

13-2001-73

На правах рукописи  
УДК 53.072.086.48

К-636

**КОМОГОРОВ**  
Максим Эдуардович

**КОМПОНЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД  
К РАЗРАБОТКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ  
В РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ**

Специальности: 01.04.01 — приборы и методы  
в экспериментальной физике;  
05.13.18 — математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

**Научный руководитель:**

Доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Амелин Николай  
Сергеевич

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук,  
профессор

Глаголев Виктор  
Викторович

Доктор физико-математических наук,  
профессор

Лидия Николаевна  
Смирнова

**Ведущее научно-исследовательское учреждение:**

Московский государственный инженерно-физический институт  
(Технический университет)

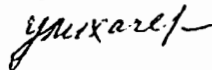
Защита диссертации состоится “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2001 г.  
в \_\_\_\_\_ час. на заседании диссертационного совета Д-720.001.02  
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института  
ядерных исследований, Дубна, Московская область, конференц-зал  
ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

М.Ф. Лихачев



**Общая характеристика работы**

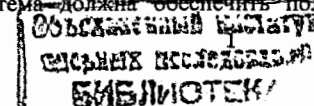
**Актуальность проблемы**

Подготовка современных экспериментов в области релятивистской ядерной физики, создание детекторов для этих экспериментов, которые дороги и сложны, а также проведение экспериментов требуют тщательного численного моделирования. Известно, что доминирующими процессами в адронных и ядерных взаимодействиях являются процессы с относительно малыми передачами импульсов. Это так называемые мягкие процессы взаимодействия. Очень важной является задача разработки и применения моделей для предсказания, описания и анализа мягких процессов. Здесь так называемые Монте-Карло адронные модели или Монте-Карло (МК) генераторы событий взаимодействия частиц и ядер являются очень популярными. Это феноменологические модели с большим числом параметров, значения которых определяются путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. МК адронные модели могут применяться как генераторы событий взаимодействий с целью изучения явлений при столкновениях или как источники информации об адронных столкновениях с целью использования этой информации.

МК адронные модели это сложные физические модели. Типичный МК генератор событий использует сложные численные алгоритмы для описания многочисленных физических процессов. Значительные усилия требуются, чтобы сформулировать, запрограммировать и тестировать такие модели. Применение МК генераторов для обработки полученных экспериментальных данных или при проектировании нового эксперимента также требует значительных усилий от пользователя. Большинство существующих модельных кодов в силу сложности их применения используются только их авторами. Для разработки МК кодов может быть применен объектно-ориентированный подход, основанный на применении C++. Такой подход имеет много преимуществ по сравнению с традиционным процедурным программированием. Наиболее важным из них является наличие различных средства языка C++, дающих возможность определения новых типов данных и операций для этих типов. Такие типы данных (например, тип частица, тип 4-х вектор), которые являются более «естественными», могут быть определены для конкретной предметной области, такой как разработка МК генераторов, и разработчик МК генератора может также легко обращаться с новыми типами, как и с встроенными в C++ типами данных.

В данной работе необходимость создания компонентно-ориентированного фреймворка (framework), в рамках которого можно создавать и использовать численные модели, обосновывается тем, что адронные МК модели, а также их применения и разработки имеют много общего. Создание такого программного обеспечения ещё более оправдано в том случае, когда число разрабатываемых моделей велико и это число может возрасти в будущем.

Для удовлетворения требований пользователей такое программное обеспечение должно представлять собой единую систему, в рамках которой, пользователь мог бы создавать новые модели или компоненты, расширять и модифицировать уже существующие компоненты, производить структурную и аналитическую обработку данных, полученных в результате генерации или с аппаратуры. Система должна обеспечить пользователю удобный доступ к



настроечным параметрам моделей (компонент) для управления процессами генерации или анализа данных. В рамках такой системы необходимо иметь подсистему визуализации данных, согласованную с другими элементами системы.

Разработанная компонентно-ориентированная система полезна для двух профессиональных категорий людей: это пользователи численных моделей и разработчики численных моделей (продвинутые пользователи).

