,36 $\text{ГэВ}/c^2$ наблюдаемое (ожидаемое) отклонение от «только фоновой» гипотезы отвечает значимости в 1,4 (2,6) стандартных отклонения (рис. 5.25) и отношение измеренного сигнала к ожидаемому в Стандартной модели равно $\mu = 0,52 \pm 0,32(\text{стат.}) \pm 0,24(\text{сист.})$ [656]. Были проанализированы процессы одновременного образования $(W/Z)H$ -бозонов с последующими распадами $W \rightarrow e\nu/\mu\nu$, $Z \rightarrow ee/\mu\mu$ и $Z \rightarrow \nu\nu$. По результатам этих работ Фаиг Ахматов защитил кандидатскую диссертацию в 2016 г.

5.2.8. Поиск квантовых черных дыр на установке ATLAS. Это исследование было выполнено в ОИЯИ (З. М. Карповой и С. Н. Карповым) по запросу коллаборации на основе данных 2012 г., накопленных при энергии сталкивающихся протонов 8 ТэВ и интегральной светимости 20,3 fb^{-1} . Квантовые черные дыры предсказываются в моделях больших дополнительных размерностей (в широко известной ADD-модели число таких размерностей равно 6), и предполагается, что они распадаются в конечные состояния, содержащие лептон (электрон или мюон) и адронную струю (рис. 5.26). Не было обнаружено событий с инвариантной массой лептон-струйной пары, превышающей 3,5 $\text{ТэВ}/c^2$, как в случае электрона, так и мюона, что полностью согласуется с ожидаемым фоном. Установлен верхний предел в 0,18 fb (95 %-й уровень достоверности) на сечение образования квантовой черной дыры с последующим ее распадом на лептон и адронную струю. Таким

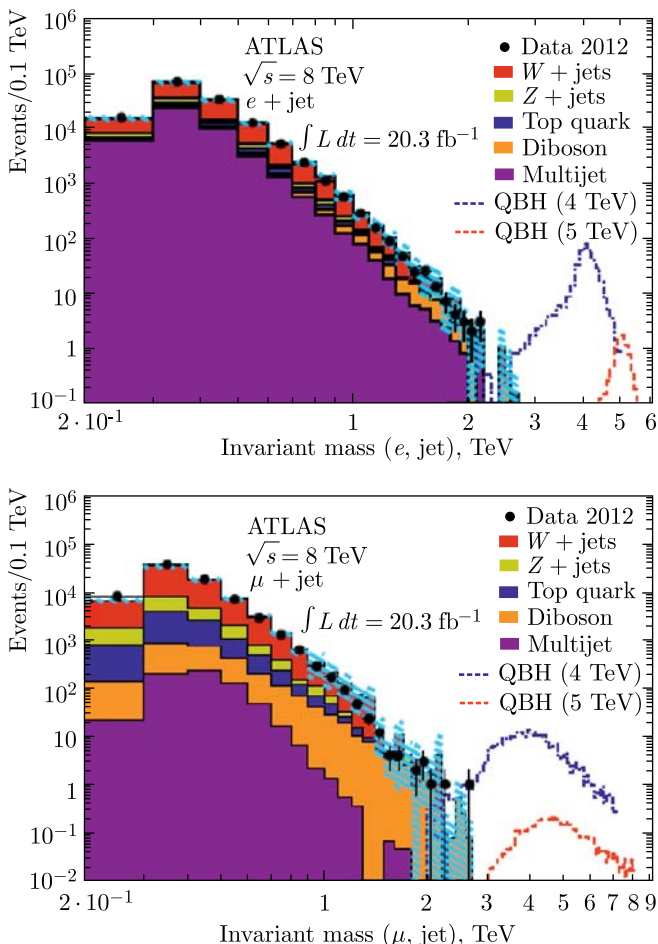


Рис. 5.26. Распределения по инвариантной массе электрона (вверху) или мюона (внизу) и струи с максимальным поперечным импульсом в событиях для данных (точки с ошибками) и ожидаемого фона Стандартной модели (сплошные гистограммы). Показаны ожидания от двух возможных каналов распада квантовых черных дыр. Из [657]

образом, в рассмотренной модели ограничение на массу квантовой черной дыры получено равным $5,3 \text{ ТэВ}/c^2$ [657].

5.2.9. Образование очарованных $D^{*\pm}$, D^{\pm} - и D_s^+ -мезонов на ЛHC.

С участием сотрудников ОИЯИ (Л. К. Гладилин) было проведено исследование рождения очарованных $D^{*\pm}$, D^{\pm} - и D_s^+ -мезонов в эксперименте ATLAS при энергии столкновения протонов 7 ТэВ [658, 659].

Мезоны реконструировались по их распадам на заряженные частицы, характеристики которых определялись по данным из трекового детектора. Дифференциальные сечения рождения $D^{*\pm}$, D^{\pm} - и D_s^+ -мезонов были измерены в зависимости от их поперечного импульса в интервале $3,5 < p_T < 100 \text{ ГэВ}/c$ и псевдобыстроты $|\eta| < 2,1$. Было проведено сравнение измеренных сечений

с предсказаниями квантово-хромодинамических расчетов в следующем за лидирующим порядке, сопряженными с пересуммированием логарифмических членов в лидирующем и в следующем за лидирующим порядке [660–662]. Квантово-хромодинамические (NLO QCD) расчеты согласуются с измерениями в пределах больших теоретических неопределенностей. Была использована статистика, отвечающая интегральной светимости 280 нб^{-1} , получены другие важные результаты, в том числе оценка полного сечения образования чарма в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}$ [663].

5.2.10. Исследование распадов B_c^+ -мезонов. Под руководством сотрудников ОИЯИ (Л. К. Гладилин, С. Турчишин) на базе pp -данных эксперимента ATLAS, набранных при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ и отвечающих, соответственно, интегральной светимости $4,9$ и $20,6 \text{ фб}^{-1}$, были исследованы распады $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ [664, 665]. Были получены относительные вероятности этих распадов [666]. Искомые распады B_c^+ -мезонов идентифицировались по распадам $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и $D_s^{(*)+} \rightarrow \varphi \pi^+ (\gamma/\pi^0)$. С учетом восстановленной инвариантной массы B_c^+ -мезона и угла между импульсами μ^+ и D_s^+ -кандидата в системе покоя мюонной пары были определены выходы распадов $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ и $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$, а также отношение их относительных вероятностей $\text{BR}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+})/\text{BR}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+) = 0,38 \pm 0,23(\text{стат.}) \pm 0,07(\text{сист.})$ [666].

На основе данных по распаду $B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$ были оценены отношения вероятностей распадов

$$\text{BR}(B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+)/\text{BR}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) = 3,8 \pm 1,1(\text{стат.}) \pm 0,4(\text{сист.}) \pm 0,2$$

и

$$\text{BR}(B_c^{*+} \rightarrow J/\psi D_s^+)/\text{BR}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \pi^+) = 10,4 \pm 3,1(\text{стат.}) \pm 1,5(\text{сист.}) \pm 0,6,$$

где последняя погрешность соответствует неопределенности в относительной вероятности распада $D_s^+ \rightarrow \varphi(K^+ K^-) \pi^+$. В целом, полученные результаты не противоречили теоретическим ожиданиям [664]. Окончательные результаты анализа pp -данных при 7 и 8 ТэВ по образованию и распадам B_c^+ -мезонов опубликованы в коллаборационной статье [667]. В работе [668] также были подведены итоги этих исследований и представлены первые результаты по образованию мезонов, содержащих тяжелые кварки, в столкновениях протонов при 13 ТэВ .

5.2.11. Наблюдение и исследование распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$. Впервые на ЛНС сотрудниками ОИЯИ (Л. К. Гладилин, В. В. Любушкин) наблюдался (на pp -данных при 8 ТэВ и интегральной светимости $20,6 \text{ фб}^{-1}$) и был исследован распад $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ [669]. Также было измерено отношение вероятностей распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$. Оно оказалось меньше ожидаемого из теории [670]. Мезоны $J/\psi X$ и $\psi(2S)X$ были восстановлены из распадов на мюонную пару, в то время как распад $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$ использовался для восстановления Λ^0 -бариона. На рис. 5.27 показаны распределения по инвариантной массе $m(p\pi^-)$ для событий от распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$. Вероятность распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ должна совпадать по порядку величины

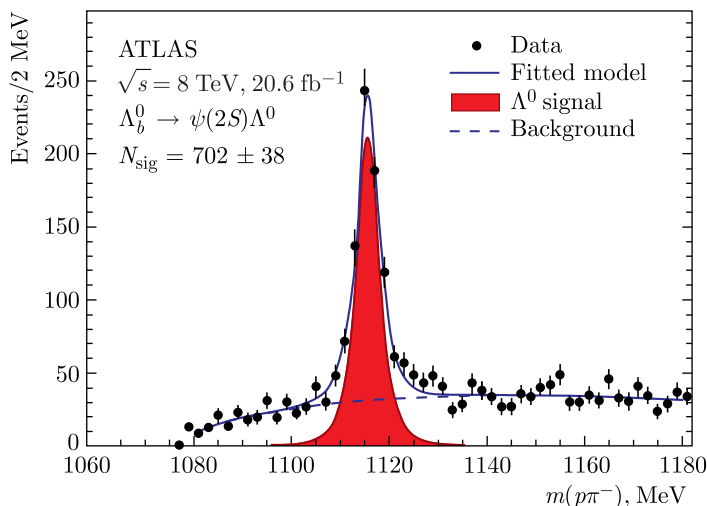


Рис. 5.27. Распределения по инвариантной массе $m(p\pi^-)$ для событий от распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$. Из [671]

с вероятностью распада $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$ по аналогии с распадами $B^0 \rightarrow \psi(2S)K^0$ и $B^0 \rightarrow J/\psi K^0$. Полученное сотрудниками ОИЯИ значение отношения вероятностей распада

$$\begin{aligned} \Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0) &= \\ &= 0,501 \pm 0,033(\text{стат.}) \pm 0,016(\text{сист.}) \pm 0,011(B) \end{aligned}$$

согласуется с отношением вероятностей распада для B -мезонов, которое экспериментально ограничено в пределах 0,5–0,8. Единственное теоретическое предсказание для отношения рассматриваемых распадов $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ и $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0$, равное $0,8 \pm 0,1$, заметно превышает измеренное значение [671].

В 2015–2016 гг. с целью исследования возможности поиска пентакварка было проведено изучение (идентификация) $J/\psi p$ -резонансов в распадах $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$. Анализ базировался на комбинированных pp -данных эксперимента ATLAS, набранных при $\sqrt{s} = 7$ и 8 ТэВ и отвечающих, соответственно, интегральной светимости 4,9 и 20,6 fb^{-1} [672]. Полученные результаты не полностью согласуются с результатами эксперимента LHCb [673]. Эти работы продолжаются.

5.2.12. Подготовка к поиску внутреннего очарования и бьюти. Сотрудники ОИЯИ принимали участие в обработке и анализе pp -данных эксперимента ATLAS, полученных при энергии 7 и 8 ТэВ, которые представляли интерес с точки зрения дальнейшего поиска проявлений внутренних валентноподобных компонент тяжелых кварков в нуклоне (см. постановку задачи в п. 4.4.8). К работам коллаборации, выполненным с участием сотрудников ОИЯИ или представляющим интерес в этом направлении, можно отнести, во-первых, публикации по изучению образования W - и Z -бозонов совместно с адронными струями при энергии 7 и 8 ТэВ [674–678], в том числе и об-

разования этих бозонов совместно с c -кварком [679] и b -струями [680–684], и, во-вторых, измерения отношений сечений рождения W - и Z -бозонов, образованных совместно как с одной струей [685], так и с несколькими струями [686]. Все эти работы легли в основу проводимого в настоящее время (2017 г.) глобального анализа данных по оценке вклада внутренних валентно-подобных компонент тяжелых кварков в структуру нуклонов (см., например, обоснование в [507, 516]).

Итак, дубненская группа коллаборации ATLAS во время Run-I (2009–2014 гг.) LHC выполнила значительный объем работ по физическому анализу данных и получению важных результатов. Стоит отметить несколько предложений этой группы по новым физическим задачам, которые получили поддержку коллаборации и превратились (или находятся в стадии обработки) в полноценные публикации ATLAS. Это касается киральных векторных W^* - и Z^* -бозонов, поиска суперсимметрии в событиях с большим числом адронных струй, исследования бозе-эйнштейновских корреляций при больших множественностях, изучения распада $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ и ему подобных, а также разработки программы исследования роли глюонов и валентноподобных вкладов тяжелых кварков в структуру нуклона в процессах столкновения протонов при сверхвысоких энергиях LHC и т. п.

5.3. Другие важные события коллаборации ATLAS в ОИЯИ

5.3.1. Крупные международные симпозиумы в Дубне. 1995–2000 гг.

Сразу после утверждения советом ЦЕРН в декабре 1994 г. проекта создания LHC была достигнута договоренность о проведении на базе ОИЯИ международного симпозиума «Физика и детекторы на LHC». Этот симпозиум, первый из целой серии, прошел в Дубне 19–21 июля 1995 г., и в нем приняли участие свыше 200 ученых более чем из 20 стран (рис. 5.28).

Уже тогда было отмечено (А. Н. Сисакяном и В. Г. Кадышевским), что причиной выбора Дубны для такого масштабного события было признание роли ОИЯИ как центра широкомасштабного международного сотрудничества, успешно координирующего усилия стран-участниц, и не только их, в направлении реализации проекта LHC.

Для участия в симпозиуме в Дубну были приглашены министр науки и технической политики РФ Б. Г. Салтыков, министр атомной энергетики и промышленности России В. Н. Михайлов, генеральный директор ЦЕРН К. Льюеллин-Смит, руководители всех экспериментов на LHC, ведущие физики мира. Было сделано более 30 пленарных докладов.

Помимо собственно физической программы и методов исследований на LHC большое внимание было уделено фундаментальным вопросам развития физики элементарных частиц высоких энергий и вопросам организации сотрудничества в этой области научных центров России, Европы, Азии и Америки. Были проведены специальные встречи дирекции ОИЯИ и дирекции ЦЕРН, посвященные практической организации этого сотрудничества. Тогда же было сделано важное предсказание о том, что наш Институт внесет в этот



Рис. 5.28. Участники международного симпозиума «Физика и детекторы на ЛНС» на ступеньках Дома международных совещаний ОИЯИ. Июль 1995 г.



Рис. 5.29. Во время международного симпозиума «Физика и детекторы на ЛНС». Июль 1995 г.

проект свой неоценимый материальный и интеллектуальный вклад, что было действительно подтверждено всем дальнейшим развитием событий.

Симпозиум прошел очень успешно и положил начало тесной, взаимовыгодной и длительной совместной работе триады ОИЯИ–Россия–ЦЕРН по созданию коллайдера LHC и получению на нем физических результатов самой высокой фундаментальной значимости.

С 22 по 27 июня 2000 г. именно в Дубне коллаборация ATLAS провела первое выездное (за пределами ЦЕРН) общее собрание (ATLAS Week). Эта «Неделя ATLAS» представляла собой одну из крупнейших конференций



Рис. 5.30. Участники первой выездной «Недели ATLAS» в Дубне. 2000 г.



Рис. 5.31. Н. А. Русакович (слева) и П. Йенни (справа) на «Неделе ATLAS» в Дубне. 2000 г.

в области физики элементарных частиц, собравшей в дубненском ДК «Мир» свыше 300 ученых и инженеров из более чем 30 стран (рис. 5.30). Все они в той или иной мере принимали участие в создании экспериментальной установки ATLAS и разработке физической программы для исследований на ЛНС. Обсуждение именно этих двух важнейших тем и было главной целью и задачей конференции. Избрание ОИЯИ местом проведения этого мероприятия являлось признанием большого вклада как нашего Института, так и России в этот процесс. Председателем оргкомитета конференции был вице-директор Института А. Н. Сисакян, заместителем — Н. А. Русакович (рис. 5.31), директор ЛЯП, руководитель работ ОИЯИ по созданию установки ATLAS.

После окончания этого форума с 28 по 30 июля в Дубне во второй раз состоялся крупный международный симпозиум «Физика и детекторы на ЛНС». В нем приняли участие руководители ЦЕРН, ОИЯИ, крупных институтов мира, ведущие физики России, Европы, Азии и Америки. Обсуждались фун-



Рис. 5.32. Вверху: участники пресс-конференции симпозиума «Физика и детекторы на ЛНС». Внизу: П. Йенни и В. Г. Кадышевский в Доме международных совещаний ОИЯИ. 2000 г.

даментальные вопросы и планы развития физики высоких энергий в XXI в., состояние и перспективы сотрудничества российских и зарубежных научных центров. Симпозиум подвел итоги очередного, очень важного этапа создания ЛНС. Была пройдена половина пути, и проект создания коллайдера ЛНС, как тогда считалось, выходил на завершающую стадию. К 2005 г. коллайдер с энергией 10 ТэВ должен был быть готов к первым экспериментам. На симпозиуме была дана высокая оценка сотрудничества российских научных центров и ОИЯИ с ЦЕРН по созданию ЛНС и была подчеркнута эффективность международной интеграции ученых, участвующих в изучении самых фундаментальных свойств материи. Обсуждалось состояние дел на каждом из четырех главных детекторов — ATLAS, CMS, ALICE и LHCb и главные моменты их физических программ. В первый день была проведена пресс-конференция (рис. 5.32). На вопросы журналистов отвечали В. Г. Кадышевский, А. Н. Сисакян, П. Йенни, Т. Вирди и др. Руководители коллабораций особо отметили высокий профессиональный, интеллектуальный и технический уровень специалистов из ОИЯИ: «Их роль в проектах ЛНС трудно переоценить».

5.3.2. Совещание рабочей группы по физике тяжелых ионов в Дубне. 2008 г. Как известно, для успешного выполнения разноплановых исследований необходима специализация. Поэтому в коллаборации ATLAS по каждому из направлений исследований были созданы рабочие группы, которые регулярно проводили и проводят совещания для обсуждения текущего состояния работ, для рассмотрения новых предложений и координации планов работ.

Впервые заседание рабочей группы коллаборации ATLAS «Физика взаимодействий тяжелых ионов» (Heavy Ion Working Group) было выездным (вне ЦЕРН) и проходило 12–13 мая 2008 г. в Дубне (организаторы — В. Н. Поздняков и В. А. Бедняков). Научная программа этого рабочего совещания была поделена на три блока: обзорные доклады о текущем состоянии исследований на ускорителе RHIC, доклады о планах исследований на установке ATLAS, а также сообщения, относящиеся к тематике взаимодействий тяжелых ионов.

На первой сессии было рассказано о результатах измерений глобальных кинематических переменных и коллективных эффектов взаимодействий ионов, о рождении адронов с большими поперечными импульсами и исследованиях эффекта «гашения струй», об образовании тяжелых кваркониев и др. После этого обсуждались планируемые исследования на установке ATLAS. Руководитель рабочей группы по физике тяжелых ионов Брайан Коул (рис. 5.33) привел краткий обзор задач, выполняемых в то время. Затем были представлены сообщения о текущем состоянии дел по измерению множественности рожденных частиц, их энергии, реконструкции струй и определению их свойств, результатам моделирования рождения J/ψ -мезонов, тяжелых кваркониев, а также о мюонном мечении адронных струй. Третья сессия включала сообщения, имевшие общее отношение к тематике ядро-ядерных взаимодействий. Это статус проекта NICA/MPD (А. С. Сорин), теоретические исследования коллективных эффектов в ядерных соударениях (Г. И. Лыкасов), участие ОИЯИ в эксперименте ALICE (Б. В. Батюня), моделирование



Рис. 5.33. Б. Коул — руководитель рабочей группы по физике тяжелых ионов ATLAS — выступает на совещании в Дубне. Сидят Г. И. Лыкасов и А. Лебедев

физических процессов в ядро-ядерных столкновениях (И. А. Лохтин, НИИЯФ МГУ) и т. п.

Привлекательной стороной исследований в данной области представлялось то, что планируемая интенсивность коллайдера LHC в ядро-ядерной моде должна была обеспечить объем экспериментальных данных, более чем достаточный для получения результатов в течение одного-двух лет после проведения первых сеансов, что казалось важным, в особенности для молодых ученых.

5.3.3. Совещания рабочей группы по исследованию бозона Хиггса. 2010 и 2011 г. Успешная подготовительная работа в данном направлении сотрудников ОИЯИ послужила основой для принятия коллаборацией ATLAS решения о проведении в Дубне (май 2010 г.) международного совещания одной из своих рабочих групп (HSG5 Working Group). На этом совещании председательствовали Крис Поттер (McGill University) и Александр Чеплаков (ОИЯИ). Задача этой группы состояла в организации и координации работ по поиску бозона Хиггса по его распадам в сложные конечные состояния, а также в исследовании возможностей обнаружения заряженного бозона Хиггса, который предсказывался суперсимметричными моделями. В совещании приняли участие российские ученые и сотрудники ОИЯИ, а также 24 зарубежных специалиста (рис. 5.34). Следует отметить, что это было первое выездное заседание рабочей группы HSG5. Совещание было очень полезным для ОИЯИ. Оно, с одной стороны, наглядно показало высокий уровень всех работ коллаборации, что, несомненно, послужило хорошим примером для дубненцев. С другой — само согласие коллаборации на это совещание



Рис. 5.34. Участники совещания рабочей группы HSG5 ATLAS на ступеньках ДМС ОИЯИ. Май 2010 г.

в Дубне, успешное его проведение имело важное значение для ОИЯИ как полноправного и надежного участника коллаборации ATLAS.

В продолжение этой работы 18 мая 2011 г. в Дубне было проведено еще одно рабочее совещание этой группы (рис. 5.35). В нем, помимо российских ученых и сотрудников ОИЯИ, приняли участие коллеги из научных центров многих стран — Португалии, Голландии, Великобритании, Израиля, Швеции, Германии, Канады, США и ЦЕРН. Приехавшие в Дубну 22 зарубежных специалиста составляли основу данной рабочей группы. Стабильная работа современных коммуникационных средств позволила принять участие в этом совещании значительной части заинтересованных лиц, которые не смогли приехать в Дубну персонально. По интернету была сделана примерно 1/4 часть всех докладов. Формат совещания был «рабочим», состоявшим из обзорных докладов теоретиков и экспериментаторов и представления текущих результатов. Также на совещании проходили параллельные сессии, на которых уже в узком кругу обсуждались конкретные проблемы совместного анализа. Одна из главных задач этого дубненского совещания состояла в том, чтобы собрать вместе разнопрофильных специалистов для выработки общей стратегии поиска бозона Хиггса на установке ATLAS на уже доступном объеме статистики около 1 фб^{-1} .

Очень полезным это совещание было для ОИЯИ и российских ученых. Интенсивная работа в параллельных секциях позволила получить ценный опыт «из первых рук», устранить пробелы в анализе, что, несомненно, ускорило совместные работы. Интересно отметить, что на совещании 2011 г. было подчеркнuto, что накопленный опыт и все возрастающий поток эксперимен-



Рис. 5.35. Участники совещания рабочей группы HSG5 ATLAS на ступеньках ДМС ОИЯИ. Май 2011 г.

тальных данных позволяют утверждать, что если бозон Хиггса существует в природе, он будет обнаружен в ближайшие год-два. И это действительно произошло в 2012 г. [7], с активным участием дубненской группы.

5.3.4. «Brainstorming workshop on applications from ATLAS using EU-funding for R&D-upgrades». 2010 г. Необычное выездное рабочее совещание руководства коллаборации ATLAS под таким названием прошло 22–24 октября 2010 г. в Дубне. На русский язык это название можно перевести как «Мозговой штурм проблемы привлечения ресурсов Европейского сообщества для финансирования исследований и разработок, направленных на модернизацию установки ATLAS». Важно отметить, что это первое крупное совещание коллаборации ATLAS на тему модернизации установки и инновационной политики коллаборации прошло именно в Дубне.

Ключевыми вопросами, обсуждаемыми на совещании, как отметил главный его организатор Марцио Несси, стали, во-первых, побочные продукты, или, как их называют, приложения атласовских разработок, во-вторых, способы и каналы их возможного европейского финансирования и, в-третьих, программа модернизации установки ATLAS. Причем все эти вопросы надо было обсуждать совместно и в кратчайшие сроки, методом глубокого коллективного «погружения» в проблему (рис. 5.36).

В вопросе приложений, отметил М. Несси, главное — это возможность инноваций в различных сферах деятельности. Так, в рамках проекта ATLAS всегда имеется достаточное число разработок, способных давать различные приложения. Области приложений — это своего рода зона для более тесной координации усилий, именно здесь особенно заметны вклад и успехи отдельных стран или групп на фоне всей коллаборации.

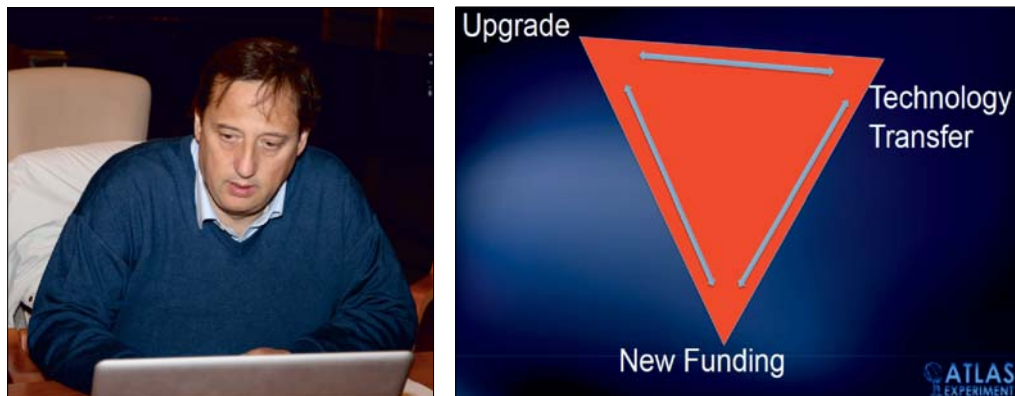


Рис. 5.36. Слева: Марцио Несси открывает совещание «Мозговой штурм проблемы привлечения ресурсов Европейского сообщества для финансирования исследований и разработок, направленных на модернизацию установки ATLAS». Дубна, октябрь 2010 г. Справа: слайд из его доклада о главной идее совещания

По поводу научно-исследовательских работ, касающихся модернизации установки ATLAS, М. Несси отметил, что новая фаза таких работ уже началась и работы в этом направлении безусловно требуют новых технологий, причем некоторые из них вполне способны дать совершенно новые приложения в технике и т. п.

