

ФАНО России

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

Проспект ак. Лаврентьева, д. 11, г. Новосибирск, 630090
телефон: (383) 329-47-60, факс: (383) 330-71-63
<http://www.inp.nsk.su>, e-mail: inp@inp.nsk.su
ОКПО 03533872 ОГРН 1025403658136
ИНН/КПП 5408105577 / 540801001

от _____ № 15311 – _____

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института ядерной физики им. Г.И. Будкера

Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИЯФ СО РАН)

академик П.В. Логачев
7 ноября 2017 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Климентова Алексея Анатольевича <<Методы обработки сверхбольших объемов данных в распределенной гетерогенной компьютерной среде для приложений в ядерной физике и физике высоких энергий>>, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.11 — математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

Диссертационная работа А.А. Климентова посвящена исключительно актуальной проблеме - обработке сверхбольших объемов данных в ядерной физике и физике высоких энергий. Развитие физики высоких энергий и ядерной физики потребовало разработки новых компьютерных средств и программного обеспечения для обработки, моделирования и анализа данных. Эти требования естественным образом вытекают из необходимости справляться с огромными объемами информации, возникающими в экспериментах на современных ускорителях, т. е. записывать и считывать данные, многократно их обрабатывать с использованием сложных алгоритмов, а также необходимостью моделирования условий работы современных установок и физических процессов. Эти задачи приобрели особенную важность в последнее десятилетие после введения в строй Большого адронного коллайдера (БАК или LHC), конструирования, создания и запуска сложнейших детекторов для экспериментов на этом коллайдере, таких как ATLAS, CMS, ALICE, работы над новыми мегапроектами (FAIR, BelleII, NICA), что потребовало принципиально новых подходов в области информационных

технологий. Это обусловлено чрезвычайной сложностью современных детекторов и количеством каналов считывания на них, высокой скоростью набора данных, участием в экспериментах больших международных коллективов, которые должны иметь доступ к информации и возможность обрабатывать ее в короткие сроки. Эти факторы и предопределяют высокую актуальность рассматриваемой диссертации.

Целью диссертации является разработка развитие методов, архитектур, компьютерных моделей и программных систем, реализация соответствующих программных и инструментальных средств, для приложений физики высоких энергий и ядерной физики при обработке сверхбольших объемов данных.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во **введении** обсуждается актуальность обработки сверхбольших объемов данных для приложений в ядерной физике и физике высоких энергий с привлечением больших вычислительных мощностей в распределенной гетерогенной компьютерной среде. В нем формулируются предмет и цели исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также описана структура работы.

Глава 1 посвящена развитию компьютерной модели экспериментов в области физики элементарных частиц, физики высоких энергий и ядерной физики, а также для проектов AMS-01 и AMS-02 на Международной космической станции. **В первой части главы** содержится краткий обзор вычислительных моделей за последние 20 лет для наиболее значимых этапов развития экспериментов в перечисленных областях, особое внимание уделяется роли компьютеринга для экспериментов в области физики частиц. Рассматривая как менялись требования к информационным технологиям, программному обеспечению и вычислительным мощностям по мере развития экспериментов в области физики частиц за последние десятилетия, автор обосновывает необходимость создания глобальной распределенной среды для обработки данных, детально описывает концепцию грид вычислений и основные компоненты грид инфраструктуры. Здесь же можно найти описание причин и факторов выбора иерархической компьютерной модели, предложенной проектом MONARC, для экспериментов на LHC. **Вторая часть данной главы** полностью посвящена реализации распределенной компьютерной модели MONARC на первом этапе работы коллайдера LHC, описана организация и функции грид-сайтов на момент запуска коллайдера. В главе детально проанализированы ограничения модели MONARC, в том числе связанные с иерархической структурой вычислительных центров и статическим характером связи узлов уровня T1 и T2. **В завершающей части первой главы** обоснован переход к новой "смешанной" компьютерной модели, предложенной автором диссертации, и определены ее базовые принципы в рамках грид инфраструктуры. Здесь же приводится описание предложенных автором методов определения значимости и

популярности классов данных и наборов данных (на основе их востребованности и научных приоритетов физического эксперимента), обосновывается создание термодинамической модели управления данными в распределенной компьютерной среде и реализации модели для сверхбольших объемов данных.

