

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

1-2002-221

На правах рукописи

УДК 539.1.074.4

539.12.01

**ШМАТОВ**

Сергей Владимирович

**ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ  
МНОЖЕСТВЕННОГО РОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЛОБАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ  
ПРИ ЭНЕРГИЯХ БОЛЬШОГО АДРОННОГО КОЛЛАЙДЕРА**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий и Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований

**Научный руководитель:**

кандидат физико-математических наук

Павел Игоревич Зарубин

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Борис Владимирович Батюня

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Андрей Владимирович Леонидов

**Ведущая организация:**

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ  
им. Д.В. Скобельцына

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 года в “\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д-720.001.02 в Объединенном институте ядерных исследований при Лаборатории высоких энергий по адресу:

141980 г. Дубна Московской области, ЛВЭ ОИЯИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук,  
профессор

 Лихачев М.Ф.

## *Общая характеристика диссертации*

Настоящая работа основана на результатах исследований, выполненных при участии автора в 1998 – 2002 гг. в Лаборатории высоких энергий и Лаборатории физики частиц ОИЯИ. В диссертации представлены результаты исследования механизмов взаимодействия кварков и глюонов при больших плотностях ядерной среды на основе анализа глобальных характеристик взаимодействий и моделирования процессов множественного рождения частиц в рамках программы исследований ядро-ядерных взаимодействий, планируемых на установке "Компактный мюонный соленоид" (Compact Muon Solenoid – CMS <sup>1</sup>), создаваемой для работы на пучках Большого адронного коллайдера (LHC), ЦЕРН.

### **Актуальность темы**

Основной прогресс в понимании структуры атомных ядер, их взаимодействий при высоких энергиях связан с теорией сильных взаимодействий – квантовой хромодинамикой (КХД), на основе которой строятся модели, описывающие различные закономерности ядерной динамики и такие эффекты, как рождение частиц в кумулятивной области, экранирование структурных функций, гашение струй, дифракционные процессы и т.д.

Изучение свойств КХД в пределах сильной и слабой связи, КХД при конечной температуре и больших плотностях ядерной материи, свойств самосогласованных самодействующих глюонных полей и описание процессов взаимодействия ядер и множественного рождения частиц составляет на сегодняшний день предмет исследования при проведении экспериментов с релятивистскими ядрами.

---

<sup>1</sup>The Compact Muon Solenoid, Technical Proposal. CERN/LHCC 94-38 (1994).

Также обширные дискуссии вызывает возможность фазового перехода между адронной материей и системой свободных кварков и глюонов – кварк-глюонной плазмой (КГП), т.е. достижения деконфаймента адронной материи. Изучение свойств ядерной материи при высоких плотностях и температурах важно также для понимания физики ранней Вселенной и образования нейтронных звезд.

Взаимодействия ультрарелятивистских ядер на Большом адронном коллайдере могут предоставить уникальную возможность для изучения свойств КХД при конечной температуре и высоких плотностях, механизмов множественного рождения частиц, закономерностей образования и поведения сильновозбужденной плотной ядерной материи и возможности достижения химически равновесного и термализованного состояния кварк-глюонной системы – кварк-глюонной плазмы. Последовательное исследование всех стадий эволюции кварк-глюонной системы невозможно без детального понимания всех процессов, начиная от самых ранних времен образования жестких партонов, и заканчивая процессами фрагментации.

Как свидетельствуют экспериментальные данные, полученные в BNL на установках RHOBOS<sup>2</sup>, PHENIX<sup>3</sup> и STAR<sup>4</sup>, глобальные характеристики (распределения множественности и полной поперечной энергии) являются очень чувствительным индикатором процессов рождения и фрагментации кварков и глюонов, процессов вторичных взаимодействий, механизмов фрагментации, а также геометрии ядерных взаимодействий. Ожидается, что при энергиях Большого адронного коллайдера глобальные характеристики могут быть использованы как для

---

<sup>2</sup>B.V. Back *et al.*, *Nucl. Phys.* **A698** (2002) 564; *Phys. Rev.* C65 (2002) 031901.

<sup>3</sup>K. Adcox *et al.*, *Nucl. Phys.* **A698** (2002) 39; **A698** (2002) 559.

<sup>4</sup>I.G. Beraden *et al.*, *Nucl. Phys.* **A698** (2002) 29; *Phys. Lett.* **B523** (2001) 227.

получения новой экспериментальной информации о механизмах множественного рождения, начальной плотности глюонов и кварков, их взаимодействии друг с другом и с ядерной средой в конечном состоянии, последующей адронизации, так и для проведения ряда методических разработок.

**Целью работы** является изучение физических механизмов процессов множественного рождения частиц, эффектов ядерного экранирования и гашения струй при взаимодействии атомных ядер ультрарелятивистских энергий и развитие методов моделирования этих процессов, разработка программы исследований глобальных характеристик взаимодействий ядер при энергиях Большого адронного коллайдера (LHC) на многоцелевой установке "Компактный мюонный соленоид" (CMS).

### **Научная новизна и практическая ценность**

Систематически рассмотрено влияние эффектов экранирования и вторичных взаимодействий частиц с ядерной средой на множественное рождение частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при энергиях Большого адронного коллайдера.