По поводу финансирования со стороны Европейского сообщества (ЕС) главный вопрос, согласно М. Несси, состоял в том, имеются ли у коллаборации ATLAS внутренние ресурсы и возможности самоорганизации для новых конкурентоспособных запросов на финансирование со стороны ЕС.

Так были сформулированы главные задачи этого совещания, в процессе которого, по задумке М. Несси и М. Нордберга (рис. 5.37), предполагалось сначала выделить те инновационные работы, которые уже могут иметь статус приложений, затем обсудить те работы по модернизации установки, которые



Рис. 5.37. Руководители совещания в Дубне — Ольга Белтрамелло, Маркус Нордберг, Ариелла Каттаи и Марцио Несси (слева направо)

могли бы лечь в основу новых идей и новых приложений, кроме того, по итогам совещания было желательно начать создание своеобразного каталога будущих возможных приложений, который бы лег в основу установления более тесных или даже совершенно новых отношений, связей между различными группами внутри коллаборации.

На «традиционный» вопрос, почему для такого необычного совещания коллаборация ATLAS выбрала именно Дубну, М. Несси ответил, что во-первых, надо было, наконец, уже начать эту работу, ОИЯИ — вполне подходящее место. Во-вторых, он сказал, что коллаборация видит в России довольно широкую программу новых разработок и приложений, причем не все они напрямую связаны с модернизацией установки ATLAS. Затем он отметил: почему бы не попробовать направить соответствующие средства ЕС в Россию для решения этих задач. М. Несси также сказал, что у него есть ощущение, что в России сохранилась та же высокая инновационная мотивация, какая была 15–20 лет назад, когда работы по созданию установки ATLAS только начинались. Уместно привести слова руководителя коллаборации ATLAS, а ныне директора ЦЕРН Фабиолы Джанотти: «Без вклада России и ОИЯИ проекты LHC и ATLAS вообще не состоялись бы».

В соответствии с основными тематиками все доклады были распределены по четырем разделам: твердотельные детекторы, детекторы с газообразным рабочим веществом, электроника и компьютеринг, а также приложения в инженерной области. Хорошо выглядели презентации сотрудников ОИЯИ — Н. М. Алфимова «Новые микропиксельные лавинные фотодиоды (MAPD) со сверхвысокой плотностью пикселей», Г. А. Шелкова «Пиксельные детекторы с чувствительными элементами на основе арсенида галлия и возможное их использование», В. Д. Пешехонова (рис. 5.38) «Возможности трековых детекторов на базе гранулированных и/или находящихся под высоким давлением детектирующих строу-трубок». Перспективы использования грид-технологий и облачных вычислений в современной науке и инновационном бизнесе были изложены в докладе В. В. Коренькова. Выступление М. А. Минеева (и В. М. Котова) было посвящено системам удаленного доступа в реальном времени для мониторинга установки ATLAS и контроля качества данных.

Была особенно подчеркнута важность как самих систем удаленного контроля, так и накопленного опыта их использования в контексте управления и мониторинга атомных станций или каких-либо других постоянно работающих объектов, когда прямой доступ обслуживающего персонала к ним невозможен в силу опасности для жизни. Другой аспект такого распределенного мониторинга весьма актуален в проблеме надежного предсказания надвигающихся глобальных катастроф типа землетрясений, цунами и т. п. А. П. Чеплаков рассказал об уникальных возможностях реактора ИБР-2М для проведения исследования радиационной стойкости различных материалов, в том числе тех, которые будут необходимы для модернизации установки ATLAS. Ольга Белтрамелло (рис. 5.37), пожалуй, наиболее убедительно продемонстрировала результаты внедрения достижений, используемых в теледозиметрии ATLAS. Это был видеоролик с виртуальными инструкциями по сборке-разборке автомашины. Речь шла о «расширенной реальности» (augmented reality), когда виртуальный объект (3D-видео, рисунок или текст), созданный с помощью



Рис. 5.38. В. Д. Пешехонов и А. Романюк на совещании в Дубне

компьютера, проникает в физическую реальность индивида путем визуализации напрямую в зоне его видимости. Для этого применяются специальные устройства-передатчики, изначально предназначенные для проведения дозиметрических работ в шахте ATLAS.

Примечательно, что обсуждавшиеся тогда разработки в значительной мере уже нашли применение во многих сферах человеческой деятельности. Это безопасность, защита от радиации и других явлений, обороноспособность и военная промышленность, медицина, образование, производственное обучение, проверка оборудования, мониторинг земной и морской поверхностей, внеземного космического пространства, предсказание землетрясений и цунами, просто улучшение качества жизни и т. д.

Заключая обсуждение этого уникального мероприятия, следует заметить, что саму коллаборацию ATLAS тоже можно рассматривать как некий социальный эксперимент организации совершенно нового типа, когда ради одной общей цели добровольно объединились почти 3000 высокообразованных людей совершенно разных национальностей, взглядов на жизнь и вероисповеданий. История создания, развития, решения разнообразных проблем, история успехов и неудач такой организации может быть поучительна и познавательна.

5.3.5. Обучение анализу данных ATLAS в Грид-лаборатории ЛИТ.

На пути обеспечения успешного участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS одной из основных задач являлась подготовка специалистов, способных квалифицированно и эффективно обрабатывать беспрецедентные по объему потоки данных. Сотрудники ОИЯИ предполагали участвовать в работах по поиску бозона Хиггса и суперсимметрии, физике топ-кварка, проверке Стандартной

модели и т. п. Однако все эти замыслы могли бы остаться нереализованными, если бы дубненцы вовремя не научились воплощать их в жизнь с помощью методов и программ, принятых и утвержденных в коллаборации ATLAS, т. е. используя официальное программное обеспечение коллаборации. Это особенно касалось умения анализировать данные, моделировать их, определять характер их форм хранения в среде грид.

Понимание этих проблем стимулировало руководство дубненской группы ATLAS на организацию специальных курсов по обучению сотрудников ОИЯИ. Такие курсы оказались возможными только в сотрудничестве с ЛИТ ОИЯИ, подготовившей специализированную Грид-лабораторию, ко-



Рис. 5.39. Вверху: российские и дубненские участники эксперимента ATLAS на занятиях по использованию грид-пакета GANGA. Внизу: А. А. Мягков из ИФВЭ (Протвино) (на переднем плане) и другие участники обучения

торая включала оборудованные рабочие места для участников практических занятий, специализированные серверы с необходимым программным обеспечением и аппаратуру для презентаций.

Самые первые практические курсы по распределенному грид-анализу данных (в рамках пакета GANGA) на кластере ATLAS Tier-2 в Дубне были проведены в апреле 2007 г. (рис. 5.39). Поскольку этот кластер был в то время единственным полноценно работающим в России, то в этих занятиях приняли участие многие ученые России — участники эксперимента ATLAS. В январе 2008 г. прошли аналогичные занятия по использованию пакета GANGA в грид-анализе данных ATLAS. Этими курсами начался новый важный этап участия ЛИТ в работах по эксперименту ATLAS.

В середине апреля 2008 г. именно в Грид-лаборатории ЛИТ (рис. 5.40) было проведено обучение участников эксперимента ATLAS навыкам работы в среде грид с программным обеспечением для анализа данных. На занятиях присутствовало 13 сотрудников из ЛЯП, ЛФЧ и ЛИТ. Н. И. Громова (ЛИТ) провела обучение (рис. 5.40) правилам использования команд LCG (LHC Computing Grid) и работе с файловой системой в среде грид. А. С. Жемчугов (ЛЯП) провел занятия по работе с системой управления распределением данных ATLAS (Distributed Data Management) и анализу данных эксперимента с использованием программ GANGA и PanDA.

Все презентации сопровождалась демонстрацией практических примеров, отображаемых на большом экране в режиме реального времени. Характерной чертой этой формы обучения являлась предоставляемая слушателям возможность делать все одновременно с преподавателем, поскольку у каждого участника был отдельный компьютер с терминальным доступом к грид-ресурсам. При этом особенностью Грид-лаборатории ЛИТ было наличие различных способов доступа к ресурсам (Windows, Linux), что позволяло каждому участнику выбрать наиболее удобную для него форму работы.

В целом, в рамках данной деятельности в 2007–2009 гг. в ОИЯИ были проведены четыре учебно-практических курса по использованию инструментов Грид в распределенном анализе данных ATLAS, а также по обучению пакетам программ GANGA для анализа данных. В этих занятиях принимали участие сотрудники не только ОИЯИ, но и российских центров — членов коллаборации ATLAS (ИТЭФ, МИФИ, ПИЯФ, ИФВЭ, НИИЯФ МГУ).

Эти мероприятия представляли собой важный практический шаг на пути овладения сотрудниками ОИЯИ математическим обеспечением эксперимента ATLAS и навыками работы в Грид-среде, что имело принципиальное значение с точки зрения получения сотрудниками приоритетных физических результатов, представленных в п. 5.2.

Эти стратегически важные для ОИЯИ мероприятия не могли быть выполнены без участия сотрудников ЛИТ — директора В. В. Иванова, его заместителей П. В. Зрелова и В. В. Коренькова, а также Д. В. Белякова, Д. С. Голуба, Н. И. Громовой и др.

5.3.6. Рабочие совещания дубненской части коллаборации ATLAS. Начиная с 2004 г., два раза в год (в конце весны и перед самым Новым годом) проводились однодневные семинары-совещания дубненской части коллабо-



Рис. 5.40. Вверху: участники мероприятия в Грид-лаборатории ЛИТ 17 апреля 2008 г. Внизу: Н.И.Громова проводит практическое занятие по использованию команд в среде грид

рации ATLAS (рис. 5.41), специально посвященные вопросу участия ОИЯИ в физической программе эксперимента ATLAS и готовности сотрудников к анализу данных и получению физических результатов.

В них также практически постоянно участвовали коллеги из Минска, Гомеля, Москвы и Протвино. Всего было проведено 17 таких совещаний, они прекратились лишь в 2012 г., когда участники группы начали работать



Рис. 5.41. Участники одного из рабочих совещаний дубненской части коллаборации ATLAS. 2006 г.

с реальными данными, и актуальными остались лишь еженедельные рабочие совещания дубненской части коллаборации ATLAS, которые продолжаются и сейчас.

Помимо этого, с 2008 г. все российские участники коллаборации ATLAS собираются на традиционные совещания «Физика и компьютеринг ATLAS в России», которые проводятся в Москве, Протвино и Дубне.

6. ФИЗИКА НОВОГО ЭТАПА РАБОТЫ ATLAS. RUN-II LHC И ДАЛЕЕ

В продолжение работ, выполненных в 2009–2014 гг., и в соответствии с традициями прошлой Семилетней программы ОИЯИ [687] главная стратегическая задача ОИЯИ в области физики элементарных частиц состоит в том, чтобы путем полноценного участия в международных экспериментах ATLAS и CMS при энергии протонов 13–14 ТэВ (Run-II LHC) получить результаты фундаментальной важности относительно природы бозона Хиггса, структуры и свойств кварк-глюонной КХД-материи, существования «новой» физики на ТэВ-ном масштабе энергий, такой как суперсимметрия, дополнительные размерности пространства, новые типы частиц и взаимодействий и т. п. Решение главной стратегической задачи будет конкретизировано в виде ряда исследований, предложенных, как правило, сотрудниками группы ОИЯИ в эксперименте ATLAS.

В неполный список этих исследований входят: 1) поиск и изучение характеристик дополнительных экзотических (в том числе киральных) Z^* -, W^* -бозонов в двухструйных и двухлептонных процессах [518, 521, 522, 526, 528, 531, 532, 535, 536], 2) поиск возможных проявлений суперсимметрии в конечных состояниях с большим числом адронных струй, сопровождающихся образованием изолированных лептонов и большой недостающей энергией [477, 478, 632, 647], 3) поиск суперсимметричных заряженных бозонов Хиггса по ряду их конкретных распадов [688–690], 4) поиск проявлений валентноподобных непертурбативных компонент тяжелых кварков (intrinsic heavy flavors) в протоне на основе различных топологий конечных состояний [496, 509, 512, 513, 515], 5) поиск новых и изучение свойств известных мезонов и барионов, содержащих тяжелые c - и b -кварки [659, 663, 671, 691–693], 6) всестороннее изучение глюонной структуры протона [486, 488, 490], 7) изучение двухчастичных бозе-эйнштейновских корреляций в протон-протонных столкновениях при больших множественностях и энергиях [613] и т. п.

Помимо участия в этих работах сотрудники ОИЯИ продолжают выполнять свои обязательства в рамках штатной эксплуатации детектора ATLAS, обеспечивая безопасность и сменные дежурства в главной контрольной комнате, работая в качестве экспертов «по вызову», поддерживая и разрабатывая математическое обеспечение, осуществляя калибровку установки, контролируя качество данных и т. п., а также участвуя в работах по модернизации детектора.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2016 г. исполнилось 60 лет со дня основания Объединенного института ядерных исследований — международной межправительственной организации в области фундаментальных исследований по физике элементарных частиц, атомных ядер и конденсированного состояния вещества. 2017 год отмечен 25-летием участия ОИЯИ в работах по программе подготовки и эксплуатации эксперимента ATLAS.

Начиная с 2009 г. в ЦЕРН проходил первый этап (Run-I, до 2014 г.) работы Большого адронного коллайдера LHC при энергии сталкивающихся протонов $\sqrt{s} = 7\text{--}8$ ТэВ. Была успешно выполнена одна из самых главных задач создания коллайдера — открытие бозона Хиггса, недостающего и принципиально важного звена современной Стандартной модели физики элементарных частиц, которая, в свою очередь, была проверена в данной области энергий с беспрецедентной точностью. Наряду с этим было получено много других уникальных физических результатов. Это произошло благодаря стабильной работе многофункциональных детекторов ATLAS и CMS, в создании и эксплуатации которых принимал активное участие ОИЯИ.

В этой книге была предпринята попытка по возможности максимально полно описать вклад сотрудников ОИЯИ на всех этапах работ в эксперимент ATLAS — в проектирование, разработку, сборку, отладку, запуск и успешную эксплуатацию всех основных узлов установки ATLAS, а также в получение на ней физических результатов фундаментальной важности. По этому поводу все руководители коллаборации ATLAS (П. Йенни, Ф. Джиганотти и Д. Чарлтон) неоднократно утверждали, что без участия ОИЯИ создание и своевременный запуск установки ATLAS были бы невозможны.

Выполненные за прошедший период работы дали материал для 12 защищенных сотрудниками ОИЯИ кандидатских диссертаций — В. Бычковым (2006 г.), Г. Д. Кекелидзе (2007 г.), А. С. Ворожцовым (2007 г.), Н. Д. Топилиным (2009 г.), В. В. Мьялковским (2009 г.), Е. В. Храмовым (2009 г.), М. В. Ляблиным (2011 г.), А. А. Сапроновым (2013 г.), И. В. Елецких (2014 г.), А. Е. Ладыгиным (2015 г.), Ф. Ахмадовым (2016 г.) и С. Турчихиным (2016 г.). Еще как минимум две диссертации находятся в стадии завершения.

На основе полученных на LHC экспериментальных данных и решающего вклада сотрудников ОИЯИ за эти годы было опубликовано более 20 коллаборационных работ и представлено свыше 50 докладов на различных престижных международных конференциях и совещаниях, не считая бесчисленных рабочих совещаний в рамках коллаборации ATLAS.

В качестве эпилога отметим, что специальная конференция «25-летие участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS» состоялась в апреле 2017 г. в Черногоории (рис. 7.1). Открывая первую сессию конференции, Н. А. Русакович,



Рис. 7.1. Постер и участники конференции «25-летие участия ОИЯИ в эксперименте ATLAS»

возглавлявший «дубненскую команду» ATLAS в течение 20 лет, отметил роль многих коллег из разных стран мира, заложивших краеугольный камень в концепцию и реализацию всего проекта ATLAS. К большому сожалению, далеко не все из этих замечательных людей по разным причинам смогли принять участие в конференции.

В докладах Питера Йенни [359], Фридриха Дидака [694] и Дэвида Чарлтона [695], руководивших коллаборацией в разные годы (рис. 7.2), был прослежен весь «тернистый путь» создания установки ATLAS и было подчеркнуто, что сотрудники ОИЯИ внесли заметный, а порой и решающий вклад в разработку, конструирование, производство, сборку и запуск в эксплуатацию практически всех основных подсистем детектора ATLAS. В частности, Ф. Дидак отметил [694], что ОИЯИ, будучи основателем ATLAS, должен, безусловно, гордиться своим вкладом в проект ATLAS. Этот вклад особенно



Рис. 7.2. Питер Йенни (ЦЕРН), руководитель коллаборации ATLAS с 1992 по 2009 г. (слева); Дэвид Чарлтон (Бирмингемский университет), руководитель коллаборации с 2013 по 2017 г. (в центре); Фридрих Дидак (ЦЕРН), соруководитель коллаборации с 1992 по 1995 г. (справа)

ценен, если учесть, что первые годы создания установки ATLAS пришлись на политически и экономически очень трудное время в России, в том числе и для конкретных участников проекта.

Докладчики выразили уверенность в продолжении плодотворного сотрудничества ОИЯИ и ЦЕРН, не только в эксперименте ATLAS [147, 358, 695], но и в будущих совместных проектах, таких как FCC-hh и др. [358, 696].

Доклады сотрудников ОИЯИ Н. Д. Топилина [697] и И. А. Минашвили [568], О. В. Соловьянова из Протвино [147] (рис. 7.3) и др. были посвящены огромной работе над созданием адронного калориметра ATLAS, которая началась в ОИЯИ в феврале 1994 г.

Как известно, в установке ATLAS реализованы две сверхпроводящие магнитные системы. Внутренний детектор находится в однородном поле небольшого центрального соленоида, а мюонная система — в поле, создаваемом самой большой в мире системой сверхпроводящих воздушных тороидов. В докладе Г. тен Кате был особо подчеркнут вклад специалистов ОИЯИ в сборку и испытания всех тороидов на поверхности и в монтаж этих самых крупноразмерных элементов установки в подземном экспериментальном зале [358].

Одна из сессий конференции была посвящена разработкам прикладного характера, «выросшим» из технологий, используемых в эксперименте. Доклады по этой тематике были представлены Г. А. Шелковым, М. В. Ляблиным, А. С. Жемчуговым, С. А. Котовым и др. Предваряя их выступления, Н. А. Русакович напомнил о значительном вкладе коллег, к сожалению, уже ушедших от нас, — В. Д. Пешехонове (технологии строу-детекторов) и В. М. Котове (система удаленного контроля данных).

В лекции Д. И. Казакова [698] был прослежен впечатляющий путь физики частиц за 25 лет существования коллаборации ATLAS. Достиженные успехи



Рис. 7.3. Сотрудники ОИЯИ Н. Д. Топилин (слева) и И. А. Минашвили (в центре), О. Соловьянов (справа) из ИФВЭ НИЦ КИ (Протвино)

позволили существенно продвинуться в понимании наиболее фундаментальных процессов, происходящих в природе.

В заключительном слове была выражена глубокая благодарность сотрудникам ОИЯИ, внесшим вклад в создание установки ATLAS. Это А. Н. Сисакян, Ю. А. Будагов, Д. И. Хубуа, Г. А. Шелков, Г. Д. Алексеев, В. В. Кухтин, А. П. Чеплаков, Н. И. Зимин, М. Ю. Казаринов, Ю. А. Кульчицкий, В. М. Романов, В. Д. Пешехонов, В. М. Котов и многие-многие другие.

Двадцатипятилетие коллаборации ATLAS — это только середина намеченного пути. Предстоят еще несколько этапов модернизации детектора ATLAS и ускорителя LHC, что позволит получить новые, уникальные данные и сделать серьезные шаги в решении фундаментальных физических задач. ОИЯИ готов к этой важной и ответственной работе, здесь выросли замечательные молодые сотрудники, за ними — будущее.

Благодарности. В книге использованы материалы годовых отчетов ОИЯИ, а также ряда специализированных изданий, подготовленных отдельными сотрудниками.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в оформлении книги Т. А. Стриж (пп. 3.6 и 3.7), В. Ю. Батусову (пп. 3.3.4 и 5.1.3, рис. 3.42–3.49), Н. И. Зимину (п. 3.9 и рис. 3.108, 3.114), Н. Д. Топилину (рис. 3.32–3.36, 3.52 и ряд других из [699, 700]), П. Йенни (рис. 3.5, 3.59 и 3.60), С. Н. Шилову (рис. 3.57), Ю. А. Усову (рис. 3.64–3.67), Е. В. Пузыниной и Ю. А. Туманову (рис. 5.28, 5.30 и мн. др.).

Список литературы

1. *Понтекорво Б.* Физика элементарных частиц — дорогая вещь! Нужна ли она? // УФН. 1964. Т. 84. С. 729–732.
2. *Butterworth J.* The Standard Model: How Far Can It Go and How Can We Tell? // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 2016. V. 374, No. 2075. P. 20150260; arXiv:1601.02759.
3. *Mulders P.J.* The Roots of the Standard Model of Particle Physics. arXiv:1601.00300.
4. *Bednyakov V.A., Giokaris N.D., Bednyakov A.V.* On the Higgs Mass Generation Mechanism in the Standard Model // Phys. Part. Nucl. 2008. V. 39, No. 1. P. 13–36.
5. *Kazakov D.I.* Landscape View at the Edge of a Mystery // 3rd Large Hadron Collider Phys. Conf. (LHCP 2015), St. Petersburg, Russia, Aug. 31 – Sept. 5, 2015; arXiv:1511.09283.
6. *Sterman G.* Yang–Mills Theories at High Energy Accelerators // Intern. J. Mod. Phys. 2016. V. A31, No. 09. P. 1630005; arXiv:1602.02307.
7. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC // Phys. Lett. 2012. V. B716. P. 1–29; arXiv:1207.7214.
8. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.).* Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at the LHC // Phys. Lett. 2012. V. B716. P. 30–61; arXiv:1207.7235.
9. *Ellis J.* Summary and Outlook: 2015 Lepton-Photon Symposium // PoS. 2016. V. Lepton Photon 2015. P. 054; arXiv:1509.07336.
10. *Ellis J.* The Physics Landscape after the Higgs Discovery at the LHC // Nucl. Part. Phys. Proc. 2015. V. 267–269. P. 3–14; arXiv:1504.03654.
11. *Pich A.* ICHEP 2014 Summary: Theory Status after the First LHC Run // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 1–10; arXiv:1505.01813.
12. *Pich A.* Status after the First LHC Run: Looking for New Directions in the Physics Landscape // Nucl. Instr. Meth. A. 2015. No. 2; arXiv:1507.01250.
13. *Salam G.P.* Summary of the XXVII Rencontres de Blois: Particle Physics and Cosmology // 27th Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology, Blois, France, May 31 – June 5, 2015. arXiv:1509.07666.
14. *Bednyakov A.V., Kniehl B.A., Pikelner A.F., Veretin O.L.* Stability of the Electroweak Vacuum: Gauge Independence and Advanced Precision // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115, No. 20. P. 1–5; arXiv:1507.08833.
15. *Willmann L., Jungmann K.* Matter–Antimatter Asymmetry — Aspects at Low Energy // Ann. Phys. 2016. V. 528. P. 108–114; arXiv:1506.03001.
16. *Forte S., Nisati A., Passarino G., Tenchini R., Calame C.M.C., Chiesa M., Cobal M., Corcella G., Degrossi G., Ferrera G., Magnea L., Maltoni F., Montagna G., Nason P., Nicrosini O., Oleari C., Piccinini F., Riva F., Vicini A.* The Standard Model from LHC to Future Colliders // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, No. 11. P. 1–45; arXiv:1505.01279.