Основная идея системы в дальнейшем называемой NiMax, состоит в том, что она должна поддерживать компонентный подход при разработке и использовании численных моделей. Отдельная компонента может представлять собой программную реализацию какой-либо модели, например упругого рассеяния адронов, или модели сложного физического явления, каким является столкновение ультра-релятивистских тяжелых ионов. Предполагается, что данная система может быть той основой, с помощью которой можно разработать библиотеку моделирующих компонент, имеющих различные численные алгоритмы, что может позволить в дальнейшем использовать эту библиотеку как хранилище «строительных блоков» для сборки сложных и реалистических физических моделей.

### Цель работы

Основной целью работы является проектирование и разработка компонентно-ориентированного программного обеспечения для создания и использования численных моделей в релятивистской ядерной физике, а также его применение для МК генераторов событий взаимодействий частиц и ядер.

### Научная новизна

Предложенный в работе подход является новым. Некоторые концепции, реализованные в системе, не имеют аналогов в существующем программном обеспечении для создания моделирующих компонент.

1. Это механизм агрегирования компонент другими компонентами. Данный механизм позволяет C++ программисту создавать сложные компоненты, используя коды готовых компонент, без каких-либо ограничений по сравнению со стандартным C++ программированием. Для внешнего мира агрегирующая компонента выглядит так же, как простая компонента. Вместе с тем, пользователь этой компоненты имеет доступ к любой её подкомпоненте и может изменить алгоритм компоненты путем подмены подкомпонент.

2. Это механизм отбора данных в соответствии с заданной конфигурацией данных. Этот механизм позволяет организовать совместную работу нескольких компонент путем передачи данных, имеющих достаточно сложную структуру, и дает возможность структурного и аналитического отбора данных записанных в файл данных.

### Научно-практическая значимость

Созданная система может быть использована для широкого круга задач. Это, прежде всего, задачи связанные с разработкой и применением сложных численных моделей. Помимо этого, система может быть использована для

структурной, аналитической и графической обработки данных, полученных из различных источников.

### Апробация работы и публикации

Материалы, изложенные в диссертации, неоднократно докладывались и обсуждались на семинарах и совещаниях: семинары ЛВЭ, ЛИТ и ЛФЧ ОИЯИ г.Дубна (Россия), семинары физического факультета университета г.Ювяскула (Финляндия), семинар физического факультета университета г.Хельсинки (Финляндия), на совещании коллаборации ALICE, CERN г.Женева (Швейцария). Материалы диссертации были представлены на нескольких международных конференциях: Вычислительная техника в Физике Высоких Энергий (Computing in High Energy and Nuclear Physics CHEP2000) г. Падова (Италия), XV Международный Семинар по Проблемам Физики Высоких Энергий (The XV Int. Seminar on High Energy Physics Problems) г. Дубна. XV Международная Конференция по Ультра-Релятивистским Ядро-Ядерным Столкновениям (The XV International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions QM 2001), Нью-Йорк (США), Second International Workshop: Very High Multiplicity Physics, г.Дубна (Россия), Северо-Западная Европейская Конференция по Ядерной Физике (The North-West Europe Nuclear Physics Conference, NEW'01), г.Берген, Норвегия. По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ.

### Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объём диссертации 87 страниц. Работа содержит 41 рисунок. Библиография содержит 60 наименований.

### **На защиту выносятся следующие результаты**

- В работе предложен новый подход к разработке и использованию численных моделей в релятивистской ядерной физике. Это компонентный подход, при котором сложная численная модель собирается из более простых независимых моделирующих компонент.
- С целью реализации данного подхода автором сформулировано понятие стандартной компоненты. Любая компонента рассматривается как набор стандартизированных интерфейсов между её численным алгоритмом и внешним миром.
- Автором определена единица обмена данными – событие данных. Компонента может генерировать такие события и записывать их в файл данных для дальнейшего анализа и визуализации. Компонента может зачитывать такие события из файла данных или получать их от других компонент.
- Автором разработан формат файла данных, который позволяет хранить огромные объемы данных и осуществлять эффективную работу с данными. Необходимо отметить, что файл данных, отображения файла данных, а

также связанные с ними методы контроля и навигации могут рассматриваться как независимая система работы с данными, имеющая различные применения.