На основании проведенного анализа механизмов взаимодействия ядер показано, что глобальные характеристики являются адекватным инструментом для исследования основных закономерностей множественного рождения частиц в ядро-ядерных столкновениях при энергиях Большого адронного коллайдера, динамики ядерных взаимодействий, поведения КХД при конечной температуре, свойств плотной ядерной среды.

Основная идея экспериментальных измерений основывается на простом с точки зрения отбора событий анализе полных потоков поперечной энергии и множественности в максимально широких угловых и

быстротных интервалах. Интенсивность пучков Большого адронного коллайдера ( $L_{Pb} \simeq 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{c}^{-1}$ ) позволят провести набор необходимой для анализа статистики в кратчайшие сроки (несколько дней).

Впервые показана возможность нарушения асимптотического поведения формы псевдобыстротных распределений полной поперечной энергии и зарядовой множественности, а также определена возможность фазового кварк-адронного перехода в столкновениях легких ядер и в нецентральных взаимодействиях.

Предложены и проработаны схемы мониторинга интенсивности ядро-ядерных взаимодействий и измерения прицельного параметра столкновений в событийном анализе, а также продемонстрирована исключительная важность калориметра переднего направления установки CMS при проведении экспериментов на пучках ускоренных ядер.

Проведенные исследования способствуют развитию методов калориметрического анализа и методов измерения множественности в условиях больших загрузок на различных экспериментальных установках.

### Апробация работы и публикации

Результаты исследований, составивших диссертацию, докладывались на научных семинарах Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, Лаборатории физики частиц ОИЯИ, Института теоретической и экспериментальной физики, Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ, Санкт-Петербургского института ядерной физики; рабочих совещаниях коллаборации Компактный мюонный соленоид, проходивших в ЦЕРН, ОИЯИ, ИТЭФ, МГУ; на международных рабочих совещаниях, школах и конференциях: "Релятивистская ядерная физика" (Дубна, Россия 1997), "1998 European School of High-Energy

Physics" (Sent-Andrew, Scotland, August 1998), XIV и XV международных семинарах по проблемам физики высоких энергий (ОИЯИ, Дубна, август 1998 г. и сентябрь 2000 г.); "Particle Production Spanning MeV and TeV Energies" (Nijmegen, The Netherlands, August 1999), "Relativistic Nuclear Physics: From Hundred MeV to TeV" (Stara Lesna, Slovak Republik 2000), "LHC Physics and Detectors" (Dubna 2000), "Actual Problem of Particle Physics" (Gomel, Belorussia, August 2001), "CMS Heavy Ion Meeting" (Dubna 1997, Geneva 1999, Gatchina 2000, Boston 2002), III и IV международных конференциях Отделения ядерной физики РАН (ИТЭФ, Москва, ноябрь 1998 г. и ноябрь 2000 г.).

Основные результаты диссертации изложены в 12 публикациях, список которых приведен в конце автореферата.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Список литературы содержит 158 наименований. Полный объем диссертации – 168 страниц, включая 11 таблиц и 59 рисунков.

### *Содержание работы*

Во **введении** были обсуждены основные проблемы и задачи при описании процессов взаимодействия атомных ядер при ультрарелятивистских энергиях.

Отмечено, что установка CMS, создаваемая для работы на Большом адронном коллайдере, может обеспечить возможность проведения необходимых измерений для получения экспериментальной информации о множественном рождении частиц, необходимой для построения и развития теории взаимодействия ядер с позиций КХД и изучения плотной неабелевой среды в пределе нелинейных сильнодействующих полей.

Особое внимание уделено значимости глобальных характеристик ядро-ядерных столкновений.

В **Главе 1** рассмотрены вопросы поведения КХД при экстремальных условиях – конечной температуре и больших плотностях ядерной материи. Обсуждены варианты фазовых переходов от адронной материи к кварк-глюонной плазме и критические значения температуры партонной системы, при которых такой переход возможен.

Проведен обзор различных механизмов <sup>5</sup> ядерного экранирования кварков и глюонов и потерь энергии частицами в конечном состоянии при их взаимодействии с ядерной средой (гашение струй) <sup>6</sup>.

Обсуждается существенный рост при высоких энергиях вклада высших порядков в процессы взаимодействия (в области больших значений переданного импульса  $Q^2$ ) и, одновременно, увеличение доли процессов, происходящих в области малых значений бьеркеновской переменной  $x$ .

В **Главе 2** представлены результаты анализа методом компьютерного моделирования процессов множественного рождения частиц при взаимодействии атомных ядер при энергиях Большого адронного коллайдера. В качестве экспериментальных наблюдаемых используются глобальные характеристики ядро-ядерных взаимодействий – полная поперечная энергия в событии  $E_T$  и множественность заряженных адронов.

В первом параграфе проведены расчеты множественности и поперечной энергии в предположении независимых двойных нуклон-нуклонных взаимодействий с использованием нескольких моделей взаимодействий

<sup>5</sup>L.V. Gribov, E.M. Levin, M.G. Ryskin, *Phys. Rept.* **100** (1983) 1; A.H. Mueller, *Nucl.Phys.* **B335** (1990) 115; F.E. Close, J. Qiu, R.G. Roberts, *Phys. Rev.* **D40** (1989) 2820.

<sup>6</sup>M. Gyulassy, M. Plümer, X.-N. Wang, *Phys.Rev.* **D51** (1995) 3436; R. Baier, Yu.L. Dokshitzer, S. Peigne, D. Schiff, *Phys. Lett.* **B 345**, 277 (1995).