17. *Jenni P.* Update of the European Strategy for Particle Physics // Proc. 48th Rencontres de Moriond on Electroweak Interactions and Unified Theories, La Thuile, Italy, March 2–9, 2013. P. 413–418.
18. *Krammer M.* The Update of the European Strategy for Particle Physics // Phys. Scripta. 2013. V. T158. P. 014019.
19. *Aleksan R. et al. (European Strategy for Particle Physics Preparatory Group Collab.)*. Physics Briefing Book: Input for the Strategy Group to Draft the Update of the European Strategy for Particle Physics. CERN-ESG-005. Geneva: CERN, 2013.
20. *Ritz S. et al. (HEPAP Subcommittee Collab.)*. Building for Discovery: Strategic Plan for U.S. Particle Physics in the Global Context. USA, NSF, Fermi National Accelerator Laboratory, May, 2014.
21. *Asai S. et al.* The Final Report of the Subcommittee on Future Projects of High Energy Physics. J-PARC Report. KEK, Feb. 11, 2012.
22. *Csaki C., Grojean C., Terning J.* Alternatives to an Elementary Higgs // Rev. Mod. Phys. 2016. V. 88, No. 4. P. 045001; arXiv:1512.00468.
23. *Djouadi A.* Higgs Physics // PoS. 2015. V. CORFU2014. P. 018; arXiv:1505.01059.
24. *Kramer M., Muhlleitner M.* Higgs Physics // Nucl. Part. Phys. Proc. 2015. V. 261–262. P. 246–267; arXiv:1501.06658.
25. *Quigg C.* Particle Physics after the Higgs-Boson Discovery: Opportunities for the Large Hadron Collider // Contemp. Phys. 2016. V. 57, No. 2. P. 177–187; arXiv:1507.02977.
26. *Moortgat-Pick G. et al.* Physics at the e^+e^- Linear Collider // Eur. Phys. J. C. 2015. V. 75, No. 8. P. 371; arXiv:1504.01726.
27. *Fujii K. et al.* Physics Case for the International Linear Collider. arXiv:1506.05992.
28. *Sefkow F.* The Higgs Physics Programme at the International Linear Collider // Proc. 20th Intern. Conf. on Particles and Nuclei (PANIC 14), Hamburg, Germany, Aug. 24–29, 2014. P. 483–487; arXiv:1410.3246.
29. *Strube J.* The Higgs Physics Program at the International Linear Collider. arXiv:1511.00286.
30. *Spannowsky M., Stoll M.* Tracking New Physics at the LHC and Beyond // Phys. Rev. 2015. V. D92, No. 5. P. 054033; arXiv:1505.01921.
31. *Gripaios B.* Lectures on Physics beyond the Standard Model. 2015. arXiv:1503.02636.
32. *Ellis J.* Prospects for Supersymmetry at the LHC & Beyond // PoS. 2015. V. PLANCK2015. P. 041; arXiv:1510.06204.
33. *Nath P.* Supersymmetry after the Higgs // Ann. Phys. 2015; arXiv: 1501.0167.
34. *Tata X.* Supersymmetry: Aspirations and Prospects // Phys. Scripta. 2015. V. 90. P. 108001; arXiv:1506.07151.
35. *Bechtle P., Plehn T., Sander C.* Supersymmetry. arXiv:1506.03091.
36. *Ulmer K.A. (ATLAS, CMS Collab.)*. Supersymmetry: Experimental Status // 3rd Large Hadron Collider Phys. Conf. (LHCP 2015), St. Petersburg, Russia, Aug. 31 – Sept. 5, 2015; arXiv:1601.03774.
37. *Cakir A. (ATLAS, CMS Collab.)*. Prospects of New Physics Searches Using High Lumi-LHC // Next Steps in the Energy Frontier — Hadron Colliders (NSEFHC14), Batavia, IL, USA, Aug. 25–28, 2014; arXiv:1412.8503.
38. *Lyonnet F.* Intrinsic Bottom and Its Impact on Heavy New Physics at the LHC // EPJ Web Conf. 2016. V. 112. P. 03005; arXiv:1601.02856.

39. *Boos E., Brandt O., Denisov D., Denisov S., Grannis P.* The Top Quark (20 Years after Its Discovery) // *Phys. Usp.* 2015. V. 58, No. 12. P. 1133–1158; arXiv:1509.03325 [*Usp. Fiz. Nauk.* 2015. V. 185, No. 12. P. 1241].
40. *Kröniger K., Meyer A.B., Uwer P.* Top-Quark Physics at the LHC // *The Large Hadron Collider: Harvest of Run 1 / Ed. by Schorner-Sadenius T.* 2015. P. 259–300; arXiv:1506.02800.
41. *Westhoff S.* LHC Prospects for Asymmetric Top–Antitop Production // *PoS.* 2016. V. FFP14. P. 129; arXiv:1501.07477.
42. *Nason P.* Theory Summary // *PoS.* 2016. V. TOP2015. P. 056; arXiv:1602.00443.
43. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider // *JINST.* 2008. V. 3. P. S08003.
44. *Chatrchyan S. et al. (CMS Collab.).* The CMS Experiment at the CERN LHC // *JINST.* 2008. V. 3. P. S08004.
45. *Armstrong W.W. et al. (ATLAS Collab.).* ATLAS: Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN. CERN-LHCC-94-43. Geneva: CERN, 1994.
46. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report. ATLAS TDR 14-115, CERN/LHCC/99-14-15. Geneva: CERN, 1999.
47. *Cheplakov A.P., Kriushin A., Kukhtin V., Saint-Denis R.* Jet Cell Structures for the EAGLE Muon Spectrometer. CERN-ATL-MUON-92-006. Geneva: CERN, 1992.
48. *Cheplakov A.P., Kriushin A., Saint-Denis R.* Muon Production in a Single Pion Showering of (5–500) GeV/c Momenta Inside (8–14) Gamma Absorber. CERN-ATL-MUON-92-013. Geneva: CERN, 1992.
49. *Cheplakov A.P., Kriushin A., Kukhtin V., Saint-Denis R.* Muon Rates in ATLAS. CERN-ATL-MUON-93-021. Geneva: CERN, 1993.
50. *Cheplakov A.P., Kriushin A., Saint-Denis R.* Some Properties of Punchthrough Pions. CERN-ATL-MUON-93-022. Geneva: CERN, 1993.
51. *Russakovich N.A. et al.* Participation of Joint Institute for Nuclear Research in the ATLAS project at CERN LHC. Dubna: JINR, 1995. 36 p.
52. *Boiko I.R., Nikolaev K.V., Shelkov G.A.* A Study of Higgs Boson Decay $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ Based on Full Simulation of an ATLAS Detector // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2005. V. 2. P. 67–76; *Бойко И.Р., Николаев К.В., Шелков Г.А.* Исследование распадов хиггс-бозонов $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ на основе полного моделирования установки АТЛАС // *Письма в ЭЧАЯ.* 2005. Т. 2, № 2(125). С. 7–20.
53. *Leitner R. (ATLAS Collab.).* Status of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2005. V. 2. P. 102–109 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2005. V. 2, No. 2(125). P. 60–71].
54. *Bednyakov V., Khramov E., Russakovich N., Tonoyan A.* Measurement of the Top Quark Charge at the ATLAS Detector // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2007. V. 4. P. 491–496; ATL-COM-PHYS-2006-048. Geneva: CERN, 2006.
55. *Khramov E.V., Tonoyan A., Bednyakov V.A., Rusakovich N.A.* Search for t anti- t Resonances with the ATLAS Detector. arXiv:0705.2001; ATL-PHYS-INT-2007-010, ATL-COM-PHYS-2007-004. Geneva: CERN, 2007.
56. *Khramov E.V., Tonoyan A.N., Bednyakov V.A., Rusakovich N.A.* On the Possibility of the Search for Top-Antitop Resonances at LHC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5. P. 515–519; *Храмов Е.В., Тоноян А.Н., Бедняков В.А.,*

- Русакович Н. А.* О возможности поиска топ-анти топ-резонансов на LHC // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, № 6(148). С. 865–873.
57. *Khramov E. V., Tonoyan A. N., Bednyakov V. A., Rusakovich N. A.* Top Quark from the Tevatron to LHC // Phys. Part. Nucl. 2008. V. 39. P. 74–88.
58. *Bednyakov V. A., Rusakovich N. A.* JINR Participation in the ATLAS Physics Program // Fizika. 2008. V. B17. P. 47–56.
59. *Boldyrev A. S. et al.* The ATLAS Transition Radiation Tracker // Instr. Exp. Tech. 2012. V. 55. P. 323–334.
60. *Gusakov Yu. V. et al.* ATLAS TRT: Research & Design B-Type Module Mass Production // Phys. Part. Nucl. 2010. V. 41. P. 1–26.
61. *Gusakov Yu. V., Zhukov I. A., Lysan V. M., Myalkovsky V. V., Novgorodov A. F., Peshekhonov V. D.* Automated Stand Check of “B” Type TRT ATLAS Wheel Straw Detectors // Phys. Part. Nucl. Lett. 2006. V. 3. P. 206–210; *Гусаков Ю. В., Жуков И. А., Лысан В. М., Мялковский В. В., Новгородов А. Ф., Пешехонов В. Д.* Автоматизированная стендовая проверка кольцевых строу-детекторов типа «В» TRT ATLAS // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 3(132). С. 111–117.
62. *Boguslavsky I. V. et al.* Transition Radiation Detectors: “B” Trackers Manufactured at JINR for ATLAS LHC Inner Detector // Phys. Part. Nucl. Lett. 2006. V. 3. P. 201–205 [Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2006. V. 3, No. 3(132). P. 103–110].
63. *Batusov V., Budagov Yu., Flyagin V. B., Khubua Z., Lomakin Yu., Lyablin M., Rusakovich N., Shabalin D., Topilin N., Nessi M.* High Precision Laser Control of the ATLAS Tile-Calorimeter Module Mass Production at JINR // Part. Nucl., Lett. 2001. No. 2[105]. P. 33–40.
64. *Batusov V. Yu., Budagov Yu. A., Kulchitsky Yu. A., Lyablin M. V., Nessi M., Rusakovich N. A., Sisakian A. N., Topilin N. D., Khubua D. I.* ATLAS Hadron Tile Calorimeter: Experience in Prototype Construction and Module Mass Production // Phys. Part. Nucl. 2006. V. 37. P. 785–806.
65. *Adragna P. et al.* Testbeam Studies of Production Modules of the ATLAS Tile Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. 2009. V. A606. P. 362–394.
66. *Batusov V. et al.* The Module Nuclear Absorber of the ATLAS Hadron Calorimeter (an Experiment of Controlled Assembly on the Surface and Underground) // Phys. Part. Nucl. Lett. 2009. V. 6. P. 337–347.
67. *Adragna P. et al.* Measurement of Pion and Proton Response and Longitudinal Shower Profiles up to 20 Nuclear Interaction Lengths with the ATLAS Tile Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. 2010. V. A615. P. 158–181.
68. *Abdallah J. et al. (ATLAS Tile Calorimeter Collab.).* Mechanical Construction and Installation of the ATLAS Tile Calorimeter // JINST. 2013. V. 8. P. T11001.
69. *Abat E. et al. (ATLAS Collab.).* Study of Energy Response and Resolution of the ATLAS Barrel Calorimeter to Hadrons of Energies from 20 to 350 GeV // Nucl. Instr. Meth. 2010. V. A621. P. 134–150.
70. *Afonin A. et al. (ATLAS HiLum Endcap Collab.).* Relative Luminosity Measurement of the LHC with the ATLAS Forward Calorimeter // JINST. 2010. V. 5. P. P05005; arXiv:1005.1784.
71. *Abat E. et al. (ATLAS TRT Collab.).* The ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT) Proportional Drift Tube: Design and Performance // JINST. 2008. V. 3. P. P02013.
72. *Akesson T. et al. (RD6 Collab.).* The ATLAS TRT Straw Proportional Tubes: Performance at Very High Counting Rate // Nucl. Instr. Meth. 1995. V. A367. P. 143–153.

73. *Kekelidze G.D., Peshekhonov V.D.* Precision Track Detectors Based on Straw Drift Tubes // *Phys. Part. Nucl.* 2002. V. 33. P. 343–344 [*Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2002. V. 33. P. 669].
74. *Akesson T. et al.* Tracking Performance of the Transition Radiation Tracker Prototype for the ATLAS Experiment // *Nucl. Instr. Meth.* 2002. V. A485. P. 298–310.
75. *Lutsenko V.M., Myalkovsky V.V., Peshekhonov V.D.* Time-Amplitude Characteristics of Thin-Walled Drift Tubes (Straw) for Gas Mixtures ArCO₂ with Additives CF₄ and O₂ // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2006. V. 3. P. 273–279 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2006. V. 3, No. 5(134). P. 7–16].
76. *Abat E. et al.* The ATLAS TRT Electronics // *JINST.* 2008. V. 3. P. P06007.
77. *Golunov A.O. et al.* Automatic Quality Control System of the Installed Straws into TRT Wheels // *Part. and Nucl., Lett.* 2003. V. 2[117]. P. 46–51.
78. *Akesson T. et al.* Aging Studies for the ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT) // *Nucl. Instr. Meth.* 2003. V. A515. P. 166–179.
79. *Hawviller C., Almaeva L.S., Bychkov V.N., Golikov V.V., Kekelidze G.D., Lobastov S.P., Lushchikov V.I., Peshekhonov V.D.* Radiation Hardness of Polysulphone and Polycarbonate Elements for LHC Detectors. JINR Preprint E14-98-245. Dubna: JINR, 1998.
80. *Akesson T. et al.* An X-Ray Scanner for Wire Chambers // *Nucl. Instr. Meth.* 2003. V. A507. P. 622–635.
81. *Астабатьян Р.А., Бычков В.Н., Гебарт Р., Злобин Ю.Л., Кекелидзе Г.Д., Лобастов С.П., Лысан В.М., Мено К., Новиков Е.А., Пешехонов В.Д., Рябов А.В., Смирнов Л.М.* Разработка и исследование охлаждения детектора переходного излучения — трекера прямого направления установки ATLAS. Сообщ. ОИЯИ P13-96-472. Дубна: ОИЯИ, 1996.
82. *Astabatian R.A., Kekelidze G.D., Lobastov S.P., Peshekhonov V.D., Ryabov A.V., Smirnov L.M.* The Method of the Integral Measurement of the Straw Straightness. JINR, P13-98-270. Dubna: JINR, 1998.
83. *Golunov A.O., Grigalashvili N.S., Gusakov Yu.V., Kekelidze G.D., Livinsky V.V., Muravev S.V., Parzycki S.S., Peshekhonov V.D., Price M.J., Savenkov A.A.* An Automatic System for Controlling the Quality of Straws Installed in the ATLAS TRT Detector // *Nucl. Instr. Meth.* 2004. V. A524. P. 142–145.
84. *Akesson T. et al. (ATLAS TRT Collab.).* ATLAS Transition Radiation Tracker Test-Beam Results // *Nucl. Instr. Meth.* 2004. V. A522. P. 50–55.
85. *Abat E. et al. (ATLAS TRT Collab.).* The ATLAS TRT Barrel Detector // *JINST.* 2008. V. 3. P. P02014.
86. *Abat E. et al.* The ATLAS TRT End-Cap Detectors // *JINST.* 2008. V. 3. P. P10003.
87. *Abat E. et al.* Combined Performance Tests before Installation of the ATLAS Semiconductor and Transition Radiation Tracking Detectors // *JINST.* 2008. V. 3. P. P08003.
88. *Богуславский И.В., Кекелидзе Г.Д., Лысан В.М., Пешехонов В.Д., Савенков А.А.* Измерение натяжения составного анода сегментных тонкостенных дрейфовых трубок (строу). Сообщ. ОИЯИ P13-2007-129. Дубна: ОИЯИ, 2007.
89. *Davkov K.I., Myalkovskiy V.V., Peshekhonov V.D., Cholakov V.D.* Operating Mode of High Pressure Straws with High Spatial Resolution // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 269–273; arXiv:1309.1549.
90. *Davkov V., Davkov K., Myalkovskiy V.V., Naumann L., Peshekhonov V.D., Savenkov A.A., Viryasov K.S., Zhukov I.A.* Development of High Granulated

- Straw Chambers of Large Sizes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2007. V. 4. P. 323–326; arXiv:physics/0701133.
91. Жуков И. А., Левтеров К. А., Луценко В. М., Мялковский В. В., Науманн Л., Пешехонов В. Д. Исследования загрузочных способностей тонкопленочных дрейфовых трубок (строу). Препринт ОИЯИ P13-2005-126. Дубна: ОИЯИ, 2005.
 92. Astabatian R. A., Lobastov S. P., Madigozhin D. T., Peshekhonov V. D., Potrebenikov Yu. K. Some Optimization of the Transition Radiation Detector // Nucl. Instr. Meth. 2001. V. A457. P. 101–106.
 93. Akesson T. et al. (ATLAS TRT Collab.). An Alignment Method for the ATLAS End-Cap TRT Detector Using a Narrow Monochromatic X-Ray Beam // Nucl. Instr. Meth. 2001. V. A463. P. 129–141.
 94. Akesson T. et al. (ATLAS TRT Collab.). Straw Tube Drift-Time Properties and Electronics Parameters for the ATLAS TRT Detector // Nucl. Instr. Meth. 2000. V. A449. P. 446–460.
 95. Астабатян Р. А., Лобастов С. П., Мадигожин Д. Т., Пешехонов В. Д., Потребеников Ю. К. Расчет и оптимизация детектора РПИ на основе строу. Сообщ. ОИЯИ P13-99-100. Дубна: ОИЯИ, 1999.
 96. Bychkov V. N., Kekelidze G. D., Ivanov A. B., Livinsky V. V., Lobastov S. P., Lysan V. M., Mishin S. V., Peshekhonov V. D. Some Characteristics of the Straw Drift Tubes. JINR Preprint E13-98-209. Dubna: JINR, 1998.
 97. Astabatyian R. A. et al. Measurements of Gas Cooling of the TRT End-Cap Straws. CERN-ATL-INDET-97-170. Geneva: CERN, 1997.
 98. Bychkov V. N., Kekelidze G. D., Lobastov S. P., Lysan V. M., Muravev S. V., Novikov E. A., Peshekhonov V. D., Chizhov A. V. Spatial Resolution of Straw Detectors with Cathode Readout // Instr. Exp. Tech. 1998. V. 41, No. 3. P. 315–319.
 99. Bychkov V. N., Kekelidze G. D., Novikov E. A., Peshekhonov V. D., Shafranov M. D., Zhiltsov V. E. Cathode Readout with Stripped Resistive Drift Tubes // Nucl. Instr. Meth. 1995. V. A367. P. 276–279.
 100. Davkov K. et al. Development of Segmented Straws for very High-Rate Capability Coordinate Detector // Nucl. Instr. Meth. 2008. V. A584. P. 285–290.
 101. Peshekhonov V. D. Coordinate Detectors Based on Thin-Wall Drift Tubes // Phys. Part. Nucl. 2015. V. 46, No. 1. P. 94–122.
 102. Vasilyev S. E., Makankin A. M., Myalkovskiy V. V., Peshekhonov V. D. A Direct Time Measurement Technique for Determining the Longitudinal Coordinate in Thin-Walled Drift Tubes // Instr. Exp. Tech. 2014. V. 57, No. 5. P. 558–563.
 103. Budagov Yu. A. et al. ATLAS Barrel Hadron Calorimeter: Tooling Design Description for Module Assembly. JINR Commun. E13-95-467. Dubna: JINR, 1995.
 104. Budagov Yu. A. et al. ATLAS Barrel Hadron Calorimeter: JINR Group Activity (July–September 1995). JINR, E13-95-500. Dubna: JINR, 1995.
 105. Budagov Yu. A. et al. ATLAS Barrel Hadron Calorimeter: Module Assembly and Tooling Design Description. JINR Commun. E13-95-254. Dubna: JINR, 1995.
 106. Budagov Yu. A. et al. ATLAS Barrel Hadron Calorimeter Module Design. JINR Commun. E13-95-20. Dubna: JINR, 1995.
 107. Topilin N. D., Romanov V. M. TILE Calorimeter Module Assembly. JINR-DUBNA Group Proposal. CERN-ATL-TILECAL-94-021. Geneva: CERN, 1994.
 108. Budagov Yu. A. et al. ATLAS Tile Hadron Calorimeter Module Assembly Design. CERN-ATL-TILECAL-94-036. Geneva: CERN, 1994.

109. *Abdallah J. et al. (ATLAS TileCal Collab.)*. Design, Construction and Installation of the ATLAS Hadronic Barrel Scintillator-Tile Calorimeter. ATL-TILECAL-PUB-2008-001. Geneva: CERN, 2008.
110. *Abdallah J. et al. (ATLAS TileCal Collab.)*. The Production and Qualification of Scintillator Tiles for the ATLAS Hadronic Calorimeter. ATL-TILECAL-PUB-2007-010. Geneva: CERN, 2007.
111. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Expected Performance of the ATLAS Experiment – Detector, Trigger and Physics. arXiv:0901.0512.
112. *Agnvall S. et al. (ATLAS Collab.)*. Evaluation of FERMI Readout of the ATLAS Tilecal Prototype // Nucl. Instr. Meth. 1998. V. A403. P. 98–114.
113. *Alikov B. et al.* Recent Advances in Precision Laser Cutting for the ATLAS Hadron Calorimeter Absorbers Production. JINR, E13-95-515. Dubna: JINR, 1995.
114. *Alikov B. et al.* Absorber Plates Precision Laser Cutting for ATLAS Hadron Barrel Calorimeter Module-0. ATLAS note, ATL-TileCal-96-074. Geneva: CERN, 1996.
115. *Chirikov-Zorin I. E., Pukhov O. E.* On Sensitivity of Gas Discharge Detectors to Light // Nucl. Instr. Meth. 1996. V. A371. P. 375–379.
116. *Budagov Yu. A. et al.* ATLAS Barrel Hadron Calorimeter: 0 Module Assembly Technology. JINR, E13-97-23. Dubna: JINR, 1997.
117. *Ajaltouni Z. et al.* Response of the ATLAS Tile Calorimeter Prototype to Muons // Nucl. Instr. Meth. 1997. V. A388. P. 64–78.
118. *Berger E. L. et al. (RD34 Collab.)*. A Measurement of the Energy Loss Spectrum of 150-GeV Muons in Iron // Z. Phys. 1997. V. C73. P. 455–463.
119. *Ajaltouni Z. et al. (ATLAS Collab.)*. Results from a Combined Test of an Electromagnetic Liquid Argon Calorimeter with a Hadronic Scintillating Tile Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. 1997. V. A387. P. 333–351.
120. *Budagov Yu. A. et al.* Russian Contribution for CERN Collider // Nature. 1996. V. 382. P. 288.
121. *Alikov B. A. et al.* Metrological Inspection of Modules of Hadron Calorimeter for ATLAS Detector. CERN-ATL-TILECAL-97-123. Geneva: CERN, 1997.
122. *Budagov Yu. A., Kulchitsky Yu. A., Lebedev A., Lomakin Yu. F., Romanov V. M., Rusakovich N. A., Shchelchikov A. S., Sisakian A. N., Sorokina Yu. A., Topilin N. D.* Some Auxiliary Technology Equipment for ATLAS Hadron Calorimeter Module and Submodule Manipulations and the Quality Control of the Assembled Module. JINR, E13-97-22. Dubna: JINR, 1997; TILE-CAL-96-90. Geneva: CERN, 1996.
123. *Budagov Yu. A. et al.* Radioactive Sources for ATLAS Hadron Tile Calorimeter Calibration. JINR, E13-97-104. Dubna: JINR, 1997.
124. *Alikov B. A. et al.* ATLAS Barrel Hadron Calorimeter: General Manufacturing Concepts for 300 000 Absorber Plates Mass Production. JINR, E13-98-135. Dubna: JINR, 1998.
125. *Artikov A. M. et al.* ATLAS Barrel Hadron Tile Calorimeter: Spacers Plates Mass Production. JINR, E1-99-79. Dubna: JINR, 1999; ATL-TILECAL-99-014. Geneva: CERN, 1999.
126. *Batusov V. Yu., Budagov Yu. A., Flyagin V. B., Khubua Z. I., Lomakin Yu. F., Lyablin M. V., Rusakovich N. A., Topilin N. D.* Development of Laser Measurements at the ATLAS Tile Calorimeter Module Production. JINR, E13-2001-257. Dubna: JINR, 2001.
127. *Blocki J., Guarino V., Miralles L., Topilin N. D.* Study, Evaluation and Test of Submodule to Girder Bolted Joint. ATL-TILECAL-2000-007. Geneva: CERN, 2000.

128. Назаренко М. А., Никонов Э. Г., Старцев А. В. Использование OBJECTIVITY/DВ для создания объектно-ориентированной базы данных по submodule tile-калориметра проекта ATLAS. Сообщ. ОИЯИ P10-2000-315. Дубна: ОИЯИ, 2000.
129. *Batusov V. et al.* Comparison of ATLAS Tilecal Module No.8 High Precision Metrology Measurement Results Obtained by Laser (JINR) and Photogrammetric (CERN) Methods // Part. Nucl., Lett. 2002. No.4[113]. P. 36–50.
130. Батусов В. Ю., Будагов Ю. А., Кульчицкий Ю. А., Ляблин М. В., Несси М., Русакович Н. А., Сисакян А. Н., Топилин Н. Д., Хубуа Д. Адронный тайл-калориметр установки ATLAS: опыт создания прототипов и массового производства модулей // ЭЧАЯ. 2006. Т. 37, вып. 5. С. 1484–1522; препринт ОИЯИ P13-2005-130. Дубна: ОИЯИ, 2005.
131. *Batusov V. Yu. et al.* Development and Application of High-Precision Metrology for the ATLAS Tile-Calorimeter Construction. (Pre-Assembly Experience and Lessons). JINR Preprint E13-2004-177. Dubna: JINR, 2004.
132. *Abdallah J. et al. (ATLAS TileCal Collab.)*. The Optical Instrumentation of the ATLAS Tile Calorimeter // JINST. 2013. V. 8. P. P01005.
133. *Chirikov-Zorin I., Fedorko I., Menzione A., Pikna M., Sykora I., Tokar S.* Method for Precise Analysis of the Metal Package Photomultiplier Single Photoelectron Spectra // Nucl. Instr. Meth. 2001. V. A456. P. 310–324.
134. *Chirikov-Zorin I. E., Fedorko I., Menzione A., Sykora I., Tokar S.* Precise Analysis of the Metal Package Photomultiplier Single Photoelectron Spectra // Nucl. Instr. Meth. 2001. V. A461. P. 587–391.
135. Будагов Ю. А., Пухов О. Е., Чириков-Зорин И. Е., Инкагли М., Леоне С., Мензоне А., Токар С. Большие сцинтилляционные счетчики со световодами из спектросмещающих волокон. Препринт ОИЯИ P13-98-304. Дубна: ОИЯИ, 1998.
136. *Proudfoot J., Batousov V., Liablin M. V., Topilin N. D.* Tile Calorimeter — Pre-Assembly Summary and Barrel Assembly Plan. ATL-TILECAL-2004-004, CERN-ATL-COM-TILECAL-2004-002. Geneva: CERN, 2004.
137. *Adragna P. et al.* The ATLAS Hadronic Tile Calorimeter: From Construction toward Physics // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 1275–1281.
138. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Readiness of the ATLAS Tile Calorimeter for LHC Collisions // Eur. Phys. J. 2010. V. C70. P. 1193–1236; arXiv:1007.5423.
139. *Batusov V. Yu., Lyablin M. V., Topilin N. D.* Development and Application of the Complex Hardware/Software System for Controlled Assembly of the ATLAS Hadron Tile Calorimeter // Phys. Part. Nucl. 2011. V. 42. P. 438–459.
140. *Alves J. et al.* A New Portable Test Bench for the ATLAS Tile Calorimeter Front-End Electronics Certification // Proc. 3rd Intern. Conf. of Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and Their Applications (ANIMMA 2013). 2013.
141. *Carrio F. et al.* Design of an FPGA-Based Embedded System for the ATLAS Tile Calorimeter Front-End Electronics Test-Bench // JINST. 2014. V. 9. P. C03023.
142. *Solans C. et al. (ATLAS Tile Calorimeter System Collab.)*. Computing Challenges in the Certification of ATLAS Tile Calorimeter Front-End Electronics during Maintenance Periods // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 513. P. 012035.
143. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Studies of the Performance of the ATLAS Detector Using Cosmic-Ray Muons // Eur. Phys. J. 2011. V. C71. P. 1593; arXiv:1011.6665.
144. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Performance of the ATLAS Detector Using First Collision Data // JHEP. 2010. V. 09. P. 056; arXiv:1005.5254.