- Для реализации компонентного подхода автором создано компонентно-ориентированное программное обеспечение, объединенное в систему NiMax. На сегодняшний день не существует аналогичных систем, поддерживающих разработку и использование численных моделей в физике высоких энергий.
- Автором предложен механизм агрегирования одними компонентами других, который позволяет программисту создавать сложные составные компоненты, используя в качестве "строительных блоков" уже существующие компоненты. А пользователи получают возможность замещения компонент на альтернативные без нового проектирования и перепрограммирования моделей.
- Автором предложены механизм взаимодействия нескольких компонент между собой и методика отбора данных в соответствии с заданной конфигурацией, что позволяет организовать совместную работу нескольких компонент путем передачи данных, имеющих достаточно сложную структуру, и дает возможность структурного и аналитического отбора данных. Такой механизм не имеет аналогов в существующем программном обеспечении.
- Созданная система NiMax применена к конкретному классу задач, а именно к разработке и использованию МК генераторов событий взаимодействия частиц и ядер в области релятивистской ядерной физики. В рамках данного подхода создан большой набор компонент, которые дают возможность проводить численное моделирование взаимодействий частиц и ядер в большом диапазоне энергий и для большого набора снарядов и мишеней.

## Содержание работы

В первой главе описываются общие черты численных моделей, используемых в релятивистской ядерной физике, наличием которых обосновывается предложенный компонентный подход к созданию объектно-ориентированного фреймворка. Формулируются требования к разрабатываемому программному обеспечению со стороны разных групп пользователей численных моделей и разработчиков численных моделей, результатом анализа которых было решение создать систему для разработки численных моделей, учитывающую общность моделей, облегчающую работу пользователей и увеличивающую производительность разработчиков моделей. В этой главе также коротко представляются и обсуждаются основные идеи, лежащие в основе предлагаемого подхода к разработке и использованию численных моделей, обращается внимание на концепцию компоненты, которая рассматривается как блок для конструирования составных численных моделей, представлены механизмы (наследование, агрегация, прикладной модуль), позволяющие разработчикам использовать код уже готовых компонент.

Во второй главе дано детальное описание основных концепций компонентного подхода и его функциональности. На рисунке 1 показаны основные составляющие системы NiMax и их взаимодействие.

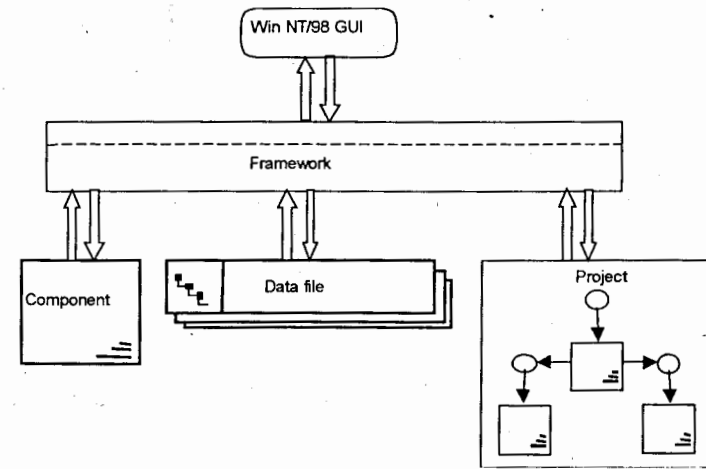


Рис. 1. Архитектура системы NiMax

В начале главы приведено краткое описание архитектуры системы, а затем дано более детальное описание её составляющих. Обсуждается концепция компоненты, рассматриваются свойства компонент, описываются компонентные интерфейсы и их визуальные представления. Представлены различные способы разработки компонент. Рассматривается вопрос упаковки компонент и сопутствующего им программного обеспечения в модули,

связанные с конкретными областями применения компонент. Здесь же вводятся понятия фабрики классов компоненты, идентификатора компоненты, агрегирующей компоненты. Далее подробно рассматриваются механизмы и средства разработки компонент, а также обсуждается документирование компонент. Затем объясняется модель данных, разработанная для системы NiMax, рассматриваются основные механизмы обмена, хранения и обработки данных, поддерживаемые системой NiMax. Здесь также вводятся основные понятия, используемые при описании модели данных, и, прежде всего, сформулировано понятие события данных, которое является ключевым элементом модели данных, подробно обсуждается вопрос управления данными.