(PYTHIA <sup>7</sup>, HIJING <sup>8</sup>, VENUS <sup>9</sup>, FRITIOF <sup>10</sup>) при энергии взаимодействия ядер  $\sqrt{S} = 5,5$  ТэВ/нукл [1].

В качестве основного источника (в моделях PYTHIA и HIJING) множественного рождения частиц в ядерных взаимодействиях при ультрарелятивистских энергиях рассматривалось образование в жестких и полужестких процессах так называемых министруй, т.е. струй с  $p_T \sim 2 \div 5$  ГэВ, регистрация которых в эксперименте затруднена. Особенность рождения министруй при энергиях ЛНС заключается в том, что они характеризуются малыми значениями переменной Бьеркена  $x \sim 2p_T/\sqrt{S} \sim 7 \cdot 10^{-3}$ . При таких значениях  $x$  на инклюзивное сечение рождения министруй большое влияние оказывает выбор набора партонных структурных функций (от 154 мб для DO1 до 1514 мб для GRV94L), которые наиболее сильно отличаются друг от друга в области малых  $x$ .

Во втором параграфе исследовалось влияние взаимодействия частиц в конечном состоянии с ядерной средой на глобальные характеристики процесса столкновения ядер [2]. Моделирование ядро-ядерных взаимодействий осуществлялось с помощью программы HIJING с учетом явной зависимости удельных потерь энергии  $dE/dx$  (т.е. потерь энергии на единицу расстояния, пройденного партоном в среде) от энергии партона.

Потери энергии кварками и глюонами, вызванные процессами перераспределения и вынужденного радиационного излучения при их прохождении через плотную ядерную среду (эффект гашения струй) приводят к перераспределению частиц в псевдобыстротном пространстве и

---

<sup>7</sup>T. Sjostrand *et al.*, *Comput. Phys. Commun.* **135** (2001) 238

<sup>8</sup>M. Gyulassy, X.-N. Wang, *Comput. Phys. Commun.* **83** (1994) 307.

<sup>9</sup>K. Werner, *Phys. Rep.* **232** (1993) 87.

<sup>10</sup>B. Nilsson-Almqvist, E. Stenlund, *Comput. Phys. Commun.* **24** (1987) 387.

значительному искажению центральной части псевдобыстротных распределений (образованию широкого пика) множественности  $n$  и полной поперечной энергии  $E_T$  (рисунок 1) [3,4]. Учет эффекта гашения струй приводит к увеличению псевдобыстротной плотности множественности и полной поперечной энергии в 1.9 раза для случая  $PbPb$ -взаимодействий.

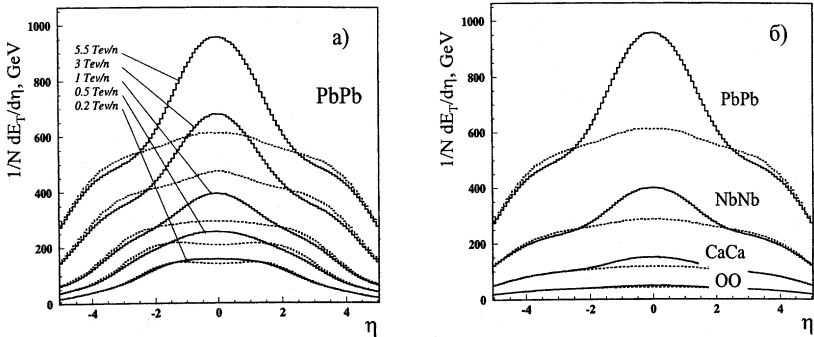


Рис. 1: Распределения полной поперечной энергии в событиях для (а)  $PbPb$ -взаимодействий с минимальным отбором по прицельному параметру при энергиях  $\sqrt{S}=5,5, 3, 1, 0,5, 0,2$  ТэВ/нуклон и (б) для взаимодействий ядер свинца, ниобия, кальция и кислорода при  $\sqrt{S}=5,5$  ТэВ/нуклон. Сплошная линия соответствует взаимодействию с учетом эффекта гашения струй, пунктирная – без.

Далее была изучена энергетическая зависимость эффекта нарушения асимптотического поведения псевдобыстротных распределений глобальных переменных [2,4,5]. С уменьшением энергии сталкивающихся ядер величина пика сильно уменьшается и распределения "выползают" (рисунок 1а). Это связано с резким сокращением плотности партонов, достигаемой при более низких энергиях и, как следствие, меньшей вероятностью их вторичных взаимодействий, что, в свою очередь, приводит к уменьшению энергии, передаваемой партонами при перерассеянии конститuentам ядерной среды. Кроме того, при уменьшении энергии взаимодействия сильно изменяются и характеристики

среды - константа экранирования цветного заряда  $\mu_D$ , начальные значения плотности энергии  $\epsilon_0$  и температуры  $T_0$ , что также приводит к уменьшению удельных потерь энергии  $dE/dx$ .

Кроме того, была проанализирована зависимость полной потерянной партонами энергии от интегрального расстояния, пройденного в среде. Показана сильная зависимость величины искажений от прицельного параметра взаимодействий и атомного номера сталкивающихся ядер [3]. Максимальная относительная величина пика достигается при центральных столкновениях ядер свинца (рисунок 16).