145. *Artikov A., Chokheli D., Huston J., Miller B., Nessi M.* Minimum Bias Scintillator Counter Geometry. Technical Report AT-GE-ES-0001. Geneva: CERN, 2004.
146. *Артиков А., Будагов Ю., Гринев Б., Жмурич П.* Детекторы ОИЯИ на основе украинских пластмассовых сцинтилляторов в экспериментах на ускорителях ТэВ-диапазона. Дубна: Экспресс-Типография, 2013.
147. *Solovyanov O.* ATLAS Tile Calorimeter Performance in LHC Run-II and Upgrades for HL-LHC. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
148. *Sidoti A. (ATLAS TDAQ Collab.).* Minimum Bias Trigger Scintillators in ATLAS Run II // JINST. 2014. V. 9, No. 10. P. C10020.
149. *Hoffmann M. (ATLAS Collab.).* Commissioning and Initial LHC Run-2 Operation of the ATLAS Minimum Bias Trigger Scintillators // Nucl. Instr. Meth. 2016. V. A824. P. 24–26.
150. *Budagov Yu. A., Kulchitsky Yu. A., Vinogradov V. B., Nessi M., Bogush A. A., Arkadov V. V., Karapetian G. V.* Electron Response and e/h Ratio of ATLAS Barrel Hadron Prototype Calorimeter. JINR, E1-95-513. Dubna: JINR, 1995.
151. *Kulchitsky Y. A., Budagov J. A., Vinogradov V. B., Nessi M., Bogush A. A., Arkadov V. V., Karapetian G. V.* Electron Response and e/h Ratio of Iron Scintillator Hadron Prototype Calorimeter with Longitudinal TILE Configuration. arXiv:hep-ex/9903050.
152. *Astvatsaturov A., Budagov Yu., Shigaev V., Bosman M., Nessi M., Pantea D.* Separation of Gluon Jets and b Jets with a Low $p(T)$ Muon Using ATLAS Tile Calorimeter Simulation Data and Artificial Neural Networks Technique // Nucl. Instr. Meth. 1997. V. A389. P. 199–200.
153. *Budagov Yu. A., Kulchitsky Y. A., Rumyantsev V. S., Rusakovich N. A., Vinogradov V. B., Nessi M.* Study of the Hadron Shower Profiles with the ATLAS Tile Hadron Calorimeter. arXiv:hep-ex/9903052.
154. *Stavina P., Tokar S., Budagov Yu. A., Chirikov-Zorin I., Pantea D.* Influence of Inhomogeneities in Scintillating Fibre Electromagnetic Calorimeter on Its Energy Resolution // JINR Rapid Commun. 1998. V. 2[88]-98. P. 37–50.
155. *Kulchitsky Yu. A., Vinogradov V. B.* Analytical Representation of the Longitudinal Hadronic Shower Development // Nucl. Instr. Meth. 1998. V. A413. P. 484–486; arXiv:hep-ex/9903019.
156. *Kulchitsky Y. A., Kuzmin M. V.* Noncompensation of the Barrel Combined Calorimeter Prototype. arXiv:hep-ex/9911007.
157. *Cobal M. et al.* Analysis Results of the April 1996 Combined Test of the LArgon and TILECAL Barrel Calorimeter Prototypes. CERN-ATL-TILECAL-98-168. Geneva: CERN, 1998.
158. *Kulchitskii Y. A., Vinogradov V. B.* Analytical Representation of the Longitudinal Hadronic Shower Development. CERN-ATL-TILECAL-98-153. Geneva: CERN, 1998.
159. *Bosman M., Kulchitsky Y., Nessi M.* Charged Pion Energy Reconstruction in the ATLAS Barrel Calorimeter. arXiv:hep-ex/0002033.
160. *Akhmadaliev S. et al. (ATLAS Collab.).* Results from a New Combined Test of an Electromagnetic Liquid Argon Calorimeter with a Hadronic Scintillating-Tile Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. 2000. V. A449. P. 461–477.
161. *Kulchitsky Y. A., Kuzmin M. V., Vinogradov V. B.* The e/h Method of Energy Reconstruction for Combined Calorimeter. arXiv:hep-ex/9912014.

162. *Airapetian A. et al. (ATLAS Collab.)*. ATLAS: Detector and Physics Performance Technical Design Report. V.1. CERN-LHCC-99-14, ATLAS-TDR-14. Geneva: CERN, 1999.
163. *Amaral P. et al. (ATLAS Tilecal Collab.)*. Hadronic Shower Development in Iron Scintillator Tile Calorimetry // Nucl. Instr. Meth. 2000. V. A443. P. 51–70; arXiv:hep-ex/9904032.
164. *Kulchitsky Y.A., Kuzmin M.V., Vinogradov V.B.* Longitudinal Hadronic Shower Development in a Combined Calorimeter. arXiv:hep-ex/9912028.
165. *Kulchitsky Y.A., Vinogradov V.B.* Noncompensation of the Barrel TILE Hadron Module 0 Calorimeter. arXiv:hep-ex/9903054.
166. *Kulchitsky Y.A., Kuzmin M.V., Vinogradov V.B.* Noncompensation of an Electromagnetic Compartment of a Combined Calorimeter. arXiv:hep-ex/9911033.
167. *Budagov J.A., Kulchitsky Y.A., Kuzmin M.V., Vinogradov V.B.* The e/h Ratio of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter. arXiv:hep-ex/0104046.
168. *Budagov J.A., Kulchitsky Y.A., Kuzmin M.V., Vinogradov V.B.* The e/h Ratio of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter. JINR Preprint E1-2002-13. Dubna: JINR, 2002.
169. *Akhmadaliev S. et al. (ATLAS Collab.)*. Hadron Energy Reconstruction for the ATLAS Calorimetry in the Framework of the Nonparametrical Method // Nucl. Instr. Meth. 2002. V. A480. P. 508–523; arXiv:hep-ex/0104002.
170. *Kulchitsky Y.A.* On the e/h Ratio of the Electromagnetic Calorimeter // Part. Nucl., Lett. 2000. No. 3[100]. P. 28–34; arXiv:hep-ex/0005029.
171. *Kulchitsky Y.A., Kuzmin M.V., Budagov J.A., Vinogradov V.B., Nessi M.* Hadron Energy Reconstruction for the ATLAS Barrel Prototype Combined Calorimeter in the Framework of the Nonparametrical Method. arXiv:hep-ex/0004009.
172. *Kulchitsky Yu.A.* Hadron Energy Reconstruction for ATLAS Barrel Combined Calorimeter Using Non-Parametrical Method. JINR Preprint E1-2000-260. Dubna: JINR, 2000.
173. *Kulchitsky Y.A., Vinogradov V.B.* On the Parameterization of the Longitudinal Hadronic Shower Profiles in Combined Calorimetry // Nucl. Instr. Meth. 2000. V. A455. P. 499–501; arXiv:hep-ex/0001027.
174. *Kulchitsky Y.A. (TILECAL Collab.)*. Hadronic Shower Development in Tile Iron Scintillator Calorimetry // Calorimetry in High Energy Physics. Proc. 8th Intern. Conf., CALOR'99, Lisbon, Portugal, June 13–19, 1999. P. 480–490; arXiv:hep-ex/9910015.
175. *Kulchitsky Yu.* ATLAS Calorimeter Performance for Charged Pion // Part. Nucl., Lett. 2000. No. 2[99]. P. 52–61.
176. *Amaral P. et al. (ATLAS TileCal Collab.)*. A Precise Measurement of 180-GeV Muon Energy Losses in Iron // Eur. Phys. J. 2001. V. C20. P. 487–495.
177. *Kulchitskii Y.A., Kuzmin M.V., Vinogradov V.B.* Electron Calibration of the TILECAL Module Cells. CERN-ATL-TILECAL-2001-002. Geneva: CERN, 2001.
178. *Budagov Yu.A., Khubua Z.I., Kulchitsky Yu.A., Rusakovich N.A., Vinogradov V.B., Stanek R.* Electron and Pion Calibrations of the ATLAS TILECAL Modules (September 2001 Test Beam). JINR, E1-2003-22. Dubna: JINR, 2003.
179. *Kulchitsky Yu.A., Vinogradov V.B.* Innovative Energy Reconstruction Algorithm for Hadron Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. 2003. V. A502. P. 708–709.

180. *Kulchitsky Yu. A., Vinogradov V. B.* Statistical Multidimensional Separation of the Electron and Pion Events in the Iron-Scintillator Hadronic Calorimeter // Nucl. Instr. Meth. 2003. V. A502. P. 775–777.
181. *Kulchitskii Y. A., Sutiak J., Tokar S., Zenis T.* New Method of Fast Simulation for a Hadron Calorimeter Response // Part. Nucl., Lett. 2003. V. 2[117]. P. 52–70.
182. *Alexa C. et al.* A Measurement of the Photonuclear Interactions of 180-GeV Muons in Iron // Eur. Phys. J. 2003. V. C28. P. 297–304.
183. *Kulchitskii Y. A., Vinogradov V. B.* Performances of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter Modules for Electrons and Pions. CERN-ATL-COM-TILECAL-2004-009. Geneva: CERN, 2004.
184. *Kulchitskii Y. A., Budagov Y. A., Khubua J. I., Rusakovitch N. A., Tsiareshka P. V., Vinogradov V. B.* Electromagnetic Energy Calibration of the TILECAL Modules with the Flat Filter Method (July 2002 Test Beam Data). CERN-ATL-COM-TILECAL-2005-006. Geneva: CERN, 2005.
185. *Kulchitskii Y. A., Tsiareshka P. V., Vinogradov V. B.* Energy Calibration of the TILECAL Modules with the Fit Filter Method (July 2002 Test Beam Data). ATL-TILECAL-PUB-2005-005. Geneva: CERN, 2005.
186. *Kulchitskii Y. A., Tsiareshka P. V., Vinogradov V. B.* Electron Energy Resolution of the ATLAS TILECAL Modules with Fit Filter Method (July 2002 Test Beam). ATL-TILECAL-PUB-2006-004. Geneva: CERN, 2006. 48 p.
187. *Henriques A. M., Budagov J. A., Khorauli G. D., Khubua Z. I., Kulchitsky Yu. A., Rusakovitch N. A., Tsiareshka P. V., Vinogradov V. B.* Study of the Transition Effect with the ATLAS Tile Calorimeter. CERN-ATL-COM-TILECAL-2006-007. Geneva: CERN, 2006. 32 p.
188. *Budagov Y. A., Khorauli G. D., Khubua J., Khukhunaishvili A., Kulchitskii Y. A., Solodkov A.* Study of TileCal Sampling Fraction for Improvement of Monte-Carlo Data Reconstruction. CERN-ATL-COM-TILECAL-2006-008. Geneva: CERN, 2006.
189. *Kulchitskii Y. A., Tokar S., Vinogradov V. B.* Study of the ATLAS Hadronic Tile Calorimeter Non-Compensation Sensitivity. CERN-ATL-TILECAL-PUB-2006-002. Geneva: CERN, 2006. 9 p.
190. *Kulchitsky Yu. A. et al.* Electromagnetic Cell Level Calibration for ATLAS Tile Calorimeter Modules. CERN-ATL-TILECAL-PUB-2007-001. Geneva: CERN, 2007. 82 p.
191. *Budagov Yu. A., Davidek T., Kulchitsky Yu. A., Lovas L., Rusakovitch N. A., Sykora I., Tokar S., Zenis T.* Study of the Selection Criteria Impact on the e/h Ratio Measurement in Tile Calorimeter. ATL-TILECAL-INT-2008-001; ATL-COM-TILECAL-2007-004. Geneva: CERN, 2007. 14 p.
192. *Kulchitsky Y., Tsiareshka P., Khubua J., Russakovich N., Shigaev V., Vinogradov V.* Pion Energy Reconstruction by the Local Hadronic Calibration Method with ATLAS Combined Test Beam 2004 Data. ATL-TILECAL-PUB-2008-009. Geneva: CERN, 2008.
193. *Khramov E., Bednyakov V., Budagov I., Rusakovich N., Carli T., Henriques A., Giangiobbe V., Liang Z., Santoni C., Simonyan M.* Study of the Response of the Hadronic Barrel Calorimeter in the ATLAS Combined Test-Beam to Pions of Energies from 20 GeV to 350 GeV for Beam Impact Points from 0.2 to 0.65. ATL-TILECAL-PUB-2009-007. Geneva: CERN, 2009.
194. *Abat E. et al.* Study of the Response of the ATLAS Central Calorimeter to Pions of Energies from 3 to 9 GeV // Nucl. Instr. Meth. 2009. V. A607. P. 372–386.

195. *Budagov J. A., Khubua J. I., Kulchitsky Yu. A., Russakovich N. A., Shigaev V. N., Tsiareshka P. V.* Artificial Neural Networks for Reconstruction of Energy Losses in Dead Materials between Barrel LAr and Tile Calorimeters: Exploration and Results. ATL-TILECAL-PUB-2008-006. Geneva: CERN, 2008.
196. *Anderson K.J. et al.* Calibration of ATLAS Tile Calorimeter at Electromagnetic Scale. ATL-TILECAL-PUB-2009-001. Geneva: CERN, 2009.
197. *Batusov V., Budagov J., Lyablin M., Gayde J.-C., Girolamo B., Mergelkuhl D., Nessi M.* The Laser Reference Line Method and Its Comparison to a Total Station in an ATLAS Like Configuration // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 3. P. 299–308.
198. *Budagov J., Glagolev V., Lyablin M., Shirkov G., Mainaud Durand H., Stern G.* A Laser Based Fiducial Line for High Precision Multipoint Alignment System // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 286–293.
199. *Oberlack H. et al.* Study of the TGT Concept for Liquid Argon Calorimetry: Status Report. CERN-DRDC-94-8, CERN-RD-33-STATUS-REPORT. Geneva: CERN, 1994.
200. *Berger C. et al. (RD33 Collab.).* Study of a Novel Electromagnetic Liquid Argon Calorimeter TGT // *Nucl. Instr. Meth.* 1995. V. A357. P. 333–343.
201. *Berger C. et al.* Study of a Novel Concept for a Liquid Argon Calorimeter. The Thin Gap Turbine (TGT). CERN-DRDC-93-2, CERN-DRDC-P45. Geneva: CERN, 1993.
202. *Berger C. et al.* A Highly Segmented and Compact Liquid Argon Calorimeter for the LHC: The TGT Calorimeter. CERN-DRDC-92-41, CERN-DRDC-P44. Geneva: CERN, 1992.
203. *Airapetian A. et al. (ATLAS Collab.).* ATLAS Calorimeter Performance Technical Design Report. CERN-LHCC-96-40. Geneva: CERN, 1996.
204. *Cheplakov A. P. et al.* Energy Resolution of the HEC Prototype from the Pion'96 Data. ATL-LARG-98-097. Geneva: CERN, 1998.
205. *Kiryunin A. E., Mekhdiyev R. R., Metreveli Z., Salihagic D.* Jet Energy Measurements in the End-Cap Region of ATLAS. ATLAS HEC Note-047. Geneva: CERN, 1998.
206. *Dowler B. et al. (ATLAS Liquid Argon HEC Collab.).* Performance of the ATLAS Hadronic End-Cap Calorimeter in Beam Tests // *Nucl. Instr. Meth.* 2002. V. A482. P. 94–124.
207. *Cojocarui C. et al. (ATLAS Liquid Argon EMEC/HEC Collab.).* Hadronic Calibration of the ATLAS Liquid Argon End-Cap Calorimeter in the Pseudorapidity Region $1.6 < |\eta| < 1.8$ in Beam Tests // *Nucl. Instr. Meth.* 2004. V. A531. P. 481–514; arXiv:physics/0407009.
208. *Buchanan N.J. et al.* Radiation Qualification of the Front-End Electronics for the Readout of the ATLAS Liquid Argon Calorimeters // *JINST.* 2008. V. 3. P. P10005.
209. *Ban J. et al.* Radiation Hardness Tests of GaAs Amplifiers Operated in Liquid Argon in the ATLAS Calorimeter // *Nucl. Instr. Meth.* 2008. V. A594. P. 389–394.
210. *Pinfold J. et al.* Performance of the ATLAS Liquid Argon Endcap Calorimeter in the Pseudorapidity Region $2.5 < |\eta| < 4.0$ in Beam Tests // *Nucl. Instr. Meth.* 2008. V. A593. P. 324–342.
211. *Gingrich D.M. et al.* Construction, Assembly and Testing of the ATLAS Hadronic End-Cap Calorimeter // *JINST.* 2007. V. 2. P. P05005.

212. *Ahmadov A.I., Bystritskiy Yu.M., Kuraev E.A., Zemljanaja E., Shishkina T.V.* Measuring C-Odd Correlations at Lepton-Proton and Photon-Proton Collisions // *J. Phys.* 2007. V. G34. P. 353–364; arXiv:hep-ph/0606004.
213. *Abreu H. et al.* Performance of the Electronic Readout of the ATLAS Liquid Argon Calorimeters // *JINST.* 2010. V. 5. P. P09003.
214. *Pinfold J. et al. (ATLAS Liquid Argon Endcap Collab.)*. Evaluation of the Local Hadronic Calibration with Combined Beam-Test Data for the Endcap and Forward Calorimeters of ATLAS in the Pseudorapidity Region $2.5 < |\eta| < 4.0$ // *Nucl. Instr. Meth.* 2012. V. A693. P. 74–97.
215. *Kukhtin V. (HiLum ATLAS Liquid Argon Endcap Collab.)*. Liquid Argon Calorimeter Performance at High Rates // *Proc. 13th ICATPP Conf. on Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications (ICATPP 2011)*. Geneva: CERN, 2012. P. 775–779.
216. *Glatte A. et al. (ATLAS Liquid Argon Endcap Collab.)*. Liquid Argon Calorimeter Performance at High Rates // *Nucl. Instr. Meth.* 2012. V. A669. P. 47–65.
217. *Cheplakov A.* Irradiation Tests and Expected Performance of Readout Electronics of the ATLAS Hadronic Endcap Calorimeter for the HL-LHC // *PoS.* 2014. V. TIPP2014. P. 344.
218. *Ban J. et al.* Radiation Hardness Tests of GaAs Amplifiers for Liquid Argon Calorimetry. JINR, E13-95-222. Dubna: JINR, 1995.
219. *Golikov V.V., Kaskanov G.Ya., Kulagin E.N., Kukhtin V.V., Florian E.L., Lepua K., Lushchikov V.I., Cheplakov A.P., Shabalina E.P.* Large Scale Samples Irradiation Facility at the IBR-2 Reactor // *Nucl. Instr. Meth.* 1998. V. A411. P. 330–336.
220. *Braunschweig W. et al.* Radiation Hardness Tests of Electronics for LAr Calorimeter. JINR, E13-96-356. Dubna: JINR, 1996.
221. *Braunschweig W. et al. (RD33 Collab.)*. Performance of the TGT Liquid Argon Calorimeter and Trigger System // *Nucl. Instr. Meth.* 1996. V. A378. P. 479–494.
222. *Airapetian A. et al. (ATLAS Collab.)*. ATLAS Liquid Argon Calorimeter: Technical Design Report. CERN-LHCC-96-41. Geneva: CERN, 1996.
223. *Leroy C., Cheplakov A.P., Golikov V., Golubykh S., Kukhtin V., Kulagin E., Lushchikov V., Minashkin V., Shalyugin A.* Irradiation Tests of Readout Chain Components of the ATLAS Liquid Argon Calorimeters // *Part. Nucl., Lett.* 2000. No. 5[102]. P. 20–24.
224. *Leroy C., Cheplakov A.P., Golikov V., Golubykh S.M., Kukhtin V., Kulagin E., Lushchikov V., Merkulov L., Minashkin V.F., Shalyugin A.N.* Irradiation Tests of ATLAS Liquid Argon Forward Calorimeter (FCAL) Electronics Components. ATL-LARG-2002-003. Geneva: CERN, 2002.
225. *Leroy C., Alfeev V., Cheplakov A.P., Golikov V., Golubykh S., Kulagin E., Kukhtin V., Lushchikov V.* Study of Neutron Induced Outgassing from Tungsten Alloy for ATLAS FCAL // *Part. Nucl., Lett.* 2000. No. 5[102]. P. 25–31.
226. *Leroy C. et al.* Liquid Argon Pollution Tests of the ATLAS Detector Materials at IBR-2 Reactor in Dubna // *Part. Nucl., Lett.* 2000. No. 5[102]. P. 5–19.
227. *Leroy C. et al. (ATLAS LARG Collab.)*. Liquid Argon Pollution Tests of ATLAS Detector Materials at the IBR-2 Reactor in Dubna // *Proc. 7th Intern. Conf. on Advanced Technology and Particle Physics (ICATPP-7)*, 2002. P. 800–805.
228. *Usov Yu.* Frozen Spin Solid Targets Developed at JINR Dubna // *Nucl. Instr. Meth.* 2004. V. A526. P. 153–156.

229. *Fent J., Ban J., Brettel H., Dulny B., Haberer W., Oberlack H., Schacht P., Cheplakov A. P., Kiryunin A., Kurchaninov L.* Cryogenic GaAs Front End System for the Liquid Argon Hadronic Endcap Calorimeter of ATLAS Digital Readout for Module 0 // *Calorimetry in High-Energy Physics. Proc. 7th Intern. Conf., Tucson, USA, Nov. 9–14, 1997.*
230. *Bulvain M., Cheplakov A., Kulikov S., Kukhtin V., Shabalin E., Verhoglyadov A.* The Irradiation Facility at the IBR-2M Reactor in Dubna // *Proc. 14th ICATPP Conf. on Astroparticle, Particle, Space Physics and Detectors for Physics Applications (ICATPP 2013). 2014. P. 583–587.*
231. *Cheplakov A.* Research and Development for the ATLAS Forward Calorimetry at the Phase-II LHC. ATL-LARG-PROC-2015-011. Geneva: CERN, 2015.
232. *Cheplakov A. (ATLAS Collab.).* Status and Recent Results of the ATLAS Experiment // *PoS. 2012. V. Baldin-ISHEPP-XXI. P. 003.*
233. *Cheplakov A. (ATLAS Collab.).* ATLAS Status and Recent Results // *Proc. 15th Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics (LomCon): Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov. Geneva: CERN, 2013. P. 9–11.*
234. *Chelkov G. A., Kotov S. A., Kravchenko I. V., Krumshstein Z. V.* Study of Pressurized Drift Tubes with Fieldforming Wires. CERN-ATL-MUON-94-037. Geneva: CERN, 1994.
235. *Alekseev G. D. et al.* The Preliminary Study of Pressurized Drift Tubes as a Detector for Precision Muon Tracking // *JINR Rapid Commun. 1992. No. 5(56). P. 45–50.*
236. *Alekseev G. D. (ATLAS Collab.).* Pilot Results of Beam Test with High Pressure Drift Tubes. CERN-ATL-MUON-92-012. Geneva: CERN, 1992.
237. *Глонти Г. Л. и др.* Автоматизированная линия сборки и испытания детекторов мюонной системы установки ATLAS. Препринт ОИЯИ Р13-2001-218. Дубна: ОИЯИ, 2001.
238. *Bauer F. et al.* The First Precision Drift Tube Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer // *Nucl. Instr. Meth. 2002. V. A478. P. 153–157.*
239. *Bauer F. et al.* Large Scale Production of the Precision Drift Tube Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer // *Nuclear Science. Proc. Symp. NSS 2001, San Diego, USA, Nov. 4–10, 2001. 2002.*
240. *Chelkov G. A., Fadeev V., Ignatenko M. A., Kotov S. A., Kravchenko I. V., Krumshstein Z. V., Samosat G., Shvetsov V. N., Strelkov A. V.* Investigation of Spectral Efficiency of Pressurized Drift Tubes for Detection of Neutrons in the Energy Range between 5 eV and 200 keV. CERN-ATL-MUON-93-031. Geneva: CERN, 1993.
241. *Бойко И. Р., Вертоградов Л. С., Додонов В. И., Журавлев В. В., Игнатенко М. А., Крумитейн З. В., Николенко М. Ю., Шелков Г. А.* Определение пространственного положения сигнальных нитей в дрейфовых трубках с помощью пучка рентгеновских квантов // *Краткие сообщения ОИЯИ. 1995. № 2[70]. С. 61–67.*
242. *Baranov S. A., Boiko I. R., Chelkov G. A., Ignatenko M. A.* Gamma Sensitivity of Pressurized Drift Tubes. JINR, E13-95-39. Dubna: JINR, 1995.
243. *Boiko I. R., Chelkov G. A., Dodonov V. I., Ignatenko M. A., Nikolenko M. Yu., Zhuravlov V.* MDT Gamma Response. CERN-ATL-MUON-97-194. Geneva: CERN, 1997.
244. *Borzakov S. B., Boiko I. R., Chelkov G. A., Dodonov V. I., Ignatenko M. A., Nikolenko M. Yu., Nozdrin A. A., Pisarev I. L.* Response of the MDT Filled