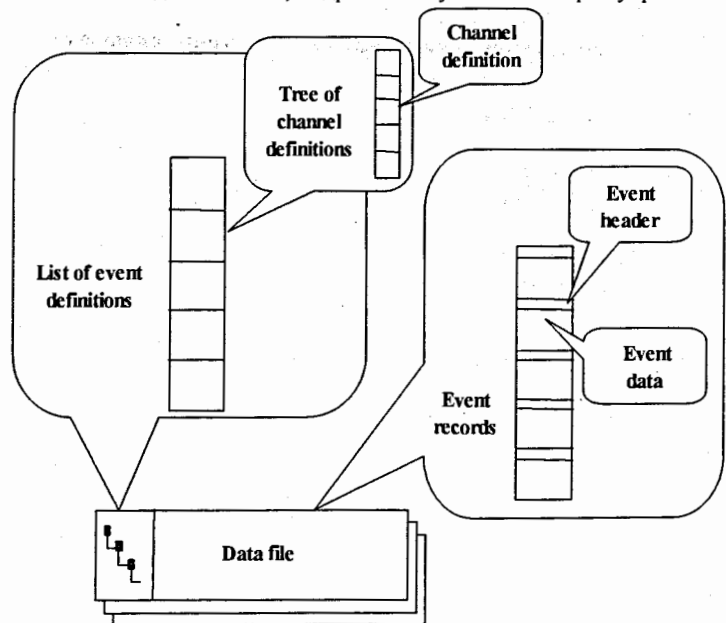


Рис. 2.. Структура файла данных

Затем описывается файл данных и его визуальные представления. Рассматривается библиотека классов для транспортировки данных и вводятся понятия предопределенных событий данных и предопределенных каналов данных. Далее дается детальное описание возможной совместной работы компонент и объясняется механизм отбора данных на основе их конфигураций. Вводится понятие *коллаборации компонент*, касающееся способа взаимодействия компонент посредством интерфейсов. Здесь формулируется концепция событийно-ориентированных проектов и описывается их визуальное представление. В этой же главе коротко представлена идея построения модельных или моделирующих проектов, обсуждаются детали сборки проектов пользователями, а также отличия сборки проектов от разработки сложных компонент методом агрегации. В конце второй части приводится краткое описание функциональных возможностей системы, основанных на применении методов контроля и навигации, которые имеются в системе и краткое описание интерфейса пользователя.

В третьей главе дано детальное описание возможностей пользователя при работе с моделями через графический пользовательский интерфейс. В частности, объясняется, как выбрать нужную компоненту из списка предлагаемых компонент, используя три вида просмотра.