Также была вычислена зависимость плотности поперечной энергии, плотности множественности и средней поперечной энергии от величины  $dE/dx$ . Для центральных взаимодействий ядер свинца показано, что, начиная с  $dE/dx = 3$  ГэВ/фм, рост плотности энергии и множественности прекращается и зависимость выходит на насыщение на уровне  $dE_T/d\eta = 5200$  ГэВ и  $dn_{ch}/d\eta = 6200$ . Результаты расчетов средней поперечной энергии  $\langle E_T \rangle$  с учетом взаимодействий в конечном состоянии показывают, что теоретические предсказания для энергии LHC совпадают с экспериментальными данными RHIC (установки PHOBOS и PHENIX) и SPS (WA098), и величина  $\langle E_T \rangle$  практически не зависит от энергии взаимодействия и степени центральности.

Было показано [6,7], что нарушение асимптотического поведения распределений глобальных переменных также возникает и при рассмотрении механизма адрон-адронного перерасеяния в рамках моделей VENUS.

Отмечено, что вторичные взаимодействия приводят к модификации только в центральной части псевдобыстротных распределений, оставляя область больших  $\eta$  практически без изменений [2,5]. Это об-

стоятельство может быть использовано для измерения прицельного параметра и мониторингования интенсивности взаимодействия ядер с помощью калориметра переднего направления (см. Главу 4).

Во втором параграфе исследовалось влияние эффекта ядерного экранирования структурных функций (СФ) кварков и глюонов на распределения глобальных наблюдаемых ядро-ядерных взаимодействий [8]. Расчеты были выполнены в рамках приближения независимых парных взаимодействий на основании модели RUTHIA с использованием масштабнезависимой параметризации экранирования  $MQ^{11}$  в пределе насыщения при малых значениях переменной Бьеркена  $x$  и, для параметризации EKS<sup>12</sup>, учитывающей КХД-эволюцию функций распределения партонов.

Расчеты, выполненные на основании модели MQ, показывают, что экранирование структурных функций приводит к уменьшению поперечной энергии и множественности в центральной области взаимодействия в  $1.2 \div 2$  раза для разных типов сталкивающихся ядер ( $Ca \div Pb$ ) (рис.2). Полученные результаты совпадают с предсказаниями модели HIJING, модифицированной с учетом зависимости коэффициента экранирования от степени центральности взаимодействия. Учет ДГЛАП<sup>13</sup>-эволюции партонных функций распределения (модель EKS) и цветных степеней свободы партонов ослабляет эффект экранирования в 2 раза (рис.2). При этом разные сценарии экранирования оказываются не зависящими от набора партонных структурных функций.

---

<sup>11</sup>A.H. Mueller, *Nucl. Phys.* **B335** (1990) 115; F.E. Close, J. Qiu, R.G. Roberts, *Phys. Rev.* **D40** (1989) 2820.

<sup>12</sup>K.J. Eskola, V.J. Kolhinen, P. Ruuskanen, *Nucl. Phys.* **B535** (1998) 351; K.J. Eskola, V.J. Kolhinen, C.A. Salgado, *Eur. Phys. J.* **C9** (1999) 61.

<sup>13</sup>Докшицер-Грибов-Липатов-Альтарелли-Паризи: В.Н. Грибов, Л.Н. Липатов, *Ядерная физика* 15 (1972) 781; Л.Н. Липатов, *Ядерная физика* 20 (1974) 181; Ю.Л. Докшицер, *ЖЭТФ* 46 (1977) 641; G. Altarelli, G. Parisi, *Nucl. Phys.* **B126** (1977) 298.

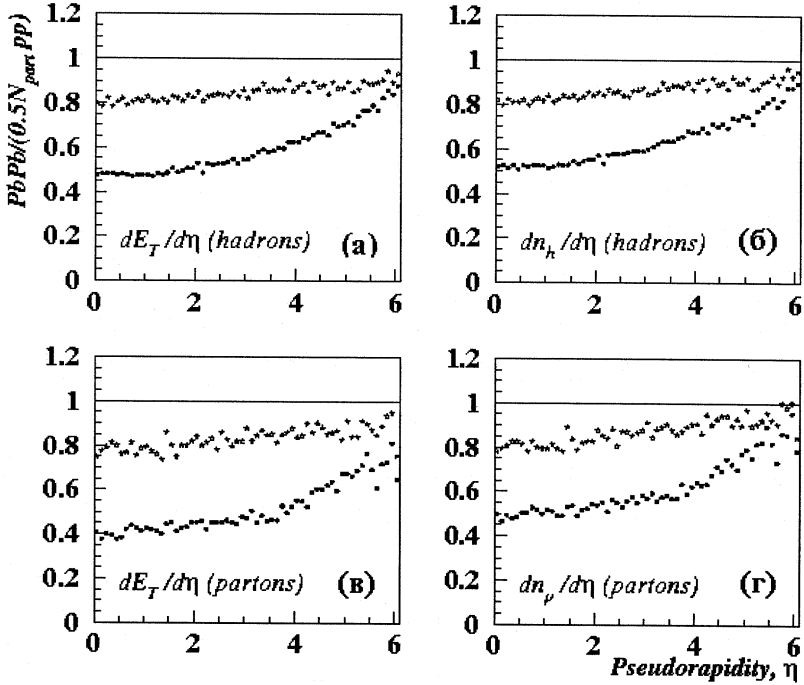


Рис. 2: Распределения (а, в) полной поперечной энергии  $E_T$  и множественности (б, г) по псевдобыстроте  $\eta$  для (а, б) адронов и (в, г) кварков и глюонов, нормированные на аналогичные распределения для  $pp$ -взаимодействий при той же энергии и на число парных нуклон-нуклонных взаимодействий  $\frac{N_{part}}{2} \approx 200$ . Центральные  $PbPb$ -взаимодействия при  $\sqrt{s_{nn}} = 5,5$  ТэВ/нуклон. Сплошная линия – нет экранирования, точки – экранирование в MQ модели, звездочки – экранирование в модели EKS.