- with Ar + 5% CO₂ + 3% CH₄ to Thermal Neutrons. CERN-ATL-MUON-96-116. Geneva: CERN, 1996.
245. *Boйко I. R., Chelkov G. A., Dodonov V., Ignatenko M. A., Nikolenko M. Yu.* Ageing of Aluminum Drift Tubes Filled with Ar + 5% CO₂ + 3% CH₄. CERN-ATL-MUON-95-089. Geneva: CERN, 1995.
246. *Boйко I. R., Chelkov G. A., Dodonov V. I., Ignatenko M. A., Nikolenko M. Yu.* Vibration of Signal Wires in Wire Detectors under Irradiation // Nucl. Instr. Meth. 1995. V. A367. P. 321–325.
247. *Boйко I., Chelkov G. A., Dodonov V., Ignatenko M. A., Nikolenko M. Yu.* Investigation of the Ratio between the Streamer and Proportional Signals in Drift Tubes. CERN-ATL-MUON-95-088. Geneva: CERN, 1995.
248. *Alexeev G. D., Boyko I., Breuker H., Chelkov G. A., Drakoulakos D. G., Fabjan C. W., Ignatenko M. A., Krumshstein Z. V., Sedykh Y. V., Vertogradov L. S.* XTOMO, A Prototype of the X-Ray Tomograph for High Precision Measurements of the MDT Muon Chambers. CERN-ATL-MUON-97-142. Geneva: CERN, 1997.
249. *Gadomski S., Eerola P., Bannikov A. V.* ATLAS Sensitivity Range for the X(s) Measurement. arXiv:hep-ex/9611001.
250. *Bannikov A. V., Chelkov G. A., Silagadze Z. K.* $B(s)^0 \rightarrow D(s)^- a_1^+$ Decay Channel in the $B(s)^0$ Mixing Studies. arXiv:hep-ph/9510416.
251. *Anosov V. A. et al.* The First Full-Scale Prototype of BOS MDT Chamber for the ATLAS. CERN-ATL-MUON-97-195. Geneva: CERN, 1997.
252. *Braic M. T., Chelkov G. A., Dedovich D. V., Evtoukhovitch P. G., Kiss A. E., Tskhadadze E. G., Zoita C. N.* Leak Detection System for Mass-Production of DT Detectors. CERN-ATL-MUON-98-225. Geneva: CERN, 1998.
253. *Boйко I., Chelkov G. A., Dodonov V., Jouravlev V. V., Nikolenko M.* The Gas Gain Saturation. CERN-ATL-MUON-98-229. Geneva: CERN, 1998.
254. *Boйко I., Chelkov G., Dodonov V., Ignatenko M., Nikolenko M., Zhuravlov V.* Pressurised Drift Tube Response to Photons of Energies from 6 keV to 1 MeV. JINR Preprint E1-99-55. Dubna: JINR, 1999.
255. *Глонти Г. Л., Гонгадзе А. Л., Евтухович П. Г., Ильюшенко Е. Н., Котов С. А., Ралеа Д., Томеску М., Цхададзе Э. Г., Чепурнов В. Ф., Шелков Г. А.* Методика юстировки опорных линий для сборки МДТ-камер эксперимента ATLAS. Сообщ. ОИЯИ P13-2001-220. Дубна: ОИЯИ, 2001.
256. *Глонти Г. Л. и др.* Опорные линии для сборки МДТ-камер эксперимента ATLAS. Сообщ. ОИЯИ P13-2001-219. Дубна: ОИЯИ, 2001.
257. *Глонти Г. Л. и др.* Чистое производственное помещение для сборки дрейфовых трубок. Сообщ. ОИЯИ P13-2001-179. Дубна: ОИЯИ, 2001.
258. *Ванча Д. и др.* Стенд для прецизионного измерения геометрических параметров алюминиевых трубок. Сообщ. ОИЯИ P13-2001-202. Дубна: ОИЯИ, 2001.
259. *Глонти Г. Л. и др.* Краткое описание производства дрейфовых трубок для МДТ-камер эксперимента ATLAS. Сообщ. ОИЯИ P13-2001-211. Дубна: ОИЯИ, 2001.
260. *Adorisio C. et al. (ATLAS Muon Collab.).* System Test of the ATLAS Muon Spectrometer in the H8 Beam at the CERN SPS // Nucl. Instr. Meth. 2008. V. A593. P. 232–254.
261. *Adorisio C. et al.* Study of the ATLAS MDT Spectrometer Using High Energy CERN Combined Test Beam Data // Nucl. Instr. Meth. 2009. V. A598. P. 400–415.
262. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Commissioning of the ATLAS Muon Spectrometer with Cosmic Rays // Eur. Phys. J. 2010. V. C70. P. 875–916; arXiv:1006.4384.

263. *Antonelli M. et al.* In-Situ Determination of the Performance of the ATLAS Muon Spectrometer // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2008. V. 177–178. P. 326–327.
264. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Muon Reconstruction Performance of the ATLAS Detector Using 2011 and 2012 LHC Proton–Proton Collision Data // Eur. Phys. J. 2014. V. C74, No. 11. P. 3130; arXiv:1407.3935.
265. *Gongadze A.L.* Micromegas Chambers for the Experiment ATLAS at the LHC // Phys. Part. Nucl. 2016. V. 47, No. 2. P. 270–289.
266. *Anisenkov A., Klimentov A., Kuskov R., Wenaus T.* ATLAS Grid Information System // J. Phys. Conf. Ser. 2011. V. 331. P. 072002.
267. *Anisenkov A., Di Girolamo A., Klimentov A., Oleynik D., Petrosyan A., Belov S. (ATLAS Collab.)*. AGIS: The ATLAS Grid Information System // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 513. P. 032001.
268. *Кореньков В.В., Мицын В.В., Тихоненко Е.А.* Участие ОИЯИ в организации регионального информационно-вычислительного центра для ЛHC в России. Сообщ. ОИЯИ P11-2001-24. Дубна: ОИЯИ, 2001.
269. *Baginian S., Ososkov G.* Finding Tracks Detected by a Drift Tube System // Comput. Phys. Commun. 1998. V. 108. P. 20–28.
270. *Antonioni I., Ivanov V.* Computational Methods and Tools for Modeling and Analysis of Complex Processes // Unconventional Models of Computation / Eds: I. Antoniou, C. Calude, M. J. Dinneen. London: Springer-Verlag, 2001. P. 10–24.
271. *Кореньков В.В., Мицын В.В., Тихоненко Е.А.* Концепция GRID: На пути к глобальному информационному обществу XXI века. Сообщ. ОИЯИ P11-2001-58. Дубна: ОИЯИ, 2001.
272. *Sturrock R. et al. (ATLAS DC1 Task Force Collab.)*. A Step towards a Computing Grid for the LHC Experiments: ATLAS Data Challenge 1. CERN-PH-EP-2004-028. Geneva: CERN, 2004.
273. *Астахов Н.С., Иванов В.В., Кореньков В.В., Мицын В.В., Сапожников А.П., Тихоненко Е.А.* Ресурсы и сервисы центрального распределенного информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ: текущий статус и перспективы // Scientific Report 2004–2005. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2005. P. 33–36.
274. *Korenkov V.* JINR's Participation in Computing for the ATLAS Experiment: History and Current Status. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
275. *Ivanov V.V., Korenkov V.V., Mitsyn V.V., Astakhov N.S., Tikhonenko E.A., Trofimov V.V.* JINR Central Information and Computing Complex: Current Status and Perspectives // Scientific Report 2006–2007. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2007. P. 33–37.
276. *Ivanov V.V., Gromova N.I., Korenkov V.V., Kutovsky N.A., Mitsyn V.V., Tikhonenko E.A., Zrelow P.V.* Organization and Support of LHC Computing at the Joint Institute for Nuclear Research // Scientific Report 2006–2007. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2007. P. 38–42.
277. *Adam G., Ivanov V.V., Korenkov V.V., Strizh T.A., Zrelow P.V.* JINR Grid-infrastructure — Present Status and Perspectives // Scientific Report 2008–2009. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2009. P. 11–14.
278. *Ужинский А.В., Кореньков В.В.* Система мониторинга сервиса передачи данных (FTS) проекта EGGE/WLCG. Сообщ. ОИЯИ P11-2008-80. Дубна: ОИЯИ, 2008.
279. *Belov S.D., Galaktionov V.V., Korenkov V.V., Kutovsky N.A., Mitsyn V.V., Oleynik D.A., Strizh T.A., Tikhonenko E.A., Tkachev I.M., Zhiltsov V.E.,*

- Shabratova G. S.* JINR Participation in the LCG/WLCG and EGEE Projects // Scientific Report 2006–2007. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2007. P. 47–52.
280. *Ужинский А. В., Кореньков В. В.* Статистический анализ сбоев, возникающих при пересылке данных в глобальной GRID-инфраструктуре EGEE/WLCG. Сообщ. ОИЯИ P11-2008-82. Дубна: ОИЯИ, 2008.
281. *Долбилов А. Г., Иванов Ю. П.* Элементы GRID-системы LCG-2 в ЛЯП. Сообщ. ОИЯИ P11-2008-68. Дубна: ОИЯИ, 2008.
282. *Vednyakov I. V., Dolbilov A. G., Ivanov Yu. P.* A Method of Grid Element Cloning // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7. P. 428–431 [*Бедняков И. В., Долбилов А. Г., Иванов Ю. П.* Метод клонирования грид-элемента // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т. 7. № 6. С. 699–704].
283. *Oleynik D. A., Petrosyan A. S.* ATLAS DQ2 Deletion Service // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 41–42.
284. *Кореньков В. В., Котов В. М., Русакович Н. А., Яковлев А. В.* Технология интеграции online-сервисов эксперимента ATLAS на Большом адронном коллайдере и сервисов грид-инфраструктуры // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 43–46.
285. Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies / Ed. by Adam G., Ivanov V. V., Korenkov V. V., Strizh T. A., Zrelou P. V. Dubna: JINR, 2011.
286. *Астахов Н. С., Долбилов А. Г., Иванов В. В., Кореньков В. В., Мицын В. В., Трофимов В. В.* Развитие центрального информационно-вычислительного комплекса ОИЯИ в 2010–2011 гг. и текущее состояние программно-аппаратной среды // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 16–19.
287. *Anisenkov A., Belov S., Di Girolamo A., Gayazov S., Klimentov A., Oleynik D., Senchenko A.* AGIS: The ATLAS Grid Information System // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 032006.
288. *Kutovsky N. A., Kadochnikov I. S., Valova V., Yakshov A.* JINR Infrastructure for Tier3 Monitoring Development // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 30–31.
289. *Andreeva J. et al.* Monitoring of Large-Scale Federated Data Storage: XRootD and Beyond // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 513. P. 032004.
290. *Belov S. D., Kadochnikov I. S., Kutovsky N. A., Oleynik D. A., Petrosyan A. S., Valova L.* Tier 3 Monitoring Software Suit (T3MON) // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 32–34.
291. *Petrosyan A., Oleynik D., Belov S., Andreeva J., Kadochnikov I. (ATLAS Collab.).* ATLAS Off-Grid Sites (Tier-3) Monitoring. From Local Fabric Monitoring to Global Overview of the VO Computing Activities // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 032082.
292. *Oleynik D., Petrosyan A., Garonne V., Campana S.* ATLAS DQ2 Deletion Service // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 032083.
293. *Garonne V. et al.* The ATLAS Distributed Data Management Project: Past and Future // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 032045.
294. *Belov S., Kadochnikov I., Korenkov V., Kutouski M., Oleynik D., Petrosyan A. (ATLAS Collab.).* VM-Based Infrastructure for Simulating Different Cluster and Storage Solutions Used on ATLAS Tier-3 Sites // J. Phys. Conf. Ser. 2012. V. 396. P. 042036.

295. Галактионов В.В. GridCom, Grid Commander: графический интерфейс для работы с задачами и данными в Гриде // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 27–29.
296. Chudoba J. et al. JINR (Dubna) and Prague Tier2 Sites: Common Experience in the WLCG Grid Infrastructure // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 288–294.
297. Berezhnaya A. et al. LHC Grid Computing in Russia: Present and Future // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 513. P. 062041.
298. Scientific Report 2012–2013. Laboratory of Information Technologies / Ed. by Adam G., Korenkov V. V., Podgajny D. V., Strizh T. A., Zrelov P. V. Dubna: JINR, 2014.
299. Maeno T. et al. (ATLAS Collab.). Evolution of the ATLAS PanDA Workload Management System for Exascale Computational Science // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 513. P. 032062.
300. Nilsson P., De K., Filipcic A., Klimentov A., Maeno T., Oleynik D., Panitkin S., Wenaus T., Wu W. (ATLAS Collab.). Extending ATLAS Computing to Commercial Clouds and Supercomputers // PoS. 2014. V. ISGC2014. P. 034.
301. Kordas K. et al. The ATLAS Data Acquisition and Trigger: Concept, Design and Status // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2007. V. 172. P. 178–182.
302. Gorini B. et al. The ATLAS Data Acquisition and High-Level Trigger. ATL-COM-DAQ-2006-030. Geneva: CERN, 2006.
303. Barczyk M. et al. Online Monitoring Software Framework in the ATLAS Experiment // eConf 2003. V. C0303241. P. THGT003; arXiv:hep-ex/0305096.
304. Alexandrov I. et al. Online Software for the ATLAS Test Beam Data Acquisition System // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004. V. 51. P. 578–584.
305. Gadowski S. et al. Deployment and Use of the ATLAS DAQ in the Combined Test Beam // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 2156–2161.
306. Abolins M. et al. Integration of the Trigger and Data Acquisition Systems in ATLAS // J. Phys. Conf. Ser. 2008. V. 119. P. 022001.
307. Vandelli W. et al. Strategies and Tools for ATLAS On-line Monitoring. ATL-DAQ-CONF-2006-005. Geneva: CERN, 2006.
308. Alexandrov I., Kotov V., Yatsunenko Y. The Mathematical Approach to the Design of the 2nd Level Muon Trigger for MDT and Algorithm Construction Strategy. CERN-ATL-MUON-94-057. Geneva: CERN, 1994.
309. Котов В.М., Минеев М.А. Алгоритм для опознания событий в мюонном триггере детектора ATLAS. Препринт ОИЯИ Р10-98-200. Дубна: ОИЯИ, 1998.
310. Aleksandrov I. et al. The Performance and Scalability of the Back-End DAQ Sub-System // Proc. 11th Intern. Conf. on Computing in High-Energy and Nuclear Physics (CHEP 2000). 2000. P. 312–317.
311. Aleksandrov I. et al. Performance and Scalability of the Back-End Sub-System in the ATLAS DAQ/EF Prototype // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2000. V. 47. P. 244–249.
312. Mapelli L. et al. The ATLAS DAQ and Event Filter Prototype-1 Project // Comput. Phys. Commun. 1998. V. 110. P. 95–102.
313. Burckhart D. et al. Back-End Summary Document. CERN-ATL-DAQ-2000-001. Geneva: CERN, 1999.
314. Колос С.Е., Котов В.М., Минеев М.А. Разработка приложений мониторинга сбора и обработки данных установки ATLAS LHC (Программа Event Dump) // XV Научно-техническая конф.: Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (Датчик-2003). 2003. С. 273–274.

315. *Bee C.P., Francis D., Mapelli L., McLaren R., Mornacchi G., Petersen J., Wickens F.J.* The Raw Event Format in the ATLAS Trigger & DAQ. CERN-ATL-DAQ-98-129. V. 3. Geneva: CERN, 1998.
316. *Казымов А.И., Котов В.М., Русакович Н.А., Минеев М.А.* Использование облачных технологий CERN для дальнейшего развития ПО TDAQ ATLAS и его применения при обработке данных ДЗЗ в приложениях космического мониторинга // Компьютерные исследования и моделирования. 2015. Т. 7(3). С. 683–689.
317. *Alexandrov E.I., Alexandrov I.N., Caprini M., Lehmann Miotto G., Kazarov A., Kolos S., Kotov V.M., Soloviev I.* Resource Manager of the ATLAS Trigger and Data Acquisition System // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 52–54.
318. *Pedro L. et al.* Conditions Databases: The Interfaces between the Different ATLAS Systems // Computing in High Energy Physics and Nuclear Physics. Proc. Conf. CHEP'04, Switzerland, Sept. 27 – Oct. 1, 2004. 2005. P. 575–578.
319. *Liko D. et al.* Control in the ATLAS TDAQ System // Computing in High Energy Physics and Nuclear Physics. Proc. Conf. CHEP'04, Switzerland, Sept. 27 – Oct. 1, 2004. 2005. P. 159–162.
320. *Kolos S. et al.* Experience with CORBA Communication Middleware in the ATLAS DAQ // Computing in High Energy Physics and Nuclear Physics. Proc. Conf. CHEP'04, Switzerland, Sept. 27 – Oct. 1, 2004. 2005. P. 105–110.
321. *Burckhart-Chromek D. et al.* Testing on a Large Scale: Running the ATLAS Data Acquisition and High Level Trigger Software on 700 PC Nodes // 15th Intern. Conf. on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2006), Mumbai, Maharashtra, India, Febr. 13–17, 2006.
322. *Unel G. et al.* Studies with the ATLAS Trigger and Data Acquisition Pre-Series Setup. ATL-DAQ-CONF-2006-019. Geneva: CERN, 2006.
323. *Soloviev I. et al.* The Configurations Database Challenge in the ATLAS DAQ System // Computing in High Energy Physics and Nuclear Physics. Proc. Conf. CHEP'04, Switzerland, Sept. 27 – Oct. 1, 2004. 2005. P. 101–104.
324. *Vermeulen J. et al.* ATLAS Dataflow: The Read-Out Subsystem, Results from Trigger and Data-Acquisition System Testbed Studies and from Modeling // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2006. V. 53. P. 912–917.
325. *Abolins M.A. et al.* The ATLAS Trigger: Commissioning with Cosmic Rays // J. Phys. Conf. Ser. 2008. V. 119. P. 022014.
326. *Cuenca Almenar C., Corso-Radu A., Hadavand H., Ilchenko Y., Kolos S., Stagle K., Taffard A.* ATLAS Online Data Quality Monitoring // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2011. V. 215. P. 304–306.
327. *Corso-Radu A., Hadavand H., Ilchenko Y., Kolos S., Okawa H., Stagle K., Taffard A. (ATLAS Collab.).* Data Quality Monitoring Framework for the ATLAS Experiment: Performance Achieved with Colliding Beams at the LHC // J. Phys. Conf. Ser. 2011. V. 331. P. 022027.
328. *Lehmann Miotto G., Soloviev I., Dobson M., Sloper J.E., Almeida Simoes J., Kazarov A., Coura Torres R.* The ATLAS DAQ System Online Configurations Database Service Challenge // J. Phys. Conf. Ser. 2008. V. 119. P. 022004.
329. *Fonseca-Martin T. et al.* Event Reconstruction Algorithms for the ATLAS Trigger // J. Phys. Conf. Ser. 2008. V. 119. P. 022022.
330. *Damazio D.O. (ATLAS Collab.).* ATLAS High Level Calorimeter Trigger Software Performance for Cosmic Ray Events // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 219. P. 022041.

331. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Performance of the ATLAS Trigger System in 2010 // Eur. Phys. J. 2012. V. C72. P. 1849; arXiv:1110.1530.
332. Proc. 17th Intern. Conf. on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP 2009) / Ed. by Gruntorad J., Lokajicek M. // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 219.
333. Corso-Radu A. et al. First-Year Experience with the ATLAS Online Monitoring Framework // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 219. P. 02205.
334. Aad G. et al. Data Quality from the Detector Control System at the ATLAS Experiment // J. Phys. Conf. Ser. 2010. V. 219. P. 022037.
335. Яковлев А.В. Состав сервисов удаленного мониторинга и доступа к данным, реализованных в инфраструктуре эксперимента ATLAS. Сообщ. ОИЯИ Р10-2009-76. Дубна: ОИЯИ, 2009.
336. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). The ATLAS Simulation Infrastructure // Eur. Phys. J. 2010. V. C70. P. 823–874; arXiv:1005.4568.
337. Alexandrov E., Alexandrov I., Kotov V. Web Monitoring Interface: Architectural Analysis and Design. ATL-DQ-EN-0037. Geneva: CERN, 2007.
338. Котов В.М., Минеев М.А. Удаленный мониторинг TDAQ ATLAS в ОИЯИ // Scientific Report 2010–2011. Laboratory of Information Technologies. Dubna: JINR, 2011. P. 47–49.
339. Kolos S., Alexandrov E., Hauser R., Mineev M., Salnikov A. World-Wide Online Monitoring Interface of the ATLAS Experiment // Proc. 19th Real Time Conf. (RT2014). 2014.
340. Borisov O.N., Budagov Y.A., Karamysheva G.A., Lomakina O.V., Nessi M., Vorozhtsov S.B. Computer Models for the TILECAL Magnetic Field Distributions. CERN-ATL-TILECAL-94-012. Geneva: CERN, 1994.
341. Nessi M., Bergsma F., Vorozhtsov S.B., Borisov O.N., Lomakina O.V., Karamysheva G.A., Budagov Yu.A. Large TileCal Magnetic Field Simulation // 14th Conf. on Charged Particle Accelerators, Protvino, Russia, Oct. 25–27, 1994. Dubna: JINR, 1994.
342. Vorozhtsov S.B., Titkova I.V., Nessi M. Contribution to the ATLAS B Field 3-D Model. CERN-ATL-TILECAL-96-058. Geneva: CERN, 1996.
343. Bergsma F., Borisov O.N., Lomakina O.V., Nessi M., Vorozhtsov S.B. Tilecal Magnetic Field Simulation. CERN-ATL-TILECAL-94-018. Geneva: CERN, 1994.
344. Borisov O.N., Budagov Y.A., Nessi M., Vorozhtsov S.B. Ponderomotive Force Calculations for the TileCal. CERN-ATL-TILECAL-94-038. Geneva: CERN, 1994.
345. Borisov O.N., Budagov Y.A., Lomakina O.V., Nessi M., Vorozhtsov S.B. Influence of the TileCal Parameter Modifications on the B-Field. CERN-ATL-TILECAL-95-050. Geneva: CERN, 1995.
346. Morozov N.A., Samsonov E.V., Vorozhtsov S.B., Nessi M. Calculation of the TileCal Magnetic Forces Using 3-D Tosca Model. JINR Commun. E9-97-390. Dubna: JINR, 1997.
347. Morozov N.A., Samsonov E.V., Vorozhtsov S.B. Static Magnetic Forces and Torques in ATLAS. JINR Commun. E9-97-389. Dubna: JINR, 1997.
348. Budagov Yu.A., Fedorenko S.B., Kalinichenko V.V., Lomakin Yu.P., Vorozhtsov S.B., Nessi M. ATLAS TileCal Submodule B Field Measurement. JINR Commun. E1-97-124. Dubna: JINR, 1997.
349. Dubrovin A., Vorojtsov S.B. ATLAS Magnetic Field Calculations by Mermaid with All the Coils On. CERN-ATL-TILECAL-99-001. Geneva: CERN, 1999.
350. Vorojtsov S.B., Dubrovin A., Nessi M. 3D Magnetic Field Calculations in the Finger Region of the TileCal. CERN-ATL-TILECAL-99-019. Geneva: CERN, 1999.

351. *Dubrovin A., Simonov E.A., Vorozhtsov S.B.* Mermaid 3D Code in ATLAS Applications. CERN-ATL-TILECAL-2001-003. Geneva: CERN, 2001.
352. *Nessi M., Vorozhtsov S.B.* Magnetic Field and Force Calculations for ATLAS Asymmetrical Structure. CERN-ATL-TILECAL-2001-001. Geneva: CERN, 2001.
353. *Ворожцов А.С.* Формирование электромагнитных полей особо сложной конфигурации в циклотронах и детекторах частиц. Дисс... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 2007.
354. *Vorozhtsov S.B., Vorozhtsov A.S., Butin F., Price M.* ATLAS Cavern Magnetic Field Calculations. JINR Commun. E9-2000-47. Dubna: JINR, 2000.
355. *Arnaud M. et al.* Commissioning of the Magnetic Field in the ATLAS Muon Spectrometer // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2008. V. 177–178. P. 265–266.
356. *Vorozhtsov A. et al.* Magnetic Shielding of the Low-Voltage Power Supplies in the Liquid Argon Calorimeters of the ATLAS experiment. ATL-COM-LARG-2010-006. Geneva: CERN, 2010.
357. *Vorozhtsov A. et al.* TOSCA-Based Optimization of the Magnetic Shielding of the ATLAS LAr Low-Voltage Power Supplies. ATL-LARG-INT-2009-003. Geneva: CERN, 2009.
358. *Kate ten H.* ATLAS Magnet System Construction, Maintenance and Operations, a Long Standing Successful ATLAS–JINR Cooperation. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
359. *Jenni P.* The Long Journey Together to the Higgs Discovery. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
360. *Bednyakov V.A., Budagov J.A., Khramov E.V., Khubua D.I., Rusakovich N.* The Fundamental Tasks of the ATLAS Physics Program // Bull. of Georgian National Acad. of Sci., New Ser. 2008. V. 2, No. 2. P. 38–44.
361. *Bannikov A.V., Chelkov G.A., Silagadze Z.K.* $B_s^0 \rightarrow D_s^- a_1^+$ ($D_s^- \rightarrow \varphi \pi^-$, $D_s^- \rightarrow K^{*0} K^-$) Decay Channel in the ATLAS B0(s) Mixing Studies. arXiv:hep-ph/9802434.
362. *Chelkov G., Gostkin M., Mandjavidze I., Sissakian A., Tapprogge S.* Triggering of High-Multiplicity Events Using Calorimetry // JINR Rapid Commun. 1999. No. 4[96]. P. 45–50.
363. *Manjavidze J., Sisakian A.* High-Multiplicity Processes (Theoretical Status). arXiv:hep-ph/9811360.
364. *Chelkov G., Mandjavidze I., Sissakian A.* High Multiplicity Processes // JINR Rapid Commun. 1999. No. 4[96]. P. 35–44.
365. *Kuraev E.A., Manjavidze J., Sisakian A.* Some Notes about Multiplicity Distribution at Hadron Colliders. arXiv:hep-ph/9909287.
366. *Kuraev E.A., Manjavidze J., Sisakian A.* Multiplicity Distribution Tails at High Energies. arXiv:hep-ph/0003093.
367. *Manjavidze J., Sisakian A.* Phase Transitions Signal in Inelastic Hadron Collisions. arXiv:hep-ph/0003040.
368. *Boйко I.R., Nikolaev K.V., Chelkov G.A.* Study of Higgs Boson Decays $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ Using the Full Simulation of ATLAS Detector. ATL-COM-PHYS-2004-037. Geneva: CERN, 2004; *Бойко И.Р., Николаев К.В., Шелков Г.А.* Исследование распадов хиггс-бозонов $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ на основе полного моделирования установки ATLAS. Препринт ОИЯИ P1-2004-44. Дубна: ОИЯИ, 2004.
369. *Boйко I.R.* Full Simulation Study of Higgs Bosons Produced with SANC Generator. Talk at ATLAS Higgs Working Group, CERN, Apr., 19, 2006.