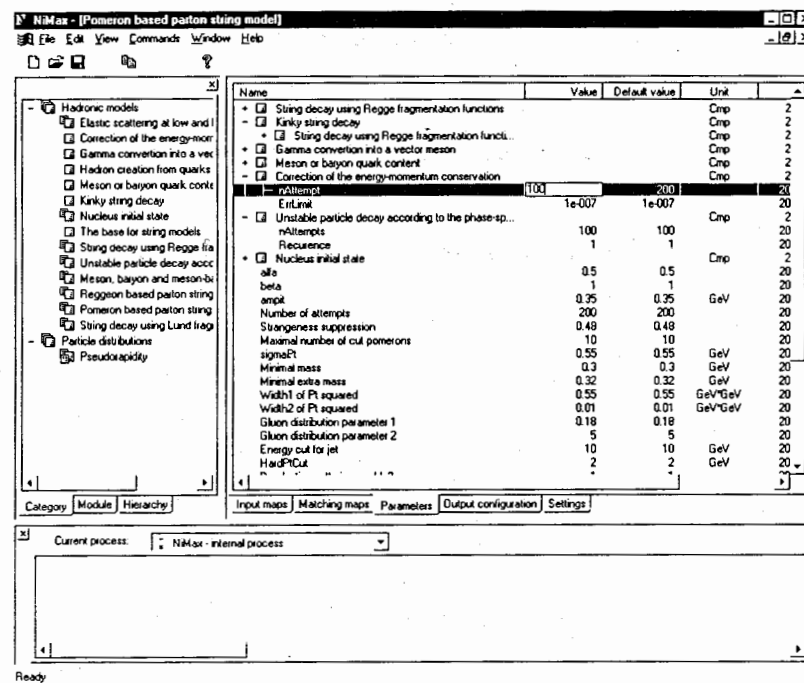


Рис. 3. Пример редактирования параметров компоненты

Здесь описываются возможности изменять состояние компоненты, т.е. редактировать карты входных данных, параметры компонент, заменять подкомпоненты. Описывается возможность переконфигурирования вывода данных. В этой части рассказывается, как создать моделирующий проект из отдельных компонент и как редактировать уже созданный проект, представлены методы модификации и обновления численного алгоритма составных компонент без перепрограммирования посредством графического интерфейса пользователя. Здесь также обсуждаются возможности контролирования выполнения проекта. Детально рассматриваются вопросы работы с файлом данных, например, проблемы отбора входных данных, управления процессом выдачи выходных данных, осуществления структурного отбора данных, т.е. возможности просматривать и выделять целые конфигурации записанных в файл событий данных (или их отдельных частей), а также сами данные с целью оперировать только с выделенными данными. Рис. 4.

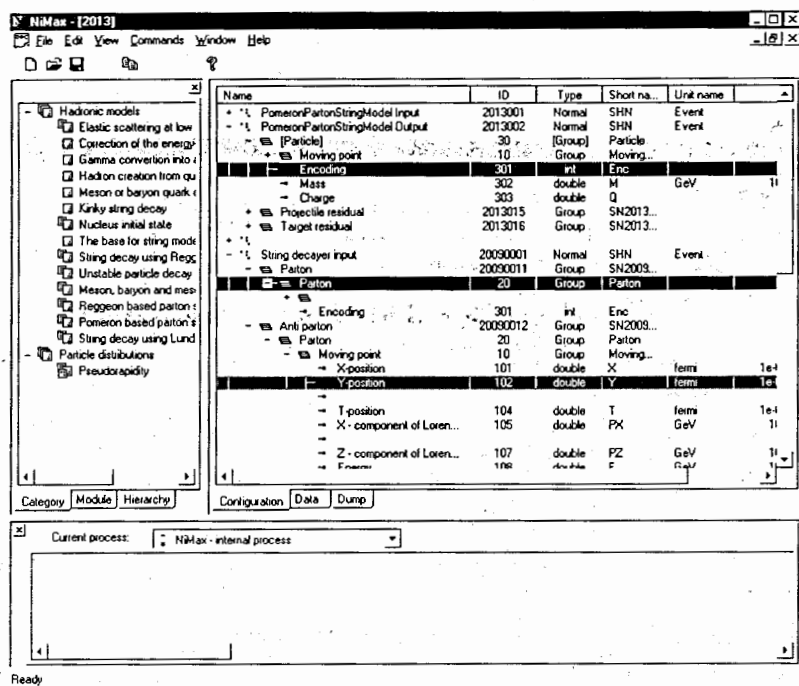


Рис. 4. Выделение конфигураций событий данных

Затем объясняются возможности построения одномерных и двумерных гистограмм, а также двумерных плотов, возможности проводить различные операции над выбранными данными с помощью различных отображений, используя, например, мышь или кисть. Возможности работы с гистограммами в системе NiMax сравниваются со средствами известного пакета построения гистограмм HBOOK. В конце этой части рассказывается, каким образом пользователь системы может получить необходимую информацию о системе и её компонентах, а также помощь при работе с системой.

В документации системы NiMax описана область применения системы, описаны основные её концепции, объясняется работа с компонентами и данными посредством графического интерфейса пользователя, описываются ошибки, которые могут возникать в ходе выполнения компонент и т.д. В документации для отдельных компонент содержится информация о параметрах компонент, их картах входных данных, описаны конфигурации событий данных, которые могут генерироваться компонентами и т.д. Навигации по документации и поиск необходимой информации может быть осуществлен по содержанию и по ключевым словам.

В четвертой главе приводится описание моделирующих и специальных компонент, в настоящий момент включенных в пакет, а также таблиц данных,

используемых этими компонентами. Ниже приводится перечень этих компонент, которые можно разделить на две группы: моделирующие и специальные компоненты.