В заключение в главе 2 была определена  $A$ -зависимость множественного рождения частиц в различных сценариях взаимодействия ядер. Для  $A$ -зависимости было использовано степенное приближение  $\sigma_{AA} = A^\alpha \sigma_{pp}$ . При отсутствии ядерных эффектов глауберовская модель дает  $\alpha_{GL} = \frac{4}{3}$  для случая центральных взаимодействий ядер. Учет эффекта экранирования приводит к ослаблению  $A$ -зависимости:  $\alpha \approx 1,13$  (модель экранирования MQ). Гашение струй (2) вызывает заметное увеличения степенного показателя  $\alpha \approx 1,52$ . Одновременный учет эффекта гашения струй и экранирования приводит ко взаимной

компенсации их вкладов в  $A$ -зависимость, и для модели MQ значение  $\alpha \approx 1,29$ , оказывается меньшим, чем  $\alpha_{GL}$ . С другой стороны, для модели EKS это значение составляет 1,46, что превышает  $\alpha_{GL}$ . Полученные значения  $\alpha$  несколько отличаются от результатов, предсказываемых в рамках партонной модели с насыщением партонной плотности<sup>14</sup> ( $\alpha=0,922$ ).

Таким образом, в главе 2 показано, что распределения глобальных переменных очень чувствительны к выбору модели ядерного экранирования, что может быть использовано для проверки этих моделей на эксперименте.

В **Главе 3** приведены расчеты основных характеристик кварк-глюонной плазмы, образуемой при взаимодействии атомных ядер при энергии LHC [9]. Обсуждаются модельная зависимость этих параметров и возможность их экспериментального измерения.

В первом параграфе в гидродинамическом пределе Бьеркена<sup>15</sup> проведены расчеты начальных плотностей энергии и множественности кварк-глюонной системы, образуемой при столкновении ядер. Основываясь на уравнении эволюции идеальной плазмы

$$\frac{d\epsilon}{d\tau} + \frac{\epsilon + P}{\tau} = 0,$$

вычислена плотность энергии и температура для начальной стадии ( $\tau_0 \sim 0.1$  фм) формирования КГП:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{V_A} \frac{dE_T}{d\eta}(\eta = 0), \quad T_0 = \left(\frac{\epsilon_0}{3a}\right)^{1/4}, \quad V_A = \pi R_A^2 \Delta\eta \tau_{iso},$$

где  $R_A$  – радиус взаимодействующих ядер,  $dE_T/d\eta$  – псевдобыстротная плотность поперечной энергии в интервале  $\Delta\eta$ ,  $a = 8\pi^2/15$ , а  $\tau_{iso} \simeq \tau_0$  –

<sup>14</sup>J.P. Blaizot, A.H. Müller, *Nucl. Phys.* **289** (1987) 847; K.J. Eskola, P.V. Ruuskanen, S.S. Rasanen, K. Tuominen, *Nucl. Phys.* **A696** (2001) 715; *Nucl. Phys.* **B570** (2000) 379

<sup>15</sup>J.D. Bjorken, *Phys. Rev.* **D27** (1983) 140.

время достижения кварк-глюонной системой изотропии в импульсном пространстве.

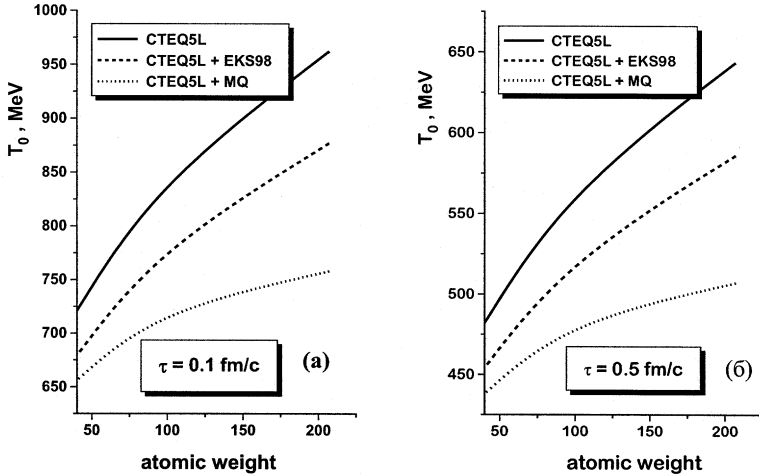


Рис. 3: Начальная температура при различных значениях атомного номера сталкивающихся ядер, центральные соударения  $b=0$  фм,  $\sqrt{s} = 5,5$  ТэВ/нуклон для времен формирования (а) 0,1 фм/с и (б) 0,5 фм/с. При расчетах использовался набор структурных функций СТЕQ5L с учетом партонного экранирования: нет экранирования (сплошная линия), EKS (штриховая), MQ (пунктирная).