В главе 2 описаны требования к вычислительной инфраструктуре для обработки, моделирования и анализа данных при проведении физических экспериментов, а также рассматривается роль суперкомпьютерных центров для приложений физики высоких энергий и ядерной физики. **Первая часть главы 2** рассматривает требования, предъявляемые к вычислительному ресурсу для экспериментов на LHC на втором и последующих этапах работы коллайдера. Автор обосновывает необходимость интеграции суперкомпьютеров, ресурсов облачных вычислений, университетских кластеров и других архитектур в единую вычислительную среду (киберинфраструктуру) для обработки и анализа данных физических экспериментов. Далее в **главе** рассмотрены существующие проблемы и принципиальные подходы при создании федеративной киберинфраструктуры; подробно обоснована роль системы управления потоками заданий и системы распределенной обработки данных, как необходимого слоя при интеграции разнородных вычислительных архитектур. **Завершающий раздел главы 2** акцентирует внимание на роли и использовании суперкомпьютеров в научных программах физики высоких энергий и ядерной физики в целом и, в частности, для экспериментов на LHC. В **главе 2** можно также найти определения и изложение основных понятий, методов и программных сред, лежащих в основе разработок, которые детально описаны в последующих главах работы. В итоге автор показывает, как разработанная компьютерная модель для современного физического эксперимента позволяет использовать гетерогенные вычислительные мощности в рамках единой вычислительной инфраструктуры.

Глава 3 посвящена разработке концепции, методов и архитектуры системы управления заданиями в распределенной гетерогенной компьютерной среде. Основываясь на приведенном анализе классов научных приложений в области физики частиц, автор в **главе 3** сначала предлагает модель данных для системы распределенной обработки, ключевым элементом которой является поток заданий. Определив требования к системе управления загрузкой в гетерогенной среде, в дальнейших подразделах главы автор описывает разработанную логическую модель данных системы глобальной распределенной обработки и далее формулирует и раскрывает архитектуру системы обработки данных физического эксперимента, требования к функциональности, масштабируемости и отказоустойчивости такой системы. Кроме того, детально рассмотрены и определены основные функции и уровни системы, взаимодействие компонент системы между собой и их связь с внешним программным обеспечением, таким как система управления данными, промежуточное ПО и информационная система. Далее, на основе требований к архитектуре и приведенного анализа ее основного функционала, автор предлагает архитектуру системы обработки данных в распределенной среде (megaPanDA), способной оперировать данными эксабайтного диапазона. Следующие разделы главы содержат описание методики

и методов управления потоками задач и заданий. Подробно изложены методы управления потоками и организация распределенной обработки данных нового типа ("обработка поездом" и "постоянная обработка"), также приведен принципиально новый метод динамического использования вычислительного ресурса на основе оценки стабильности самого ресурса. В главе 3 особое внимание уделяется проблеме распределения вычислительного ресурса между различными классами потоков заданий современного физического эксперимента. Последний раздел главы содержит детали реализации системы управления потоками заданий и задач для эксперимента ATLAS на основе разработанных принципов и методов. Завершается глава обоснованием возможности дальнейшего развития описываемой компьютерной модели и перехода к гетерогенной вычислительной среде.

В главе 4 автор рассматривает дальнейшее развитие компьютерной модели, вопросы интеграции суперкомпьютеров и ресурсов облачных вычислений с распределенными вычислительными элементами грид инфраструктуры. Обосновывая новые принципы и подходы к использованию вычислительного ресурса, а также рассматривая требования, предъявляемые к распределенным системам обработки данных для этапа работы superLHC и новых ускорительных комплексов (FAIR, NICA). В данной главе обоснована возможность использования предложенной компьютерной модели и созданной системы глобальной распределенной обработки данных за пределами экспериментов на LHC, в частности для коллайдера NICA и установки XFEL. **В следующих подразделах главы 4** рассмотрено применение созданной системы глобальной обработки данных (megaPanDA) в приложениях биоинформатики, а также использование СК НИЦ КИ для приложений экспериментов ATLAS и ALICE. **Заключительный раздел главы 4** описывает методику создания федеративного дискового пространства в рамках гетерогенной киберинфраструктуры, рассматривая архитектурные принципы и методы, а также приведен анализ существующих технологий. Автором подробно рассмотрена модель и прототип федеративного дискового пространства в рамках российского грид сегмента сети WLCG (RDIG), приведены примеры по проверке работоспособности такой федерации и характеристики выполнения реальных научных приложений в затронутых в работе областях физики.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты, полученные в работе.