370. *Boycio I. R., Chelkov G. A., Nikolaev K. V.* Study of Higgs Boson Decay $H \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ Using the Full Simulation of an ATLAS Detector. ATLAS-PHYS-INT-2007-012. Geneva: CERN, 2007.
371. *Сыресин Д. Е.* Измерение сечения процесса $pp \rightarrow Zbb$ в эксперименте ATLAS. Магистерская работа, рук. Бойко И. Р., МФТИ–ОИЯИ. Дубна, 2009; *Бойко И. Р., Демичев М. А., Сыресин Д. Е.* Предложение по измерению процесса $pp \rightarrow Zb\bar{b}$ на установке ATLAS, июнь 2009 г.
372. *Nikolaev K.* Calibration of Muon Spectrometer of ATLAS Using Decay of $Z \rightarrow \mu\mu$. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 22 Dec. 2006.
373. *Щербаков А. А.* Отбор событий Дрелла–Яна для точного измерения светимости LHC и/или PDF протонов. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 22 Dec. 2006.
374. *Gostkin M.* Determination of ATLAS Muon System Efficiency from $Z \rightarrow \mu\mu$ Events. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 22 Dec. 2006.
375. *Boycio I., Demichev M., Zhuravlev V.* Proposal for Search $\tau \rightarrow \mu\gamma$ and $\tau \rightarrow 3\mu$ Decays with ATLAS. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 22 Dec. 2006.
376. *Сапронов А.* Поиск частицы η_b в эксперименте ATLAS. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 24 Dec. 2008.
377. *Andonov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Passarino G.* Project SANC (former CalcPHEP): Support of Analytic and Numeric Calculations for Experiments at Colliders // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2003. V. 117. P. 825; arXiv:hep-ph/0209297.
378. *Bardin D., Christova P., Kalinovskaya L.* SANC Status Report // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2003. V. 116. P. 48–52.
379. *Andonov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Passarino G.* SANC Press Release // Nucl. Instr. Meth. 2003. V. A502. P. 576–577.
380. *Sadykov R., Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Kolesnikov V., Saproinov A., Uglov E.* SANC System and Its Applications for LHC // J. Phys. Conf. Ser. 2014. V. 523. P. 012043; arXiv:1310.3644.
381. *Andonov A., Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Schlippe von W.* SANCscope — v.1.00 // Comput. Phys. Commun. 2006. V. 174. P. 481–517; arXiv:hep-ph/0411186 [Erratum: Comput. Phys. Commun. 2007. V. 177. P. 623].
382. *Bardin D. Yu., Kalinovskaya L. V., Uglov E. D.* $Z\gamma\gamma\gamma \rightarrow 0$ Processes in SANC // Phys. Atom. Nucl. 2013. V. 76. P. 1339–1344; arXiv:1212.3105.
383. *Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Sadykov R.* One-Loop Corrections to the Drell–Yan Process in SANC: I. The Charged Current Case // Eur. Phys. J. 2006. V. C46. P. 407–412; arXiv:hep-ph/0506110 [Erratum: Eur. Phys. J. 2007. V. C50. P. 505].
384. *Bardin D., Bondarenko S., Kalinovskaya L., Nanava G., Rumyantsev L., Schlippe von W.* SANCnews: Sector fbb // Comput. Phys. Commun. 2007. V. 177. P. 738–756; arXiv:hep-ph/0506120.
385. *Kalinovskaya L. V.* Processes of Higgs Production and Decay in SANC. Talk at ATLAS Higgs Working Group, at CERN, Apr., 20, 2006.
386. *Buttar C. et al.* Les Houches Physics at TeV Colliders 2005, Standard Model and Higgs Working Group: Summary Report // Physics at TeV Colliders. Proc. Workshop, Les Houches, France, May 2–20, 2005. 2006; arXiv:hep-ph/0604120.
387. *Andonov A., Arbuzov A., Bondarenko S., Christova P., Kolesnikov V., Sadykov R.* QCD Branch in SANC. arXiv:hep-ph/0610268.

388. *Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Sadykov R.* One-Loop Corrections to the Drell–Yan Process in SANC: II. The Neutral Current Case // *Eur. Phys. J.* 2008. V. C54. P. 451–460; arXiv:0711.0625.
389. *Arbuzov A.B., Sadykov R.R.* Inverse Bremsstrahlung Contributions to Drell–Yan Like Processes // *J. Exp. Theor. Phys.* 2008. V. 106. P. 488–494; arXiv:0707.0423.
390. *Buttar C. et al.* Standard Model Handles and Candles Working Group: Tools and Jets Summary Report // *Physics at TeV Colliders, La physique du TeV aux collisionneurs, Les Houches, 11–29 June 2007.* 2008. P. 121–214; arXiv:0803.0678.
391. *Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Nanava G., Sadykov R., Schlippe von W.* SANCnews: Sector 4i, Charged Current // *Eur. Phys. J.* 2007. V. C51. P. 585–591; arXiv:hep-ph/0703043.
392. *Bardin D., Bondarenko S., Kalinovskaya L., Nanava G., Rumyantsev L., Schlippe von W.* Electroweak Radiative Corrections to the Three Channels of the Process $f(1) \text{ anti-}f(1) Z A \rightarrow 0$ // *Eur. Phys. J.* 2008. V. C54. P. 187–197; arXiv:0710.3083.
393. *Bardin D., Bondarenko S., Kalinovskaya L., Nanava G., Rumyantsev L.* Electroweak Radiative Correction to the Three Channels of the Process $f(1) \text{ anti-}f(1) H A \rightarrow 0$ // *Eur. Phys. J.* 2007. V. C52. P. 83–92; arXiv:hep-ph/0702115.
394. *Bardin D., Bondarenko S., Jadach S., Kalinovskaya L., Placzek W.* Implementation of SANC EW Corrections in WINHAC Monte Carlo Generator // *Acta Phys. Polon.* 2009. V. B40. P. 75–92; arXiv:0806.3822.
395. *Andonov A., Arbuzov A., Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Kolesnikov V., Sadykov R.* Standard SANC Modules // *Comput. Phys. Commun.* 2010. V. 181. P. 305–312; arXiv:0812.4207.
396. *Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Kolesnikov V., Schlippe von W.* SANCnews: Top Decays in QCD and EW Sectors // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2010. V. 7. P. 72–79; arXiv:0903.1533.
397. *Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Kolesnikov V., Schlippe von W., Yordanova K.* Standard SANC Modules for NLO QCD Radiative Corrections to Single Top-Quark Production // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9. P. 472–483; arXiv:1110.3622.
398. *Andonov A.D., Kolesnikov V.A., Uglov E.D.* The SANC Project Status and Plans // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2011. V. 8. P. 765–767.
399. *Bardin D., Bondarenko S., Christova P., Kalinovskaya L., Rumyantsev L., Sapronov A., Schlippe von W.* SANC Integrator in the Progress: QCD and EW Contributions // *JETP Lett.* 2012. V. 96. P. 285–289; arXiv:1207.4400.
400. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Determination of the Strange Quark Density of the Proton from ATLAS Measurements of the $W \rightarrow l\nu$ and $Z \rightarrow \ell\ell$ Cross Sections // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 109. P. 012001; arXiv:1203.4051.
401. *Ahmadov A., Cheplakov A., Kukhtin V., Mehdiyev R., Metreveli Z., Salihagic D.* Single Top Quark Production via W-Gluon Fusion at LHC. Simulation with PYTHIA 5.7 Event Generator. Intern. Note, ATL-COM-PHYS-99-076, ATLAS-PHYS-2003-015. Geneva: CERN, 1999.
402. *Ahmadov A. et al.* NLO QCD Corrections to the Single Top and $t\bar{t}$ Quarks Productions at 14 TeV // *The 6th Intern. Conf. of the Balkan Physical Union, Istanbul, Turkey, Aug. 22–26, 2006.*
403. *Cheplakov A.P., Thompson S.* MidPoint Algorithm for Jets Reconstruction in ATLAS Experiment. ATL-PHYS-PUB-2007-007. Geneva: CERN, 2007.
404. *Зорин А., Ахмадов А.* Ассоциативное рождение $t\bar{t}$ -пары с бозоном Хиггса. Доклад на ATLAS JINR Working Meeting, Дубна, 25 дек. 2007 г.

405. *Ahmadov A.I., Boztosun I., Muradov R.K., Soylu A., Dadashov E.A.* Investigation of the Neutralino Pair Production at LHC // Intern. J. Mod. Phys. 2006. V. E15. P. 1183–1208; arXiv:hep-ph/0604172.
406. *Ahmadov A.I.* Radiative Production of the Lightest Neutralino // Phys. Part. Nucl. Lett. 2005. V. 2. P. 85–91 [Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2005. V. 2, No. 2. P. 34–43].
407. *Kukhtin V.V., Krivokhizhin V.G., Stetsenko S.G., Cheplakov A.P.* New Approaches for Searching for the Dirac Magnetic Monopole. JINR Preprint E1-2012-39. Dubna: JINR, 2012.
408. *Kekelidze V.D., Lednicky R., Matveev V.A., Meshkov I.N., Sorin A.S., Trubnikov G.V.* NICA Project at JINR // Springer Proc. Phys. 2016. V. 174. P. 67–73.
409. *Sissakian A.N., Kekelidze V.D., Sorin A.S. (NICA Collab.)*. The Nuclotron-Based Ion Collider Facility at the Joint Institute for Nuclear Research // Nucl. Phys. 2009. V. A827. P. 630C–637C.
410. *Kopeliovich B.Z., Nemchik J., Schafer A., Tarasov A.V.* High-p(T) Hadrons: From SPS via LHC to RHIC // Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions // Proc. 30th Intern. Workshop on Gross Properties of Nuclei and Nuclear Excitations, Hirschegg, Austria, Jan. 13–19, 2002. P. 313–319.
411. *Kopeliovich B.Z., Nemchik J., Schafer A., Tarasov A.V.* Cronin Effect in Hadron Production off Nuclei // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 88. P. 232303; arXiv:hep-ph/0201010.
412. *Kopeliovich B., Tarasov A., Hufner J.* Coherence Phenomena in Charmonium Production off Nuclei at the Energies of RHIC and LHC // Nucl. Phys. 2001. V. A696. P. 669–714; arXiv:hep-ph/0104256.
413. *Pozdnyakov V.* Z^0 Production in pp and Heavy Ions. Talks at ATLAS JINR Physics Workshop, 20 Apr. and 22 Dec. 2006.
414. *Pozdnyakov V., Rosselet L., Vertogradova Y., White S.* Lepton Pair Production in Ultraperipheral Collisions of Heavy Ions. ATL-COM-PHYS-2010-636. Geneva: CERN, 2010.
415. *Pozdnyakov V.* $\gamma\gamma$ -Interactions in HI Collisions. Talks at ATLAS JINR Physics Workshop, 20 Apr. and 22 Dec. 2006.
416. *Pozdnyakov V.N.* Direct Photon and Photon-Jet Measurement Capability of the ATLAS Experiment at the LHC. Talk at 4th Intern. Conf. on Hard and Electromagnetic Probes of High Energy Nuclear Collisions. ATL-COM-PHYS-2010-811. Geneva: CERN, 2010.
417. *Pozdnyakov V.N. (ATLAS Collab.)*. Heavy-Ion Physics with the ATLAS Detector // Phys. Atom. Nucl. 2008. V. 71. P. 1518–1522.
418. *Krivokhizhin V.G., Kotikov A.V.* A Systematic Study of QCD Coupling Constant from Deep-Inelastic Measurements // Phys. Atom. Nucl. 2005. V. 68. P. 1873–1903 [Yad. Fiz. 2005. V. 68. P. 1935].
419. *Bandurin D.* On the Possibility of Measuring the Gluon Distribution Using γ/Z^0 +Jets Events at Tevatron Run II and LHC. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 23 Apr. 2004.
420. *Shaikhatdenov B.G.* QCD Analysis at LHC. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 20 Apr. 2008.
421. *Shaikhatdenov B.G., Kotikov A.V., Krivokhizhin V.G., Parente G.* QCD Coupling Constant at NNLO from DIS Data // Phys. Rev. 2010. V. D81. P. 034008; arXiv:0912.4672 [Erratum: Phys. Rev. 2010. V. D81. P. 079904].

422. *Фадеев Н.Г.* Асимптотическая свобода в механике неупругих столкновений составных частиц при высоких энергиях. Препринт ОИЯИ P2-2009-190. Дубна: ОИЯИ, 2009.
423. *Illarionov A. Yu., Kotikov A. V., Parzycki S. S., Peshekhonov D. V.* New Type of Parametrizations for Parton Distributions // *Phys. Rev.* 2011. V. D83. P. 034014; arXiv:1005.3772.
424. *Collins-Tooth C., Murray W. J., Sarkar R.* Analysis of the $t\bar{t}H$, $H \rightarrow b\bar{b}$ Channel Using a Constrained Fit. ATL-PHYS-INT-2008-034. Geneva: CERN, 2008.
425. *Cheplakov A. P., Saint-Denis R., Thompson A. S.* Signal “Spot” and Mass Window Cut for the Low Mass SM Higgs. ATL-PHYS-PUB-2005-004. Geneva: CERN, 2004.
426. *Cheplakov A., StDenis R., Thompson S.* Standard Model Low Mass Higgs Search in $WH(bb)$. Talk at Protvino ATLAS–Russia Meeting. Dubna: JINR, 2009.
427. *Ahmadov F., Cheplakov A., Javadov N., StDenis R., Thompson S.* Status Report on $WH(bb)$ Analysis. Talk at JINR ATLAS Workshop. Dubna: May 25, 2010.
428. *Soloshenko A., Pisarev I.* MSSM Charged Higgs to Chargino-Neutralino. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 5 May 2010.
429. *Soloshenko A.* ATLAS Search for MSSM Charged Higgs Boson Decaying into Chargino-Neutralino. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 17 Sep. 2009.
430. *Manjavidze J., Sissakian A.* QCD Multijet Processes and the Multiplicity Asymptotics. arXiv:hep-ph/0212137.
431. *Manjavidze J., Sissakian A.* Very High Multiplicity Hadron Processes // *Phys. Rep.* 2001. V. 346. P. 1–88; arXiv:hep-ph/0105245.
432. *Manjavidze J., Sissakian A.* Phenomenology of Very High Multiplicity Hadron Processes. arXiv:hep-ph/0204281.
433. *Budagov J., Kulchitsky Yu., Mandzhavidze J., Rusakovich N., Sisakian A.* On Correlators for High Multiplicity Events // *Phys. Atom. Nucl.* 2004. V. 67. P. 69–71.
434. *Gusev A. A., Lednický R., Rimondi F., Rusakovich N. A., Tsiareshka P. V., Kulchitsky Y. A.* Calculating Particle Correlators with the Account of Detector Efficiency // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10. P. 560–565; arXiv:1207.0309.
435. *Bednyakov V. A., Kovalenko S. G.* On the Singular Component of the Gluon Distribution Function. JINR, E2-85-485. Dubna: JINR, 1985.
436. *Бедняков В. А., Коваленко С. Г.* Глубоконеупругая структура нуклона и глюонный конденсат. Препринт ОИЯИ P2-84-143. Дубна: ОИЯИ, 1984.
437. *Usubov Z.* A Search for Quark Compositeness at the LHC. ATL-COM-PHYS-99-052. Geneva: CERN, 1999.
438. *Usubov Z., Bednyakov V., Budagov J.* Study of the ATLAS Discovery Potential for Standard Model Higgs Bosons Decaying into a Z^0 and a Photon. ATL-COM-PHYS-2008-292. Geneva: CERN, 2008.
439. *Leitner R., Tas P., Shmakova V. V.* Time Resolution of the ATLAS Tile Calorimeter and Its Performance for a Measurement of Heavy Stable Particles. ATL-TILECAL-PUB-2007-002, ATL-COM-TILECAL-2007-008. Geneva: CERN, 2007.
440. *Ciljak M., Jurcovicova M., Tokar S., Baur U.* Top Charge Measurement at ATLAS Detector. PHYS-INT-2003-035, ATLAS. Geneva: CERN, 2003.
441. *Aguilar-Saavedra J., Bartos P., Bednyakov V., Carvalho J., Castro N., Coganeras E., Feng C., Hubaut F., Khramov E., Monnier E., Onofre A., Pallin D., Pralavorio P., Rusakovich N., Stavina P., Tokar S., Tonoyan A., Veloso F.,*

- Zilka B., Zhu C.* Top Quark Properties // Tech. Rep. CERN-OPEN-2008-020. Geneva: CERN, 2009.
442. *Karpova Z., Karpov S., Khramov E., Bednyakov V., Russakovich N.* Prospects for ATLAS Observation of a Neutral Resonance via Its Decay into $t\bar{t}$ -Pair at the LHC Energy of 10 TeV. ATL-COM-PHYS-2010-162. Geneva: CERN, 2010.
443. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Search for $t\bar{t}$ Resonances in the Lepton plus Jets Final State with ATLAS Using 4.7 fb^{-1} of pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ // Phys. Rev. 2013. V. D88, No. 1. P. 012004; arXiv:1305.2756.
444. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. A Search for $t\bar{t}$ Resonances in the Lepton plus Jets Channel Using 2.05 fb^{-1} of pp Collisions at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$. ATLAS-CONF-2012-029. Geneva: CERN, 2012.
445. *Karpova Z.M. (ATLAS Collab.)*. Top Quark Physics with ATLAS // HSQCD-2010, 5–9, July, 2010, Gatchina, Russia. Geneva: CERN, 2010.
446. *Karpova Z., Karpov S., Khramov E., Bednyakov V., Russakovich N.* Search for Heavy Resonance Decaying into $t\bar{t}$ -Pair via $\mu+2b$ -Jets Final State Signature at the LHC Energy of 7 TeV. ATL-COM-PHYS-2011-1688. Geneva: CERN, 2011.
447. *Giokaris N. et al.* Probing the Top-Quark Mass in the Dilepton and Lepton + Jets Channels Using Only Lepton Information. JINR Preprint E1-2005-104. Dubna: JINR, 2005.
448. *Vellidis C., Arabidze G., Giakoumopoulou V., Giokaris N., Manousakis-Katsikakis A.* Probing the Top Quark Mass in the Lepton + Jets and Dilepton Channels by the Use of Lepton Information Only. ATL-COM-PHYS-2007-040. Geneva: CERN, 2007.
449. *Arabidze G., Giokaris N., Giakoumopoulou V., Manousakis-Katsikakis A., Vellidis C., Khubua J., Minashvili I., Bednyakov V., Budagov J., Sissakyan A.* Top Quark Mass in $t\bar{t} \rightarrow \text{Lepton} + \text{Jets}$ Channel from Lepton P_t for 10 TeV CM Energy in ATLAS/LHC. ATL-COM-PHYS-2009-576, ATL-COM-PHYS-2009-569. Geneva: CERN, 2009.
450. *Schwinger J.* Electric- and Magnetic-Charge Renormalization. I and II // Phys. Rev. 1966. V. 151. P. 1048–1054, 1055–1057.
451. *Schwinger J.S.* Magnetic Charge and Quantum Field Theory // Phys. Rev. 1966. V. 144. P. 1087–1093.
452. *Schwinger J.S.* Sources and Magnetic Charge // Phys. Rev. 1968. V. 173. P. 1536–1544.
453. *Schwinger J.S.* Magnetic Charge and the Charge Quantization Condition // Phys. Rev. 1975. V. D12. P. 3105.
454. *Hooft 't G.* Magnetic Monopoles in Unified Gauge Theories // Nucl. Phys. 1974. V. B79. P. 276–284.
455. *Polyakov A.M.* Particle Spectrum in the Quantum Field Theory // JETP Lett. 1974. V. 20. P. 194–195 [Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1974. V. 20. P. 430].
456. *Lopez J.L.* Supersymmetry: From the Fermi Scale to the Planck Scale // Rep. Prog. Phys. 1996. V. 59. P. 819–865; arXiv:hep-ph/9601208.
457. *Bergshoeff E., Eyraes E., Lozano Y.* The Massive Kaluza–Klein Monopole // Phys. Lett. 1998. V. B430. P. 77–86; arXiv:hep-th/9802199.
458. *Dienes K.R., Dudas E., Gherghetta T.* Grand Unification at Intermediate Mass Scales through Extra Dimensions // Nucl. Phys. 1999. V. B537. P. 47–108; arXiv:hep-ph/9806292.
459. *Kephart T.W., Lee C.-A., Shafi Q.* Family Unification, Exotic States and Light Magnetic Monopoles // JHEP. 2007. V. 01. P. 088; arXiv:hep-ph/0602055.

460. *Kurochkin Yu., Satsunkevich I., Shoukavy D., Rusakovich N., Kulchitsky Yu.* On Production of Magnetic Monopoles via Gamma Gamma Fusion at High Energy pp Collisions // *Mod. Phys. Lett.* 2006. V. A21. P. 2873–2880.
461. *Kurochkin Y., Satsunkevich I., Shoukavy D., Kulchitsky Y., Rusakovich N.* The State of the Proposals for Search of the Magnetic Monopoles on LHC at the ATLAS Project. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 24 Dec. 2008.
462. *Kurochkin Y., Satsunkevich I., Shoukavy D., Kulchitsky Y., Rusakovich N.* Monopoles at ATLAS // *Proc. of the Intern. School-Seminar “The Actual Problems of Microworld Physics”*, Gomel, Belarus, July 23 – Aug. 3, 2007. Dubna: JINR, 2008. V. 1. P. 104–111.
463. *Firan A., Lichard P., Goldin D., Shoukavy D., Stroynowski R., Ye J.* Search for Magnetic Monopoles Using the ATLAS Detector. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2008-208. Geneva: CERN, 2008.
464. *Goldin D., Shoukavy D., Tsiareshka P.* Implementing the Process of Monopole Pair Production through the Diphoton Fusion at ATLAS. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2009-587. Geneva: CERN, 2009.
465. *Бедняков В.* Поиск суперсимметрии и темной материи на LHC. Доклад на ATLAS JINR Physics Workshop, 22 апр. 2004 г.
466. *Bednyakov V.A.* Is It Possible to Discover a Dark Matter Particle with an Accelerator? // *Phys. Part. Nucl.* 2016. V. 47, No. 5. P. 711–774; arXiv:1505.04380.
467. *Bogachev D. Yu., Gladyshev A. V., Kazakov D.I., Nechaev A.S.* Light Superpartners at Hadron Colliders // *Intern. J. Mod. Phys.* 2006. V. A21. P. 5221–5240; arXiv:hep-ph/0510252.
468. *Bednyakov V.A., Budagov J.A., Gladyshev A. V., Kazakov D.I., Khoriauli G.D., Khubua D.I.* Search for Gluinos with ATLAS at LHC. JINR, E1-2006-97. Dubna: JINR, 2006; arXiv:hep-ex/0608060.
469. *Bednyakov V., Budagov J., Gladyshev A., Kazakov D., Khramov E., Khubua D.* Prospects for Gluinos Observation with ATLAS in Lepton Mode. ATL-COM-PHYS-2007-048. Geneva: CERN, 2007.
470. *Bernabei R. et al.* Dark Matter Search // *Riv. Nuovo Cim.* 2003. V. 26, No. 1. P. 1–73; arXiv:astro-ph/0307403.
471. *Bernabei R. et al.* Particle Dark Matter: From DAMA/NaI to DAMA/LIBRA // *Phys. Atom. Nucl.* 2006. V. 69. P. 2056–2067.
472. *Bernabei R. et al.* Dark Matter Particles in the Galactic Halo // *Phys. Atom. Nucl.* 2009. V. 72. P. 2076–2088.
473. *Bernabei R.* The DAMA Project // *Intern. J. Mod. Phys.* 2016. V. A31, No. 31. P. 1642001.
474. *Bednyakov V.A., Klapdor-Kleingrothaus H.V.* On Dark Matter Search after DAMA with Ge-73 // *Phys. Rev.* 2004. V. D70. P. 096006; arXiv:hep-ph/0404102.
475. *Hartman R.C. et al. (EGRET Collab.).* The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources // *Astrophys. J. Suppl.* 1999. V. 123. P. 79.
476. *Cillis A.N., Hartman R.C.* EGRET Diffuse Gamma-Ray Maps between 30 MeV and 10 GeV // *Astrophys. J.* 2005. V. 621. P. 291–295.
477. *Bednyakov V.A., Budagov J.A., Gladyshev A. V., Kazakov D.I., Khramov E. V., Khubua D.I.* Lepton Decay Channels of EGRET Gluinos at the LHC // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5. P. 520–530.
478. *Bednyakov V.A., Budagov Yu.A., Gladyshev A. V., Kazakov D.I., Khramov E. V., Khubua D.I.* On the LHC Observation of Gluinos from the EGRET-Preferred Region // *Phys. Atom. Nucl.* 2009. V. 72. P. 619–637.