В рамках моделей экранирования MQ и EKS определена зависимость этих величин от типа сталкивающихся ядер (рисунок 3) и прицельного параметра столкновений, а также зависимость начальной температуры от времени термализации кварк-глюонной системы. Для вычислений были использованы два значения времени термализации  $\tau_{iso} = 0,1$  и  $0,5$  фм/с. Показано, что энергия пучков ЛНС позволяет многократно превзойти критические значения температуры фазового перехода –  $T_{crit} = 260$  (для системы только с глюонными степенями свободы) и  $170$  МэВ (с учетом кварковых степеней свободы) – даже при взаимодействии легких ядер и при нецентральных столкновениях тяжелых ядер. Тем самым продемонстрирована принципиальная

возможность образования неравновесной КГП в центральных столкновениях ядер с  $A \sim 40$  и в нецентральных (с прицельным параметром  $\simeq R_A$ ) ядер с  $A \sim 200$ . В рамках моделей экранирования MQ и EKS определена зависимость этих величин от типа сталкивающихся ядер (рисунок 3) и прицельного параметра столкновений, а также зависимость начальной температуры от времени термализации кварк-глюонной системы. Для вычислений были использованы два значения времени термализации  $\tau_{iso} = 0,1$  и  $0,5$  фм/с. Показано, что энергия пучков LHC позволяет многократно превзойти критические значения температуры фазового перехода –  $T_{crit} = 260$  (для системы только с глюонными степенями свободы) и  $170$  МэВ (с учетом кварковых степеней свободы) – даже при взаимодействии легких ядер и при нецентральных столкновениях тяжелых ядер. Тем самым продемонстрирована принципиальная возможность образования неравновесной КГП в центральных столкновениях ядер с  $A \sim 40$  и в нецентральных (с прицельным параметром  $\simeq R_A$ ) ядер с  $A \sim 200$ .

Во втором параграфе, исходя из полученных начальных условий, рассмотрена временная эволюция ядерной системы и определено время ее жизни в кварк-глюонной фазе. При расчетах в случае предела Бьеркена использовались временная эволюция температуры, плотности энергии и плотности партонов:

$$T(\tau) = T_0 \left( \frac{\tau}{\tau_{eq}} \right)^{-\frac{1}{3}}, \quad \epsilon(\tau) = \epsilon_0 \left( \frac{\tau}{\tau_{eq}} \right)^{-\frac{4}{3}}, \quad n(\tau) = n_0 \left( \frac{\tau}{\tau_{eq}} \right)^{-1}.$$

Показано, что для  $\tau_{iso} = 0,1$  фм/с в зависимости от набора СФ значение времени жизни кварк-глюонной системы лежит в интервалах  $7,5 \div 22,5$  фм/с и  $2,1 \div 6,3$  фм/с для критической температуры фазового перехода  $T_{crit} = 170$  и  $260$  МэВ, соответственно (случай центральных взаимодействий ядер свинца). При увеличении времени тер-



мализации до 0,5 фм/с, время жизни, соответственно, увеличивается до  $11,1 \div 33,6$  фм/с и  $3,1 \div 9,4$  фм/с. В пределе свободного потока  $\epsilon(\tau) \sim (\tau)^{-1}$  время жизни КГП существенно (в  $3 \div 4$  раза) возрастает. Также получена зависимость времени жизни КГП от времени термализации системы.

Сравнение полученных результатов (при  $T_{crit} = 170$  МэВ) с предсказываемым временем достижения полного химического равновесия ( $\tau_{eq} \simeq 8$  фм/с<sup>16</sup>) позволяет сделать вывод, что наступление полного химического равновесия в кварк-глюонной системе при  $T_{crit} = 260$  МэВ невозможно ни при каких условиях. Для меньшего значения  $T_{crit} = 170$  МэВ (с учетом кварковых степеней свободы) и  $\tau_{iso} = 0,1$  фм/с наступление химического равновесия можно ожидать только при центральных взаимодействиях тяжелых ядер ( $A \geq 150$ ) (с учетом самого пессимистического сценария – с МQ-экранированием). При этом в случае экранирования по EKS-модели возможно полное химическое равновесие и для центральных соударений легких ядер – вплоть до ядер *Ca*. При увеличении времени термализации до 0,5 фм/с остывание системы замедляется, и равновесие становится возможным даже при нецентральных столкновениях ядер свинца (при  $b \simeq R_A$ ).

В третьем параграфе обсуждается возможность экспериментально-го определения начальных условий формирования КГП.

**Глава 4** посвящена методическим вопросам проведения эксперимента на установке CMS.

В первом параграфе дано краткое описание систем детекторов установки CMS. Рассмотрены основные характеристики адронного и электромагнитного калориметров.

<sup>16</sup>C.N. Gouranga, A. Dumitru, L. McLerran, W. Greiner, *Nucl. Phys.* **A687** (2001) 457.

Во втором параграфе обсуждаются особенности работы калориметрической системы установки при работе на пучках ядер. Приводятся результаты реконструкции полной поперечной энергии в  $PbPb$ - и  $pp$ -столкновениях с помощью пакета CMSIM120. Обсуждается эффект влияния магнитного поля (4 Тл) на эффективность реконструкции энергии и эффект "мертвых" зон в акцептансе калориметрической системы CMS. Эффективность реконструкции поперечной энергии в центральной области псевдобыстрот ( $|\eta| \leq 2, 0$ ) составляет  $90 \div 93$  % при отсутствии магнитного поля и  $57 \div 70$  % при его наличии.