Научная новизна диссертации заключается в разработке и создании компьютерной модели современного физического эксперимента для управления, обработки и анализа данных эксабайтного диапазона в гетерогенной вычислительной среде. Реализация разработанной диссертантом модели и ее приложения в области физики элементарных частиц впервые позволила использовать различные архитектуры: грид, суперкомпьютеры, ресурсы облачных вычислений для обработки данных физического эксперимента через единую

систему управления потоками заданий, сделав это “прозрачно” для пользователя. Разработка и реализация новых методов, архитектуры и программного инфраструктура системы для глобальной распределенной обработки данных позволило создать на этой основе уникальную систему управления потоками заданий, высокой производительности и масштабируемости (более двух миллионов задач, выполняемых ежедневно в 250 вычислительных центрах по всему миру). Была успешно решена проблема разделения вычислительных ресурсов между различными потоками научных заданий (обработка данных, Монте-Карло моделирование, физический анализ данных, приложения для триггера).

Научная и практическая значимость диссертации связана прежде всего с высоким уровнем разработок и их успешной реализацией. Основные результаты диссертации эффективно используются в различных действующих научных экспериментах, в частности, на детекторах ATLAS и ALICE на LHC в ЦЕРН. Еще одно интересное приложение — задачи биоинформатики на суперкомпьютерах НИЦ КИ. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании компьютерной модели для этапа высокой светимости LHC, планируемого в ЦЕРНе, а также для новых экспериментальных комплексов, таких как Супер КЕКВ и BelleII в лаборатории КЕК, Япония, FAIR в лаборатории GSI в Германии, NICA в ОИЯИ, Дубна, проекта Супер-с-тау фабрики в ИЯФ СО РАН, Новосибирск и многих других.

У работы есть еще одно перспективное применение — созданная система для глобальной распределенной обработки данных, которую можно использовать для планирования потоков заданий на современных суперкомпьютерах, повышая тем самым эффективность их использования, а также управление распределенными дисковыми ресурсами, что важно для дальнейшего развития и оптимизации работы российского сегмента грид. По материалам диссертации подготовлены новые программы для студентов и магистрантов, читаются лекционные курсы в НИЯУ МИФИ, ТПУ, МФТИ.

Достоверность полученных в работе результатов не вызывает сомнений. Разработанные методы и программное обеспечение доказали свою правильность и эффективность в течение многих лет успешной эксплуатации в экспериментах по физике элементарных частиц.

Диссертационная работа не свободна от недостатков, но они не носят принципиального характера. В работе столь большого объема трудно избежать опечаток, пропущенных или лишних запятых, но их немного. Встречаются нестандартные сокращения, например, «д.б.» вместо «должно быть». Указанные недостатки несколько не умаляют высокого качества проведенных исследований.

Диссертация оставляет очень сильное впечатление обилием материала, а также исключительно высоким уровнем разработок, их практической реализацией и завершенностью. Работа написана четким и ясным языком, а также хорошо

проиллюстрирована. Чтение и понимание текста заметно облегчается наличием перечня принятых сокращений и наименований на 16 страницах. Каждая глава завершается краткими выводами.

Основные работы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в российских и международных журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных изданий, неоднократно докладывались на семинарах и рабочих совещаниях таких экспериментов, как L3, AMS, COMPASS, ATLAS, ALICE, а также на российских и международных конференциях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация А.А. Климентова является законченным научным исследованием, в котором получены новые фундаментальные результаты, и безусловно отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (п.9-14), утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации N842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а сам автор, Климентов Алексей Анатольевич, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.11 — математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

Отзыв составил:

Главный научный сотрудник ИЯФ СО РАН,
доктор физ.-мат.наук



С.И. Эйдельман

7 ноября 2017 г.

Тел. +73833294376

E-mail: eidelman@inp.nsk.su

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева 11

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании
Ученого совета ИЯФ СО РАН

Ученый секретарь ИЯФ СО РАН
кандидат физ.-мат. наук



Я.В. Ракшун

Контакты ведущей организации:

Федеральное государственное учреждение науки

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева 11

Тел. +73833294760, E-mail: inp@inp.nsk.su