479. *Kazakov D.* SUSY and LHC. The Challenge. Talk at Russian Meeting “Physics and Computing in ATLAS”, Protvino, 19–20 Sept. 2007.
480. *Karpov S.* Pair Gaugino Production and Their Decay into Several Leptons in Final States. Talk at JINR ATLAS Workshop, Dubna, Apr. 22, 2008.
481. *Karpov S., Khramov E., Pikelner A., Bednyakov V., Budagov J., Khubua D.* Prospects for SUSY Search in Inclusive One-Lepton Events $pp \rightarrow l\ell + 4j + E_{T_{\text{miss}}} + X$. ATL-COM-PHYS-2010-161. Geneva: CERN, 2010.
482. *Dietrich J. (ATLAS Collab.).* ATLAS SUSY Search Prospects at 10 TeV. arXiv:0910.5653.
483. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Prospects for Supersymmetry and Universal Extra Dimensions Discovery Based on Inclusive Searches at a 10 TeV Centre-of-Mass Energy with the ATLAS Detector. ATL-PHYS-PUB-2009-084. Geneva: CERN, 2009.
484. *Karpov S.N., Karpova Z.M., Bednyakov V.A.* Potential of the ATLAS Detector for Studying High-Energy Solar Cosmic Rays // Phys. Atom. Nucl. 2009. V. 72. P. 1253–1258 [Yad. Fiz. 2009. V. 72. P. 1305].
485. *Karpov S.N., Karpova Z.M., Bednyakov V.A.* Prospects for Studies of High-Energy Solar Cosmic Rays with ATLAS. ATL-COM-PHYS-2008-223. Geneva: CERN, 2008; arXiv:0811.2921.
486. *Bednyakov V.A., Lykasov G.I., Poghosyan M.G.* Gluons in Proton and Soft pp Collisions at High Energies // Workshop on Hadron Structure and QCD: From Low to High Energies (HSQCD 2010), Gatchina, St. Petersburg, Russia, July 5–9, 2010; arXiv:1010.0841.
487. *Lykasov G.I., Bednyakov V.A., Grinyuk A.A., Poghosyan M., Dolbilov A.G.* Gluon Distribution in Proton at Soft and Hard pp Collisions // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2011. V. 219–220. P. 225–228; arXiv:1109.1469.
488. *Bednyakov V.A., Grinyuk A.A., Lykasov G.I., Poghosyan M.* Role of Gluons in Soft and Semi-Hard Multiple Hadron Production in pp Collisions at LHC // Intern. J. Mod. Phys. 2012. V. A27. P. 1250042; arXiv:1104.0532.
489. *Lykasov G.I., Grinyuk A.A., Bednyakov V.A.* Saturation of Gluon Density and Soft pp Collisions at LHC // Hadron Structure and QCD, Gatchina, 4–8 July, 2012; arXiv:1301.5156.
490. *Lykasov G.I., Grinyuk A.A., Bednyakov V.A.* Saturation of Gluon Density and Soft pp Collisions at LHC // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44. P. 568–572.
491. *Grinyuk A.A., Lipatov A.V., Lykasov G.I., Zotov N.P.* Transition between Soft Physics at the LHC and Low- x Physics at HERA // Phys. Rev. 2013. V. D87, No. 7. P. 074017; arXiv:1301.4545.
492. *Grinyuk A.A., Jung H., Lykasov G.I., Lipatov A.V., Zotov N.P.* Unintegrated Gluon Distribution and Soft pp Collisions at LHC // Proc. 3rd Intern. Workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC (MPI@LHC 2011), Hamburg, Germany, 21–25 Nov. 2011. 2012. P. 169–176; arXiv:1203.0939.
493. *Lipatov A.V., Lykasov G.I., Zotov N.P.* LHC Soft Physics and Transverse Momentum Dependent Gluon Density at Low x // Phys. Rev. 2014. V. D89, No. 1. P. 014001; arXiv:1310.7893.
494. *Grinyuk A.A., Lipatov A.V., Lykasov G.I., Zotov N.P.* Significance of Non-perturbative Input to the Transverse Momentum Dependent Gluon Density for Hard Processes at the LHC // Phys. Rev. 2016. V. D93, No. 1. P. 014035; arXiv:1510.07849.
495. *Lykasov G.I., Grinyuk A.A., Lipatov A.V., Zotov N.P.* Significance of Gluon Density for Soft and Hard Processes at LHC // PoS. 2016. V. DIS2016. P. 038.

496. *Lykasov G., Bednyakov V.* Monitoring of Charmed and Beauty Quark Distributions in Proton at LHC // *Fizika.* 2008. V.B17. P.293–298; arXiv:0801.2093.
497. *Artemenkov D.A., Bednyakov V.A., Lykasov G.I.* Forward Production of Heavy Flavour Hadrons in pp Collisions and Intrinsic Charm and Bottom in Proton // *Proc. 40th Intern. Symp. on Multiparticle Dynamics (ISMD 2010).* P.269–274; arXiv:1010.0835.
498. *Artemenkov D.A., Bednyakov V.A., Lykasov G.I.* Forward Λ_b Production in pp Collisions at LHC // *Physics at the LHC2010. Proc. 5th Conf., PLHC2010, Hamburg, Germany, June 7–12, 2010;* arXiv:1007.3903.
499. *Lykasov G.I., Artemenkov D.A., Bednyakov V.A.* Forward Λ_b Production in pp -Collisions at LHC // *Physics at the LHC2010. Proc. 5th Conf., PLHC2010, Hamburg, Germany, June 7–12, 2010.* P.400–402.
500. *Lykasov G.I., Karpova Z.M., Sergeenko M.N., Bednyakov V.A.* Transverse Momentum Spectra of D and B Mesons in Hadron Collisions at High Energies // *Europhys. Lett.* 2009. V. 86, No. 6. P. 61001.
501. *Lykasov G.I., Karpova Z.M., Sergeenko M.N., Bednyakov V.A.* Transverse Momentum Spectra of D and B Mesons in Hadron Collisions at High Energies // *PoS.* 2008. V.2008LHC. P. 119; arXiv:0812.3220.
502. *Lykasov G.I., Lyubushkin V.V., Bednyakov V.A.* Open Charm and Beauty Production in Hadron Reactions // *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 2010. V.198. P. 165–173; arXiv:0909.5061.
503. *Lykasov G.I., Lyubushkin V.V., Lyubushkina T.V., Bednyakov V.A.* Beauty Baryon Production in pp Collisions at LHC and b Quark Distribution in Proton // *Elastic and Diffractive Scattering. Proc. 13th Intern. Conf., Blois Workshop, June 29 – July 3, 2009. Geneva: CERN, 2009.* P.422–428; arXiv:0910.0134.
504. *Bednyakov V.A., Lykasov G.I., Lyubushkin V.V.* Forward Production of Beauty Baryons in pp Collisions at LHC // *Europhys. Lett.* 2010. V.92. P.31001; arXiv:1005.0559.
505. *Brodsky S.J., Hoyer P., Peterson C., Sakai N.* The Intrinsic Charm of the Proton // *Phys. Lett.* 1980. V.B93. P. 451–455.
506. *Lykasov G.I., Grinyuk A.A., Bednyakov I.V., Stepanenko Yu. Yu.* Proton Structure from Hard p - p Processes at High Energies // *Proc. 22nd Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics, ISHEPP 2014;* arXiv:1412.8030.
507. *Brodsky S.J., Bednyakov V.A., Lykasov G.I., Smiesko J., Tokar S.* The Physics of Heavy Quark Distributions in Hadrons: Collider Tests // *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2017. V. 93. P. 108; arXiv:1612.01351.
508. *Artemenkov D.A., Bednyakov V.A., Lykasov G.I.* Forward Heavy Baryon Production in pp Collisions at LHC // *Workshop on Hadron Structure and QCD: From Low to High Energies, HSQCD 2010, Gatchina, St. Petersburg, Russia, July 5–9, 2010;* arXiv:1010.1392.
509. *Lykasov G.I., Bednyakov V.A., Pikelner A.F., Zimine N.I.* Forward Heavy Flavour Production in p - p Collisions at LHC and Intrinsic Quark Components in Proton // *Europhys. Lett.* 2012. V. 99. P. 21002; arXiv:1205.1131.
510. *Lykasov G., Grinyuk A., Bednyakov I.* Heavy Flavour Production in pp Collisions and Intrinsic Quark Components in Proton // *PoS.* 2012. V. Baldin-ISHEPP-XXI. P. 074; arXiv:1212.6381.
511. *Brodsky S.J., Peterson C., Sakai N.* Intrinsic Heavy Quark States // *Phys. Rev.* 1981. V. D23. P. 2745.

512. *Lykasov G.I., Bednyakov I.V., Demichev M.A., Stepanenko Yu.Yu.* Nucleon Structure and Hard p - p Processes at High Energies // Nucl. Phys. Proc. Suppl. 2013. V. 245. P. 215–222; arXiv:1309.3168.
513. *Bednyakov V.A., Demichev M.A., Lykasov G.I., Stavreva T., Stockton M.* Searching for Intrinsic Charm in the Proton at the LHC // Phys. Lett. 2014. V. B728. P. 602–606; arXiv:1305.3548.
514. *Bednyakov V.A., Demichev M.A., Lykasov G.I., Stavreva T., Stockton M.* Searching for Intrinsic Charm in the Proton at the LHC // EPJ Web Conf. 2013. V. 60. P. 20047.
515. *Beauchemin P.-H., Bednyakov V.A., Lykasov G.I., Stepanenko Yu.Yu.* Search for Intrinsic Charm in Vector Boson Production Accompanied by Heavy Flavor Jets // Phys. Rev. 2015. V. D92, No. 3. P. 034014; arXiv:1410.2616.
516. *Lipatov A.V., Lykasov G.I., Stepanenko Yu.Yu., Bednyakov V.A.* Probing Proton Intrinsic Charm in Photon or Z Boson Production Accompanied by Heavy Jets at the LHC // Phys. Rev. 2016. V. D94, No. 5. P. 053011; arXiv:1606.04882.
517. *Lykasov G., Grinyuk A.A., Bednyakov I.V., Stepanenko Yu.Yu.* Proton Structure from Hard p - p Collisions at High Energies // PoS. 2015. V. BaldinISHEPPXXII. P. 029.
518. *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Budagov J.A.* Proposal for Chiral Bosons Search at LHC via Their Unique New Signature // Phys. Atom. Nucl. 2008. V. 71. P. 2096–2100; arXiv:0801.4235.
519. *Chizhov M.V., Dvali G.* Origin and Phenomenology of Weak-Doublet Spin-1 Bosons // Phys. Lett. 2011. V. B703. P. 593–598; arXiv:0908.0924.
520. *Chizhov M.V.* Theory and Phenomenology of Spin-1 Chiral Particles // Phys. Part. Nucl. 2011. V. 42. P. 93–183.
521. *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Boyko I.R., Budagov J.A., Demichev M.A., Yeletsikh I.V.* Anomalously Interacting New Extra Vector Bosons and Their First LHC Constraints // Phys. Part. Nucl. 2012. V. 43. P. 311–325; arXiv:1110.3149.
522. *Bednyakov V.A., Yeletsikh I.V., Chizhov M.V., Boyko I.R.* Anomalously Interacting Z^* Bosons: An Example of JINR's Contribution to Physics at LHC // Phys. Usp. 2016. V. 59, No. 4. P. 403–410 [Usp. Fiz. Nauk. 2016. V. 186, No. 4. P. 425–434].
523. *Chizhov M.V.* Heavy Chiral Bosons Search at Hadron Colliders. arXiv:0705.3944.
524. *Chizhov M.V.* A Reference Model for Anomalously Interacting Bosons // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8. P. 512–516; arXiv:1005.4287.
525. *Chizhov M., Bednyakov V., Budagov J., Fedin O., Maleev V., Sedykh E.* Search for Spin-1 Excited Bosons with ATLAS. ATL-COM-PHYS-2009-609. Geneva: CERN, 2009; ATL-PHYS-INT-2010-022. Geneva: CERN, 2010.
526. *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Budagov J.A.* A Unique Signal of Excited Bosons in Dijet Data from pp -Collisions // Phys. Atom. Nucl. 2012. V. 75. P. 90–96; arXiv:1010.2648.
527. *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Budagov J.A.* On Resonance Search in Dijet Events at the LHC. arXiv:1106.4161.
528. *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Budagov J.A.* On Resonance Search in Dilepton Events at the LHC // Phys. Part. Nucl. Lett. 2013. V. 10. P. 144–146; arXiv:1109.6876.
529. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Search for High Mass Dilepton Resonances in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Experiment // Phys. Lett. 2011. V. B700. P. 163–180; arXiv:1103.6218.

530. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for High-Mass States with One Lepton plus Missing Transverse Momentum in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Lett. 2011. V. B701. P. 50–69; arXiv:1103.1391.
531. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for High-Mass Resonances Decaying to Dilepton Final States in pp -Collisions at $s^{1/2} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2012. V. 11. P. 138; arXiv:1209.2535.
532. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for High-Mass Dilepton Resonances in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Rev. 2014. V. D90, No. 5. P. 052005; arXiv:1405.4123.
533. Yeletskikh I., Bednyakov V., Chizhov M. Search for Z^* Boson at ATLAS Detector // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45. P. 254–256.
534. Yeletskikh I. V., Bednyakov V. A. Results of Searches for Dubna Resonance Z^* in Dimuon Channel in ATLAS Data // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 1. P. 29–34.
535. Chizhov M. V., Boyko I. R., Bednyakov V. A., Budagov J. A. Hadron Collider Potential for Excited Bosons Search // Phys. Part. Nucl. 2014. V. 45, No. 3. P. 517–528.
536. Chizhov M. V., Bednyakov V. A., Budagov J. A. Hadron Collider Potential for Excited Bosons Search: A Snowmass Whitepaper. arXiv:1307.7274.
537. Chizhov M. V., Bednyakov V. A. Signatures of Lower Scale Gauge Coupling Unification in the Standard Model Due to Extended Higgs Sector // Phys. Atom. Nucl. 2016. V. 79, No. 5. P. 721–725; arXiv:1509.07610.
538. Dvergsnes E. W., Osland P., Pankov A. A., Paver N. Center Edge Asymmetry at Hadron Colliders // Phys. Rev. 2004. V. D69. P. 115001; arXiv:hep-ph/0401199.
539. Pankov A. A. Identification of Extra Spatial Dimensions in Dilepton Production at LHC. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 22 Dec. 2004.
540. Pankov A. A., Serenkova I. A., Tsytrinov A. V., Bednyakov V. A. Searches for and Identification of Effects of Extra Spatial Dimensions in Dilepton and Diphoton Production at the Large Hadron Collider // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78, No. 4. P. 463–476 [Yad. Fiz. 2015. V. 78, No. 6. P. 499].
541. Serenkova I. A., Pankov A. A., Tsytrinov A. V., Bednyakov V. A. Spin Identification of Graviton Resonances in the Process $pp \rightarrow e^+e^- + X$ at the Large Hadron Collider (LHC) // Phys. Atom. Nucl. 2010. V. 73. P. 1266–1282 [Yad. Fiz. 2010. V. 73. P. 1307].
542. Pankov A., Serenkova I., Tsytrinov A., Bednyakov V., Rusakovich N. Centre-Edge Asymmetry in the ADD and RS Scenarios in Lepton Pair Production at LHC Energies. Identifying Large Extra Dimensions in Dilepton Production at the LHC with Center-Edge Asymmetry and with Angular Distribution. Optimal Observables for Extra Dimensions Search in Dilepton Production at LHC. Searching for and Identifying Narrow Graviton Resonances with Center-Edge Asymmetry at the LHC. Talks at ATLAS JINR Physics Workshops, 2005–2008.
543. Andreev V. V., Pankov A. A., Bednyakov V. A. Effects of Z - Z' Mixing in Double W -Bosons Production at the Large Hadron Collider // Phys. Atom. Nucl. 2015. V. 78, No. 6. P. 725–739 [Yad. Fiz. 2015. V. 78, No. 9. P. 775].
544. Pankov A. A., Tsytrinov A. V., Bednyakov V. A. High Precision Determination of Z - Z' Mixing in Diboson Production at the LHC // Nonlinear Phenom. Complex Syst. 2016. V. 19, No. 2. P. 196–201.
545. Pankov A., Tsytrinov A., Bednyakov V. Precise Determination of Z - Z' Mixing in Charged Gauge Boson Pair Production at the CERN LHC // EPJ Web Conf. 2016. V. 125. P. 02020.

546. *Pankov A. A., Serenkova I. A., Tsytrinov A. V., Bednyakov V. A.* Prospects for Identification the Direct and Indirect Effects of Extra Spatial Dimensions at the Large Hadron Collider // *Phys. Part. Nucl.* 2017. V. 48, No. 3. P. 415–454.
547. *Höfle W. et al.* LHC Transverse Feedback System and Its Hardware Commissioning // *Conf. Proc.* 2008. V. C0806233. P. THPC121.
548. *Zhabitsky V. M., Höfle W.* LHC Transverse Feedback System: First Results of Commissioning // *JINR News.* 2009. No. 2. P. 11–14.
549. *Ivanov I. N., Zhabitsky V. M., Korenev I. L., Yudin L. A., Kopylov L. I.* Requirements to the Feedback System to Damp Resistive Instability (I Stage UNK) // *Intern. J. Mod. Phys. Proc. Suppl.* 1993. V. A2B. P. 1034–1036.
550. *Gorbachev E. V. et al.* LHC Transverse Feedback System: First Results of Commissioning // *Particle Accelerators. Proc. 21st Russian Conf., RuPAC 2008, Zvenigorod, Russia, Sept. 28 – Oct. 3, 2008.* P. 97–100.
551. *Zhabitsky V. M.* Beam Stability in Synchrotrons with Digital Transverse Feedback Systems in Dependence on Beam Tunes // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2012. V. 9. P. 337–341 [*Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra.* 2012. V. 9, No. 4–5. P. 563].
552. *Höfle W.* Progress in Transverse Feedbacks and Related Diagnostics for Hadron Machines // *Proc. 4th Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC 2013, Shanghai, China, May 12–17 2013.* P. FRXCA01.
553. *Zhabitsky V. M.* Beam Dynamics in Synchrotrons with Digital Wideband Transverse Feedback Systems // *Phys. Part. Nucl.* 2014. V. 45. P. 472–507.
554. *Zhabitsky V.* Damping of Injection Oscillations // *Conf. Proc.* 1997. V. C970512. P. 2329.
555. *Höfle W., Linnekar T., Louwerse R., Tueckmantel J., Gorbachev E., Ivanov I., Kossoukhine V., Lebedev N., Melnikov V., Rabtsoun S.* Transverse Damping Systems for the Future CERN LHC // *Conf. Proc.* 2001. V. C0106181. P. 1237–1239.
556. *Gorbatshev E., Melnikov V., Höfle W.* Computer Simulation of the Electrical Circuit of the Wideband Power Amplifier for the Transverse Damping System of LHC. LHC Project Note 259. Geneva: CERN, 2001.
557. *Zhabitsky V. M.* Beam Dynamics in Synchrotrons with Feedback Systems // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10. P. 580–586.
558. *Zhabitsky V. M., Chizhova O. N.* Damping of Coherent Betatron Oscillations of a Charged Particle Beam in Synchrotrons with a Feedback System // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11. P. 581–583.
559. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Drift Time Measurement in the ATLAS Liquid Argon Electromagnetic Calorimeter Using Cosmic Muons // *Eur. Phys. J.* 2010. V. C70. P. 755–785; arXiv:1002.4189.
560. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Readiness of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter for LHC Collisions // *Eur. Phys. J.* 2010. V. C70. P. 723–753; arXiv:0912.2642.
561. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* The ATLAS Inner Detector Commissioning and Calibration // *Eur. Phys. J.* 2010. V. C70. P. 787–821; arXiv:1004.5293.
562. *Soloshenko A.* Identification and Energy Calibration of Hadronically Decaying Tau Leptons with ATLAS // *Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2015-974.* Geneva: CERN, 2015. Contribution to “LHC Physics”. St. Petersburg, Russia, Aug. 31 – Sep. 5, 2015.
563. *Davey W., Soloshenko A. et al.* Commissioning of the ATLAS Tau-Lepton Reconstruction Using pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. *Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2015-633.* Geneva: CERN, 2015.

564. *Mitani T., Soloshenko A. et al.* Measurement of the Tau Lepton Reconstruction and Identification Performance in the ATLAS Experiment Using pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2016-929. Geneva: CERN, 2016.
565. *Kim H. Y. et al. (ATLAS Tile Calorimeter System Collab.)*. Design of a Portable Test Facility for the ATLAS Tile Calorimeter Front-End Electronics Verification // Proc. 2013 IEEE Nuclear Science Symp. and Medical Imaging Conf., NSS/MIC 2013.
566. *Moreno P. et al.* A New Portable Test Bench for the ATLAS Tile Calorimeter Front-End Electronics // JINST. 2013. V. 8, No. 02. P. C02046.
567. *Alves J. et al.* A New Portable Test Bench for the Tile Calorimeter Super-Drawers. ATL-COM-TILECAL-2014-062. Geneva: CERN, 2014.
568. *Minashvili I.* ATLAS Tile Calorimeter Maintenance. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
569. *Abdallah J. et al. (ATLAS Tile Calorimeter System Collab.)*. The Laser Calibration of the ATLAS Tile Calorimeter during the LHC Run 1 // JINST. 2016. V. 11, No. 10. P. T10005; arXiv:1608.02791.
570. *Abat E. et al.* Response and Shower Topology of 2 to 180 GeV Pions Measured with the ATLAS Barrel Calorimeter at the CERN Test-Beam and Comparison to Monte Carlo Simulations. ATL-CAL-PUB-2010-001, ATL-COM-CAL-2010-004. Geneva: CERN, 2010.
571. *Davidek T., Djobava T., Dotti A., Henriques A., Khramov E., Mchedlidze G., Mosidze M., Solodkov A., Vivarelli I.* Study of Tile Calorimeter Sampling Fraction // Tech. Rep. ATL-TILECAL-INT-2011-003. Geneva: CERN, 2011.
572. *Karpov S. N.* Simulation and Validation of the ATLAS Tile Calorimeter Response. ATL-COM-TILECAL-2014-021. Geneva: CERN, 2014. Contribution to Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, Russia, 24 Feb. – 1 Mar. 2014.
573. *Будагов Ю. А., Ляблин М. В.* Устройство для измерения угла наклона. Патент на изобретение № 2510488, приоритет от 30 мая 2012 г., Российская Федерация, 2014.
574. *Azaryan N. et al.* The Precision Laser Inclinator Long-Term Measurement in Thermo-Stabilized Conditions (First Experimental Data) // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 4. P. 532–535.
575. *Batusov V., Budagov J., Lyablin M., Shirkov G., Gayde J.-C., Mergelkuhl D.* The Sensitivity Limitation by the Recording ADC to Laser Fiducial Line and Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 7. P. 813–818 [Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2015. V. 12, No. 7. P. 1264–1271].
576. *DiGirolamo B.* The Monitoring of the Effects of Earth Surface Inclination with the Precision Laser Inclinator for High Luminosity Colliders. Talk at RuPAC 2016, XXV Russian Particle Accelerator Conf., 21–25 Nov. 2016, Saint Petersburg.
577. *Batusov V., Budagov J., Lyablin M., Shirkov G., Gayde J.-C., Mergelkuhl D.* The Calibration of the Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 7. P. 819–823 [Pis'ma Fiz. Elem. Chast. Atom. Yadra. 2015. V. 12, No. 7. P. 1272–1278].
578. *Azaryan N., Budagov J., Gayde J.-C., Girolamo B., Glagolev V., Lyablin M., Mergelkuhl D., Shirkov G.* The Innovative Method of High Accuracy Interferometric Calibration of the Precision Laser Inclinator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2017. V. 14, No. 1. P. 112–122.