В третьем параграфе представлена схема мониторинга интенсивности ядро-ядерных столкновений [10, 11]. Схема основана на временных совпадениях сигналов в калориметре переднего направления (КПН) установки CMS, расположенного в области псевдобыстрот  $3 \leq |\eta| \leq 5$ . В качестве основного сигнала для отбора событий при мониторинге числа ядро-ядерных взаимодействий мы предлагаем использовать временное совпадение сигнала от двух плеч КПН –  $HF_+$  и  $HF_-$ . События считаются отобранными, если величина сигнала, т.е. величина полной выделившейся энергии в каждом из плеч, больше некоторого порогового значения  $E_{thr}$ , определяемого конструктивными особенностями калориметра. Таким образом, условие отбора ядро-ядерных взаимодействий выглядит следующим образом:

$$(E_{HF_+} \geq E_{thr}) \otimes (E_{HF_-} \geq E_{thr})$$

На основании моделирования в рамках модели HIJING была определена эффективность предложенного метода в зависимости от порогового значения энергии в КПН, которая определялась как  $\epsilon = \frac{N_{thr}}{N_{sim}} \cdot 100\%$ , где  $N_{thr}$  – число событий, удовлетворяющих условию отбора,  $N_{sim}$  – полное число смоделированных событий. Было проведено

исследование эффективности для случаев взаимодействия ядер разных типов при энергии 5,5 ТэВ на нуклон с минимальным отбором по прицельному параметру (рисунок 4а), взаимодействии ядер свинца при различных энергиях в системе центра масс и взаимодействии ядер свинца при различных прицельных параметрах (рисунок 4б).

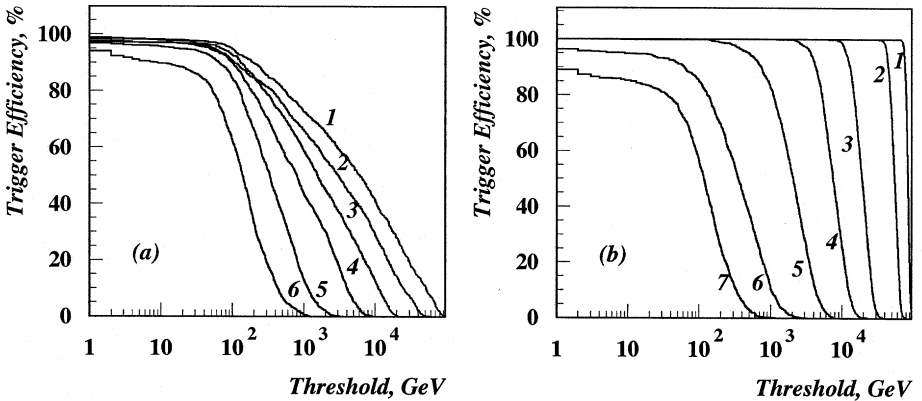


Рис. 4: Зависимость эффективности отбора событий от порогового значения суммарной энергии в  $HF_+(HF_-)$  калориметре для (а) событий АА-взаимодействий с минимальным отбором по прицельному параметру: 1 - PbPb, 2 - NbNb, 3 - CaCa, 4 - OO, 5 - αα, 6 - pp; (б) взаимодействий ядер свинца при энергии  $\sqrt{S} = 5,5$  ТэВ/нуклон с различными прицельными параметрами: 1 - 0..0.2 фм, 2 - 4..6 фм, 3 - 8..10 фм, 4 - 10..12 фм, 5 - 12..14 фм, 6 - 14..16 фм, 7 - 16..18 фм.

В области значений пороговой энергии от 1 до 20 ТэВ достигается эффективность мониторингования, практически не зависящая от порога, на уровне  $99 \div 98$  %. При переходе в рабочую область энергий КПП (500 ÷ 1000 ТэВ) эффективность падает с 83 % (для 100 ТэВ) до 73 % (для 500 ТэВ), а при уменьшении энергии взаимодействия ядер – вплоть до 55 %.

Похожая закономерность в поведении наблюдается и при уменьшении атомного веса сталкивающихся ядер (рисунок 4а). В этом случае

стабильная эффективность отбора событий на уровне 98 % достигается для всех случаев симметричных ядро-ядерных взаимодействий, начиная с порогового значения энергии 100 ГэВ, что значительно ниже рабочего порога. В случае  $pp$ - и  $CaCa$ -взаимодействий подобная стабильность не наблюдается, что приводит к еще большему снижению эффективности мониторингирования интенсивности взаимодействий.

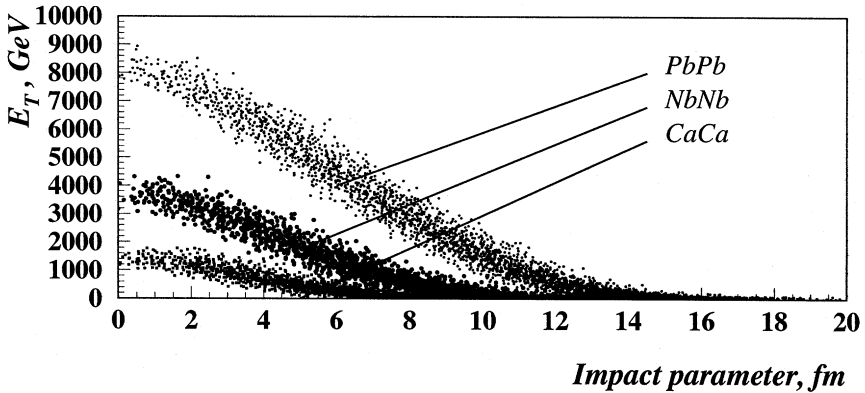


Рис. 5: Зависимость прицельного параметра взаимодействий  $b$  от полной поперечной энергии  $E_T$ .  $PbPb$ -,  $NbNb$ -,  $CaCa$ - взаимодействия при энергии  $\sqrt{S} = 5,5$  ТэВ/нуклон.