#### Моделирующие компоненты.

- Кварковый состав частиц – моделирует кварковый состав барионов и мезонов для последующего моделирования возбужденных струн, или расщепления барионов (антибарионов) на валентные кварки (антикварки) или дикварки (антидикварки).
- Конверсия фотона – используется для моделирования взаимодействия реального или виртуального фотона с нуклоном или ядром. Выполняет преобразование фотона в векторный мезон или кварковую систему мезонного типа.
- Распад резонансов – моделирует распад резонансов, используя для определения 4-импульсов частиц продуктов распада алгоритм Копылова, который позволяет учесть не только разрешенные фазовые объемы для продуктов распада, но и матричные элементы распадов.
- Распад продольной струны 1 – моделирует распад возбужденных продольных струн на стабильные частицы и резонансы, используя функцию фрагментации кварков в адроны, которая была предложена в Лундской модели.
- Распад продольной струны 2 – данная компонента использует иную функцию фрагментации кварков в адроны, которая была получена в рамках теории Редже. Она может замещать предыдущую используя механизм замещения.
- Распад кинковой струны – моделирует распад возбужденных кинковых струн на стабильные частицы и резонансы.
- Модель адрон-адронных столкновений – данная компонента используется для определения сечений взаимодействий алгоритм, предложенный в теории Редже-Грибова.
- Модель адрон-нуклонных, адрон-ядерных и ядро-ядерных столкновений – померон-партоновая струнная модель. Эта модель может быть использована для расчетов неупругих столкновений различных адронов и различных ядер с ядерными мишенями.
- Барионно-антибарионная аннигиляция – компонента позволяет моделировать специальный тип неупругих взаимодействий адронов, когда антикварк (антидикварк) из одного сталкивающегося адрона аннигилирует с подходящим по аромату кварком (дикварком) из другого сталкивающегося адрона.

- Упругое столкновение для низких и высоких энергий – моделирует упругое столкновение частиц. Данная компонента может использоваться в качестве базовой для построения моделей упругого столкновения, как адронов, так и партонов.

*Специальные компоненты.*

- Коррекция энергии и импульса системы частиц - выполняет коррекцию значений энергии и импульса для каждой рожденной в столкновении частицы, чтобы обеспечить сохранение полной энергии и полного импульса в реакции.
- Псевдобыстрота – вычисляет псевдобыстроту.
- Быстрота – строит взвешенные распределения по быстроте.
- Поперечный импульс – строит взвешенные распределения по поперечному импульсу.

Три последних компоненты используют карты отбора данных 3-импульса и 4-импульса. Они также могут использоваться как составные компоненты анализирующего проекта.

Следует подчеркнуть, что компоненты моделирующие столкновения ядер являются составными компонентами используемыми почти все выше перечисленные моделирующие компоненты. На рисунке 6 приводятся результат работы такой модели.

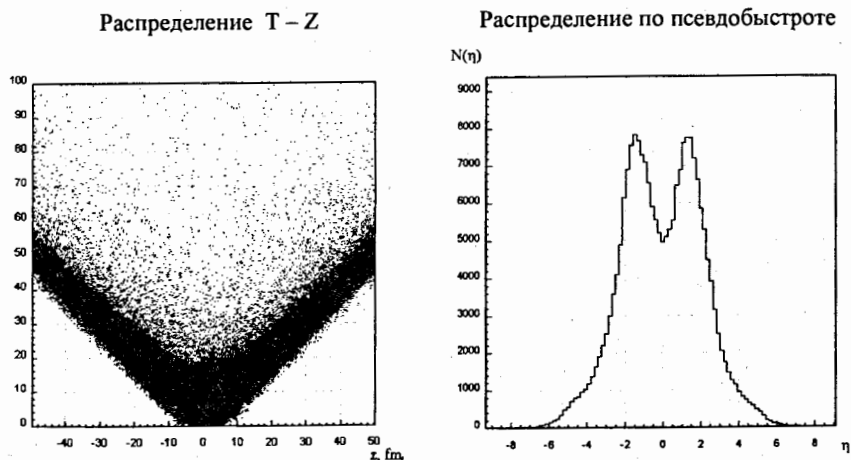


Рис 6 Центральное столкновение U + U при  $E_{cm} = 2000 \text{ AGeV}$

В частности, перед розыгрышем столкновения в составе этой компоненты работает компонента, моделирующая начальное состояние ядра. На рисунке 7 показаны распределения координат и импульсов нуклонов, полученные в результате работы этой компоненты.