579. *Azaryan N. et al.* Comparative Analysis of Earthquakes Data Recorded by the Innovative Precision Laser Inclinometer Instruments and the Classic Hydrostatic Level System // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14, No. 3. P. 480–492.
580. *Lyubushkina T., Lyubushkin V.* Search for Exotic θ^+ -Baryon (1540) in Minimum Bias Data (Period A); Search for Exotic θ^+ -Baryon in Minimum Bias Data (Period A,B). Talks at ATLAS JINR Physics Workshops and Russian ATLAS Meeting, 2010–2011.
581. *Lyubushkina T.V., Lyubushkin V.V., Bednyakov V.A., Pozdnyakov V.N.* Study of Light Resonance Production and Search for the Exotic Pentaquark θ^+ Resonance in 7 TeV Collision Data with ATLAS Detector. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2011-420. Geneva: CERN, 2011.
582. *Lyubushkin V.* JINR Physics Results with ATLAS. Talk at 34th Meeting of JINR PAC for Particle Physics, Jan. 25, 2011.
583. *Khramov E., Bednyakov V., Lyubushkin V., Pozdnyakov V.* ρ_0 Meson Mass Measurement. Talk at JINR ATLAS Workshop, Sep. 8, 2011.
584. *Lyubushkin V., Lyubushkina T., Pozdnyakov V.* $\varphi(1020)$ -Meson in Minimum Bias Data (900 GeV and 7 TeV MinBias Samples). Talk at JINR ATLAS Workshop, Dec. 15, 2010.
585. *Schott M., Colijn A., Koffeman E., Kayl M.* $\Phi(1020)$ -Meson Production in 900 GeV Collision Data (A Detailed Discussion). Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2010-229. Geneva: CERN, 2010.
586. *Adams J. et al. (STAR Collab.).* ρ_0 Production and Possible Modification in Au + Au and $p + p$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 92. P. 092301; arXiv:nucl-ex/0307023.
587. *Pozdnyakov V.* Light Mesons in 7 TeV Data. Talk at Soft QCD ATLAS Working Group, June 24, 2010.
588. *Pozdnyakov V.N., Vertogradova Yu.L.* Direct Photon and Photon-Jet Measurement Capability of the ATLAS Experiment at the LHC // *Nucl. Phys.* 2011. V. A855. P. 343–346.
589. *Pozdnyakov V., Olszewski A., Vertogradova Y., Rosselet L., Budick B., Bednyakov V., White S.* Study of Ultraperipheral Interactions in Heavy Ion Collisions. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2011-461. Geneva: CERN, 2011.
590. *Pozdnyakov V., Ereditato A., Olszewski A., Vertogradova Y., Rosselet L., Beck H., Budick B., Bednyakov V., White S.* Measurement of the Muon Pair Production Cross Sections in Ultraperipheral Pb–Pb Collisions. Tech. Rep. ATLAS-COM-CONF-2011-182. Geneva: CERN, 2011.
591. *Goncalves V.P., Machado M. V. T.* Vector Meson Production in Coherent Hadronic Interactions: An Update on Predictions for RHIC and LHC // *Phys. Rev.* 2011. V. C84. P. 011902; arXiv:1106.3036.
592. *Pozdnyakov V., Vertogradova Y.* The J/ψ Production in Ultraperipheral Pb–Pb Collisions with the Mutual Electromagnetic Ion Dissociation. Tech. Rep. ATLAS-COM-CONF-2013-098. Geneva: CERN, 2013.
593. *Pozdnyakov V., Vertogradova Y.* First Evidence of $\gamma\gamma \rightarrow \rho + J/\psi$ Scattering. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-1427. Geneva: CERN, 2013.
594. *Pozdnyakov V., Vertogradova Y.* Luminosity Determination from Two-Photon Production of Di-Muon Pairs in PbPb Collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV Using the ATLAS Detector in 2011. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2015-058. Geneva: CERN, 2015.
595. *Soloshenko A., Pisarev I.* Charged Higgs and SUSY Searches in Multilepton Channel. Talks at ATLAS JINR Physics Workshop, 3 Mar. and 4 Apr. 2011.

596. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. A Search for $t\bar{t}$ Resonances Using Lepton-plus-Jets Events in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2015. V. 08. P. 148; arXiv:1505.07018.
597. *Huseynov N., Bednyakov V., Khramov E.* Top Quark Charge Measurement via Determination of Its Decay Products Charges. Talk at ATLAS JINR Physics Weekly Meeting, 21 Feb. 2012.
598. *Tokar S.* Top Quark Studies with the ATLAS Detector. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2014-1218. Geneva: CERN, 2014; Proc. Hadron Structure and QCD 2014, Gatchina, Russian Federation, 30 June – 4 July 2014.
599. *Lyubushkin V., Gladilin L.* Measurement of Ξ_b and Search for Excited Ξ_b^* Baryons. Talk at B-Physics Working Group Meeting, 29 June 2012.
600. *Kulchitsky Y., Tsiareshka P., Budagov J., Plotnikova E., Shigaev V., Vinogradov V., Tokar S.* Correlators and Their Ratio at 900 GeV with ATLAS Minimum-Bias Events: First Results. Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 25 May 2010.
601. *Kepka O., Kulchitsky Y., Rusakovich N., Sarkisyan-Grinbaum E., Tsiareshka P., Vinogradov V.* Study of Energy Correlators in pp Collisions at 7 TeV with the ATLAS Detector at the LHC. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-798. Geneva: CERN, 2012.
602. *Budagov J., Kepka O., Kulchitsky Y., Sarkisyan-Grinbaum E., Tsiareshka P., Vinogradov V.* Study of the Particle Momentum Correlators in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector at the LHC. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-943. Geneva: CERN, 2013.
603. *Kulchitsky Y., Lednický R., Rimondi F., Rusakovich N., Tsiareshka P.* Calculating Particle Correlators with the Account of Detector Efficiency: Support Note for the ATL-COM-PHYS-2012-798. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-1347. Geneva: CERN, 2012.
604. *Budagov I., Kepka O., Kulchitsky Y., Sarkisyan-Grinbaum E., Tsiareshka P., Vinogradov V.* Study of the Transverse Momentum Particle Correlators in pp Collisions at 7 TeV with the ATLAS Detector. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2015-373. Geneva: CERN, 2015.
605. *Стадник А., Чернов Н., Шиманский С.* Корреляторы и моменты. Сообщ. ОИЯИ Р11-2003-143. Дубна: ОИЯИ, 2003.
606. *Shimansky S.* Correlators, Correlations and Moments. Talk at DLNP Seminar, Apr. 1, 2009.
607. *Lykasov G., Bednyakov V., Priezzhev V.* Role of Correlators for High Multiplicity at LHC. Talk at JINR ATLAS Working Group Workshop, Apr. 4, 2012.
608. *Kulchitsky Y., Plotnikova E., Rusakovich N., Tsiareshka P.* Study of Bose-Einstein Correlations at 0.9 and 7 TeV with ATLAS. Talk at JINR ATLAS Meeting. Dubna, Dec. 12, 2011.
609. *Kulchitsky Y.* Study of Bose-Einstein Correlations. Status Report. Talk at ATLAS Standard Model Plenary Meeting, CERN, Feb. 9, 2012.
610. *Zenin O. (ATLAS Collab.)*. Measurements of Bose-Einstein Correlations with the ATLAS Detector // Proc. 7th Intern. Workshop on Multiple Partonic Interactions at the LHC (MPILHC 2015), Miramare, Trieste, Italy, Nov. 23–27, 2015. 2016. P. 207–214.
611. *Sykora I. (ATLAS Collab.)*. Measurements of Bose-Einstein Correlations with the ATLAS Detector // PoS. 2015. V. DIS2015. P. 157.

612. *Astalos R., Sykora I., Tokar S., Zenis T.* Bose–Einstein Correlations in pp Interactions at 7 TeV. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-1409. Geneva: CERN, 2012.
613. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Two-Particle Bose–Einstein Correlations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV Measured with the ATLAS Detector // Eur. Phys. J. 2015. V. C75, No. 10. P. 466; arXiv:1502.07947.
614. *Kulchitsky Y., Plotnikova E., Rusakovich N., Tsiareshka P.* Two-Particle Bose–Einstein Correlations in pp Interactions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV with ATLAS at LHC. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-493. Geneva: CERN, 2012.
615. *Kulchitsky Y., Plotnikova E., Rusakovich N., Tsiareshka P.* Two-Particle Bose–Einstein Correlations of High Multiplicity Charged Hadrons in pp Interactions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS at LHC. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-507. Geneva: CERN, 2012.
616. *Kulchitsky Y., Plotnikova E., Rusakovich N., Tsiareshka P.* Systematics for Two-Particle Bose–Einstein Correlations in pp Interactions at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV and $\sqrt{s} = 7$ TeV (HMT) with ATLAS at LHC. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-1142. Geneva: CERN, 2012.
617. *Astalos R., Kulchitsky Y., Plotnikova E., Rusakovich N., Sarkisyan-Grinbaum E., Sykora I., Todorova S., Tokar S., Tsiareshka P., Zenis T.* Measurement of the Momentum Difference between Charged Hadrons with the ATLAS Detector. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-1305. Geneva: CERN, 2012. Supporting note for the correlation studies, in particular the measurement of the Bose–Einstein correlations.
618. *Kulchitsky Y. (ATLAS Collab.).* Bose–Einstein Correlations and Results on Minimum Bias Interactions, Underlying Event and Particle Production from ATLAS // EPJ Web Conf. 2016. V. 120. P. 01001.
619. *Kulchitsky Y.* Measurement of the Underlying-Event Properties with the ATLAS Detector. arXiv:1608.04954.
620. *Astalos R., Kulchitsky Y., Plotnikova E., Rusakovich N., Sykora I., Tokar S., Tsiareshka P., Zenis T.* Two-Particle Bose–Einstein Correlations in pp Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV Measured with the ATLAS Detector at the LHC: Support Note. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2016-1621. Geneva: CERN, 2016.
621. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.).* Measurement of Z Boson Production in Pb + Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110, No. 2. P. 022301; arXiv:1210.6486.
622. *Pozdnyakov V.N.* Hard Probes at ATLAS // Proc. 50th Rencontres de Moriond, QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Italy, March 21–28, 2015. P. 251.
623. *Abdelalim A., Chizhov M. et al.* Search for High Mass Dielectron Resonances at $\sqrt{s} = 7$ TeV. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2011-083. Geneva: CERN, 2011.
624. *Chizhov M.V., Bednyakov V.A., Boyko I.R., Budagov J.A., Demichev M.A., Yeletskikh I.V.* First LHC Constraints on Anomalously Interacting New Vector Bosons // Proc. 15th Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics (LomCon). “Particle Physics at the Tercentenary of Mikhail Lomonosov”. 2013. P. 38–41; arXiv:1110.5533.
625. *Allen K., Chizhov M., Yeletskikh I. et al.* Search for High-Mass Dilepton Resonances in 21 fb⁻¹ of pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2013-1033. Geneva: CERN, 2013. Supporting documentation for the paper on the full 2012 data set at 8 TeV.
626. *Adams D., Chizhov M. et al.* Search for High-Mass States with Lepton plus Missing Transverse Energy Using the ATLAS Detector with 36 pb⁻¹ of

- pp* Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. Tech. Rep. ATL-PHYS-INT-2012-005. Geneva: CERN, 2012.
627. Aad G. *et al.* (ATLAS Collab.). Search for a Heavy Gauge Boson Decaying to a Charged Lepton and a Neutrino in 1 fb^{-1} of *pp* Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV Using the ATLAS Detector // Phys. Lett. 2011. V. B705. P. 28–46; arXiv:1108.1316.
628. Aad G. *et al.* (ATLAS Collab.). Search for New Particles in Events with One Lepton and Missing Transverse Momentum in *pp* Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2014. V. 09. P. 037; arXiv:1407.7494.
629. ATLAS Collab. Search for High-Mass States with One Lepton plus Missing Transverse Momentum in *pp* Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2014-017. Geneva: CERN, 2014.
630. Aad G. *et al.* (ATLAS Collab.). Search for New Phenomena in the Dijet Mass Distribution Using *pp* Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Rev. 2015. V. D91, No. 5. P. 052007; arXiv:1407.1376.
631. Karpov S.N. (ATLAS Collab.). SUSY Physics with ATLAS // Intern. Workshop “Hadron Structure and QCD”, HSQCD 2010, 5–9 July 2010, Gatchina, Russia.
632. Khramov E. (ATLAS Collab.). SUSY Overview at ATLAS // PoS. 2013. V. QFTHEP2013. P. 026.
633. Karpov S., Khramov E., Bednyakov V. Search for SUSY with 1-Lepton + ≥ 6 -Jets + E_{tmiss} at 1 fb^{-1} . Talk at SUSY R&D Meeting, CERN, Aug. 11, 2011.
634. Karpov S., Khramov E., Bednyakov V. Search for SUSY. The First 2011 Data. Talk at JINR ATLAS Physics Weekly Meeting, Apr. 19, 2011.
635. Soloshenko A., Bednyakov V., Karpov S., Karpova Z., Khramov E. SUSY in 1-Lepton + Multijets + E_{tmiss} Channel (Towards Cuts Optimization). Talk at ATLAS JINR Physics Workshop, 15 Nov. 2011.
636. Aad G. *et al.* (ATLAS Collab.). Search for Supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in Final States with Large Jet Multiplicity, Missing Transverse Momentum and One Isolated Lepton with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2012-140, Contribution to SUSY-2012, Peking Univ., Beijing, China, 13–18 Aug., 2012.
637. Aad G. *et al.* (ATLAS Collab.). Further Search for Supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in Final States with Jets, Missing Transverse Momentum and Isolated Leptons with the ATLAS Detector // Phys. Rev. 2012. V. D86. P. 092002; arXiv:1208.4688.
638. Asai S., Karpov S., Karpova Z., Khramov E., Soloshenko A. *et al.* Search for Supersymmetry with Jets and Missing Transverse Momentum and One or More Leptons at $\sqrt{s} = 7$ TeV (Supporting INT note). Tech. Rep. ATL-PHYS-INT-2012-082. Geneva: CERN, 2012.
639. Asai S., Karpov S., Karpova Z., Khramov E., Soloshenko A. *et al.* Search for Supersymmetry at $\sqrt{s} = 7$ TeV in Final States with Large Jet Multiplicity, Missing Transverse Momentum and One Isolated Lepton with the ATLAS Detector (Supporting INT Note). Tech. Rep. ATL-PHYS-INT-2012-080. Geneva: CERN, 2012.
640. Aad G. *et al.* Search for Supersymmetry with Jets and Missing Transverse Momentum and One Lepton at 8 TeV (Supporting INT Note). Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2012-1033, ATL-PHYS-INT-2012-066. Geneva: CERN, 2012.
641. Aad G. *et al.* (ATLAS Collab.). Search for Squarks and Gluinos in Events with Isolated Leptons, Jets and Missing Transverse Momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2013-062. Geneva: CERN, 2013.

642. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Summary of the Searches for Squarks and Gluinos Using $\sqrt{s} = 8$ TeV pp Collisions with the ATLAS Experiment at the LHC // JHEP. 2015. V. 10. P. 054; arXiv:1507.05525.
643. Chitan A., Genest M.-H., Hohlfeld M., Kanaya N., Khramov E., Koutsman A., Kuwertz E., Lorenz J., Marshall Z., Urrejola P., Sasaki Y., Tudorache V. Search for Strongly Produced Supersymmetric Particles in Decays with Leptons at $\sqrt{s} = 8$ TeV (Supporting INT Note). Tech. Rep. ATL-PHYS-INT-2013-017. Geneva: CERN, 2013.
644. Romero Adam E. (ATLAS Collab.). Search for Strongly-Produced Supersymmetric Particles in Decays with Two Leptons at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Nucl. Part. Phys. Proc. 2016. V. 273–275. P. 2403–2405.
645. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Combination of Searches for Strongly-Produced Supersymmetric Particles with the ATLAS Detector in Proton–Proton Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV. ATLAS-CONF-2015-011. Geneva: CERN, 2015.
646. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Strong Production of Supersymmetric Particles in Final States with Missing Transverse Momentum and at Least Three b -Jets at $\sqrt{s} = 8$ TeV Proton–Proton Collisions with the ATLAS Detector // JHEP. 2014. V. 10. P. 024; arXiv:1407.0600.
647. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Squarks and Gluinos in Events with Isolated Leptons, Jets and Missing Transverse Momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2015. V. 04. P. 116; arXiv:1501.03555.
648. Baak M., Backes M., Chitan A., Genest M.-H., Omachi N., Koutsman A., Khramov E., Kuze M., Morvaj L., Nobe T., Sasaki Y., Tomoto M., Tudorache V., Xu D., Yamanaka T., Zhuang X. Search for Supersymmetry with Compressed Mass Spectra in Events Involving Soft Leptons, Jets plus Missing Transverse Momentum at $\sqrt{s} = 8$ TeV. Tech. Rep. ATL-PHYS-INT-2013-019. Geneva: CERN, 2013.
649. Morvaj L. (ATLAS Collab.). Search for Supersymmetry with a Compressed Mass Spectrum in Events Involving Soft Leptons, Jets and Missing Transverse Momentum with an Integrated Luminosity of 20.1 pb^{-1} of $\sqrt{s} = 8$ TeV ATLAS Data // PoS. 2013. V. EPS-HEP2013. P. 050.
650. Ahmadov F. et al. Searches for a Standard Model Higgs Boson Decaying to a b -Quark Pair with the ATLAS Detector at the LHC. ATL-COM-PHYS-2011-929. Geneva: CERN, 2011. Talk at Intern. School, Gomel, Belarus, 2011.
651. Abdinov O., Ahmadov F., Cheplakov A., Javadov N. Monte-Carlo Generation of $pp \rightarrow WH \rightarrow e, \nu, e, b, b$ Process for LHC Using CompHEP // Azerbaijan J. Phys. 2011. V. 17, No. 1. P. 92–95.
652. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for the Standard Model Higgs Boson Produced in Association with a Vector Boson and Decaying to a b -Quark Pair with the ATLAS Detector // Phys. Lett. 2012. V. B718. P. 369–390; arXiv:1207.0210.
653. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for the Standard Model Higgs Boson Produced in Association with a Vector Boson and Decaying to a b -Quark Pair Using up to 4.7 fb^{-1} of pp Collision Data at 7 TeV with the ATLAS Detector at the LHC. ATLAS-CONF-2012-015. Geneva: CERN, 2012.
654. Gray H. M., Scanlon T., Facini G. (ATLAS Collab.). Search for the Standard Model Higgs Boson Produced in Association with a Vector Boson and Decaying to Bottom Quarks with the ATLAS Detector // EPJ Web Conf. 2013. V. 49. P. 18027.
655. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for the bb -Decay of the Standard Model Higgs Boson in Associated W/ZH Production with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2013-079. Geneva: CERN, 2013.

656. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for the $b\bar{b}$ Decay of the Standard Model Higgs Boson in Associated (W/Z) H Production with the ATLAS Detector // JHEP. 2015. V. 01. P. 069; arXiv:1409.6212.
657. Karpova Z., Karpov S. (ATLAS Collab.). Search for Quantum Black Holes in Lepton + Jet Final State Using pp -Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2015-1445. Geneva: CERN, 2015. Contribution to "LHC Physics 2015". St. Petersburg, Russia. Aug. 31 – Sep. 5, 2015.
658. Gladilin L. K. Measurement of D -Mesons Production at LHC with ATLAS. ATL-PHYS-PROC-2010-118. Geneva: CERN, 2010.
659. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of $D^{*\pm}$ Meson Production in Jets from pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // Phys. Rev. 2012. V. D85. P. 052005; arXiv:1112.4432.
660. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of D^* Meson Production Cross Sections in pp -Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2011-017. Geneva: CERN, 2011.
661. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Comparison of D^* Meson Production Cross Sections with FONLL and GM-VFNS Predictions. ATL-PHYS-PUB-2011-012. Geneva: CERN, 2011.
662. Gladilin L., Watson M. Measurement of D^* Meson Production Cross Sections in pp -Collision at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector: Supporting Note. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2014-275. Geneva: CERN, 2014.
663. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of $D^{*\pm}$, D^\pm and D_s^\pm Meson Production Cross Sections in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // Nucl. Phys. 2016. V. B907. P. 717–763; arXiv:1512.02913.
664. Gladilin L. et al. (ATLAS Collab.). Study of the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ Decays with the ATLAS Detector. ATLAS-CONF-2015-014. Geneva: CERN, 2015.
665. Gladilin L. Decay Properties of b -Hadrons with the ATLAS Experiment. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2014-1331. Geneva: CERN, 2014; Proc. for ICHEP 2014, 37th Intern. Conf. on High Energy Physics, Valencia, Spain, 2–9 July, 2014.
666. Gladilin L., Turchikhin S. Measurement of the Branching Fractions for the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ Decays with the ATLAS Detector: Supporting Note. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2014-265. Geneva: CERN, 2014.
667. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Study of the $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^+$ and $B_c^+ \rightarrow J/\psi D_s^{*+}$ Decays with the ATLAS Detector // Eur. Phys. J. 2016. V. C76, No. 1. P. 4; arXiv:1507.07099.
668. Gladilin L. Measurements of Heavy Flavour Production at ATLAS and CMS // Proc. 50th Rencontres de Moriond, QCD and High Energy Interactions, La Thuile, Italy, March 21–28, 2015. 2016. P. 51.
669. Gladilin L., Lyubushkin V. Observation of the Decay $\Lambda_b \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ with the ATLAS Detector: Supporting Note. ATL-COM-PHYS-2014-180. Geneva: CERN, 2014.
670. Gladilin L., Lyubushkin V. Observation of the Decay $\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0$ with the ATLAS Detector. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2014-1515. Geneva: CERN, 2014.
671. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of the Branching Ratio $\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow \psi(2S)\Lambda^0)/\Gamma(\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi\Lambda^0)$ with the ATLAS Detector // Phys. Lett. 2015. V. B751. P. 63–80; arXiv:1507.08202.
672. Gladilin L., Lyubushkin V., Yeletsikh I. Identification of $J/\psi p$ Resonances in Decays of $\Lambda_b \rightarrow J/\psi p K$ in Proton–Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV with

- the ATLAS Detector: Supporting Note. Tech. Rep. ATL-COM-PHYS-2016-239. Geneva: CERN, 2016.
673. *Aaij R. et al. (LHCb Collab.)*. Observation of $J/\psi p$ Resonances Consistent with Pentaquark States in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ Decays // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 072001; arXiv:1507.03414.
674. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Production Cross Section for W -Bosons in Association with Jets in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Lett.* 2011. V. B698. P. 325–345; arXiv:1012.5382.
675. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Production Cross Section for Z/γ^* in Association with Jets in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Rev.* 2012. V. D85. P. 032009; arXiv:1111.2690.
676. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Study of Jets Produced in Association with a W Boson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Rev.* 2012. V. D85. P. 092002; arXiv:1201.1276.
677. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Production Cross Section of Jets in Association with a Z Boson in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *JHEP.* 2013. V. 07. P. 032; arXiv:1304.7098.
678. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurements of the W Production Cross Sections in Association with Jets with the ATLAS Detector // *Eur. Phys. J.* 2015. V. C75, No. 2. P. 82; arXiv:1409.8639.
679. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Production of a W Boson in Association with a Charm Quark in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *JHEP.* 2014. V. 05. P. 068; arXiv:1402.6263.
680. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Cross Section for the Production of a W Boson in Association with b^- Jets in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Lett.* 2012. V. B707. P. 418–437; arXiv:1109.1470.
681. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Cross-Section for b -Jets Produced in Association with a Z Boson at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *Phys. Lett.* 2012. V. B706. P. 295–313; arXiv:1109.1403.
682. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of the Cross-Section for W Boson Production in Association with b -Jets in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // *JHEP.* 2013. V. 06. P. 084; arXiv:1302.2929.
683. *Beauchemin P.H. (ATLAS Collab.)*. ATLAS Measurements of Jets and Heavy Flavor Produced in Association with W and Z Bosons // *PoS.* 2013. V. ICHEP2012. P. 263.
684. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. Measurement of Differential Production Cross-Sections for a Z Boson in Association with b -Jets in 7 TeV Proton–Proton Collisions with the ATLAS Detector // *JHEP.* 2014. V. 10. P. 141; arXiv:1407.3643.
685. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. A Measurement of the Ratio of the W and Z Cross Sections with Exactly One Associated Jet in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with ATLAS // *Phys. Lett.* 2012. V. B708. P. 221–240; arXiv:1108.4908.
686. *Aad G. et al. (ATLAS Collab.)*. A Measurement of the Ratio of the Production Cross Sections for W and Z Bosons in Association with Jets with the ATLAS Detector // *Eur. Phys. J.* 2014. V. C74, No. 12. P. 3168; arXiv:1408.6510.
687. Seven-Year Plan for the Development of JINR 2010–2016. Dubna: JINR, 2009. 37 p.

688. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Doubly-Charged Higgs Bosons in Like-Sign Dilepton Final States at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS Detector // Eur. Phys. J. 2012. V. C72. P. 2244; arXiv:1210.5070.
689. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Charged Higgs Bosons Decaying via $H^{\pm} \rightarrow \tau^{\pm} \nu$ in Fully Hadronic Final States Using pp Collision Data at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS Detector // JHEP. 2015. V. 03. P. 088; arXiv:1412.6663.
690. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Search for Charged Higgs Bosons in the $H^{\pm} \rightarrow tb$ Decay Channel in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV Using the ATLAS Detector. arXiv:1512.03704.
691. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). K_{short} and Λ Production in pp Interactions at $\sqrt{s} = 0.9$ and 7 TeV Measured with the ATLAS Detector at the LHC // Phys. Rev. 2012. V. D85. P. 012001; arXiv:1111.1297.
692. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of the Λ_b^0 Lifetime and Mass in the ATLAS Experiment // Phys. Rev. 2013. V. D87, No. 3. P. 032002; arXiv:1207.2284.
693. Aad G. et al. (ATLAS Collab.). Measurement of the Transverse Polarization of Λ and $\bar{\Lambda}$ Hyperons Produced in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV Using the ATLAS Detector // Phys. Rev. 2015. V. D91, No. 3. P. 032004; arXiv:1412.1692.
694. Dydak F. ASCOT, JINR, and the Early Days of ATLAS. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
695. Charlton D. ATLAS in Run-2 of the LHC: Status and Perspectives. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
696. Henriques A. The Requirements of the Hadronic Calorimetry for the FCC-hh Collider and the Potential of an ATLAS-Tile Concept Readout by si-PMTs. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
697. Topilin N. ATLAS Tilecal Mechanics: Rememberings of Eye-Witnesses. Talk at Conf. on 25th Anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
698. Kazakov D. What Have We Learned over 25 Years of ATLAS. Talk at Conf. on 25th anniversary of JINR in ATLAS, 24–29 Apr. 2017, Becici, Montenegro.
699. Topilin N.D. ATLAS Hadron Tile Calorimeter Assembly. Dubna: JINR, 2009.
700. Bednyakov V., Budagov Yu., Khubua J., Russakovich N., Topilin N. JINR Contribution to the Design and Construction of the ATLAS Hadron Tile Calorimeter. Dubna: JINR, 2011.

Научное издание

Бедняков Вадим Александрович
Будагов Юлиан Арамович
Кухтин Виктор Васильевич
Русакович Николай Артемьевич
Чеплаков Александр Павлович
Шелков Георгий Александрович
Храмов Евгений Владимирович

**Объединенный институт ядерных исследований
в эксперименте ATLAS. 1992–2015 гг.**

2017-45

Редактор *Е. В. Калининкова*
Компьютерная верстка *И. Г. Андреевой*

Подписано в печать 23.04.2018.

Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 22,58. Уч.-изд. л. 23,58. Тираж 185 экз. Заказ № 59395

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/