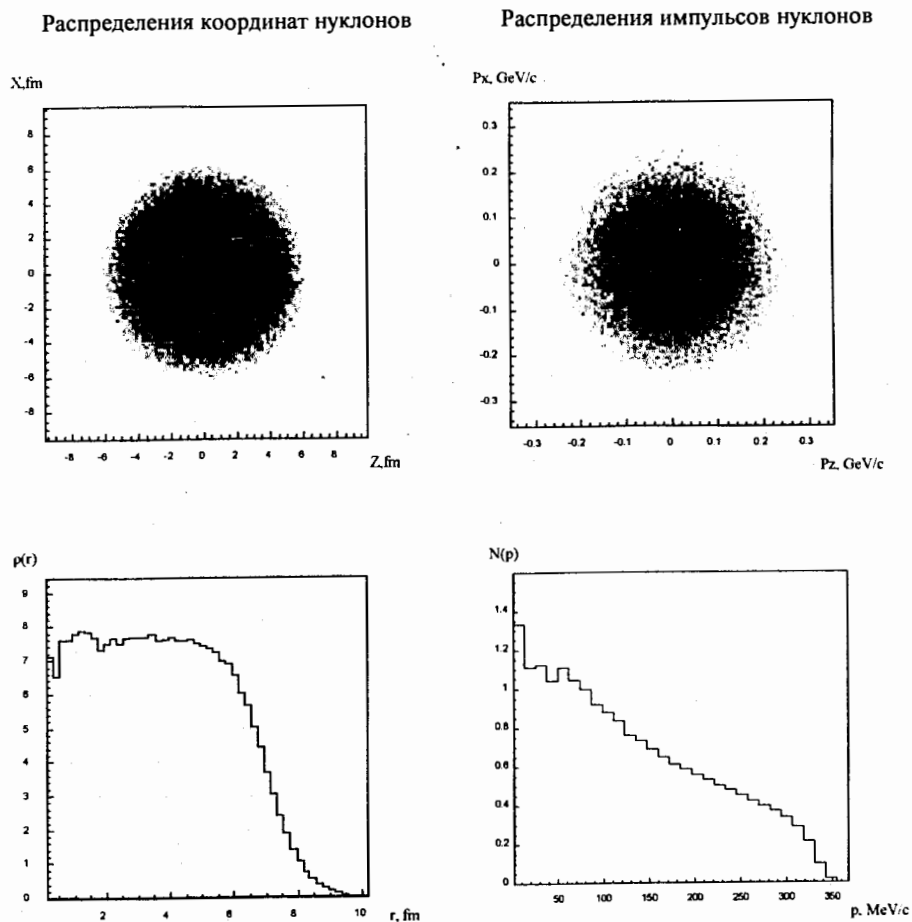


Рис 6: Результат работы компоненты моделирующей начальное состояние ядра.

Распределения получены для ядра  $U_{92}^{232}$

Необходимо отметить, что все приводимые результаты в этой главе получены в рамках разработанной системы.

В заключении к работе приводится краткое описание основных идей, лежащих в основе компонентного подхода к разработке и применению численных моделей, а также краткое описание основных свойств созданного программного

обеспечения и созданных моделирующих компонент, и подчеркивается их новизна и научная значимость.

## **Список публикаций**

[1] Amelin N. and Komogorov M., An Object-Oriented Framework for the Hadronic Monte-Carlo Event Generators. JINR Rapid Communications, 1999, No. 5-6 [97]-99, p. 52-84.

[2] Amelin N. and Komogorov M., An Object-Oriented Framework for the Hadronic Monte-Carlo Event Generators. In Proc. of Int. Conf. on Computing in High Energy and Nuclear Physics (CHEP2000), 7 - 11 February 2000, Padova, Italy, p. 119-123.

[3] Komogorov M. and Amelin N., Component-oriented framework for hadron Monte-Carlo event generators. The abstract published in Proc. of XXXIV annual conference of the Finish Physical Society, March 9-11, 2000, Espoo, Finland, p. 91.

[4] Amelin N. and Komogorov M., NIMAX: A New Approach to Develop Hadronic Event Generators in HEP. PHYS. P&N LETTERS, 2000, No. 3 [100]-2000, p. 35-47.

[5] Amelin N. and Komogorov M., NIMAX System: A New Approach to Develop, Assemble and Use Numerical Models in HEP. The talk presented at the XV Int. Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Russia, 25 - 29 September, 2000, JINR Report E1-2001-31.

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 апреля 2001 года.