Временное разрешение КПН (1 нс) позволяет с помощью временных совпадений зафиксировать продольные координаты точки взаимодействий с точностью до 30 см., что может использоваться для подавления фоновых процессов, обусловленных взаимодействием ядер пучков как с ядрами остаточного газа в ионопроводе, так и с элементами установки и ионопровода.

Во четвертом параграфе предложен метод определения прицельного параметра взаимодействий [11, 12]. Так как прицельный параметр взаимодействия  $b$  не является прямо измеряемой величиной, то необходимо найти некоторую физическую величину, хорошо измеряемую в эксперименте и однозначно связанную с прицельным параметром. В

качестве подобной величины предлагается использовать полную поперечную энергию  $E_T$  (или полную энергию  $E$ ), переносимую частицами, рожденными в одном ядро-ядерном соударении.

Было показано, что существует сильная корреляция между полной поперечной энергией, зарегистрированной в КПН, и прицельным параметром (рисунок 5). "Коридор" возможных значений прицельного параметра, соответствующих фиксированной энергии в КПН, вызван динамическими флуктуациями энергии и позволяет оценить прицельный параметр с точностью до  $1 \div 2$  фм (рисунок 6).

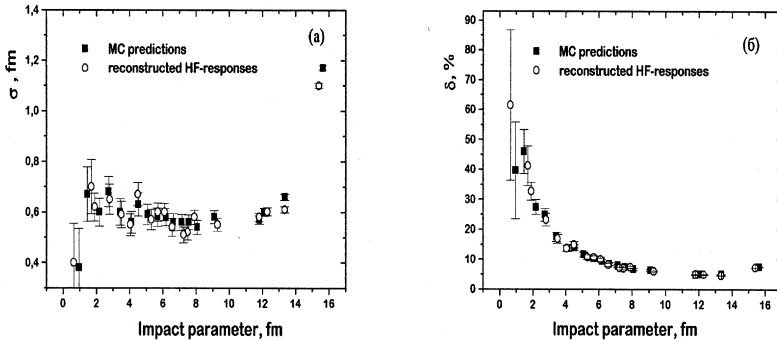


Рис. 6: Ширина распределения Гаусса ( $\sigma$ ) (а) при фиксированном значении энергии в  $HF$  калориметре ( $\Delta E = 0,5$  ТэВ) и относительная точность  $\delta = 2\sigma_b/b$  (б) определения прицельного параметра для взаимодействий ядер свинца. Для смоделированной энергии (модель HIJING) и реконструированной энергии (CMSIM120).

Отбор событий в области псевдобыстрот  $3 \leq |\eta| \leq 5$  обеспечивает эффективное мониторирувание событий в широком диапазоне интенсивностей пучков и чувствительность только к геометрии ядерных столкновений независимо от динамики ядерных взаимодействий, т.е. от возможного появления сигналов "новой" физики. Другими словами, предложенные методы мониторирувания и определения прицельного параметра оказываются чувствительными только к геометрии

ядерных столкновений.

Моделирование, выполненное с помощью пакета моделирования отклика сигнала CMSIM120 <sup>17</sup> показало, что шумы калориметрической системы, энергетические пороги и другие эффекты установки практически не влияют на точность измерения прицельного параметра (рисунки 6).

В **закл<sup>ю</sup>чении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Методом компьютерного моделирования проведено изучение процессов множественного рождения частиц и разработана программа исследований глобальных характеристик ядро-ядерных взаимодействий (множественности и полной поперечной энергии) при энергиях Большого адронного коллайдера на установке Компактный мюонный соленоид (CMS).
2. В рамках монте-карловских моделей HIJING и VENUS впервые показано, что вторичные взаимодействия такие, как вынужденное глюонное излучение и адронное перерасcеяние, приводят к нарушению асимптотического поведения формы псевдобыстротных распределений глобальных переменных  $dE_T/d\eta$  и  $dn_{ch}/d\eta$  и образованию широкого максимума в центральной части  $|\eta| \leq 2,0$  этих распределений.
3. Определена зависимость плотностей глобальных наблюдаемых  $dE_T/d\eta$  и  $dn_{ch}/d\eta$  и средней поперечной энергии от величины удельных потерь энергии  $dE/dx$  в ядерной среде с учетом взаимодействий в начальном и конечном состоянии при энергии Большо-

---

<sup>17</sup>CMS Simulation Package, User's Guide and Reference Manual, September 18 (2000).

го адронного коллайдера. Показано, что для центральных взаимодействий ядер свинца при энергии  $\sqrt{S} = 5.5$  ТэВ/нуклон начиная с  $dE/dx = 3$  ГэВ/фм рост плотностей прекращается и зависимость выходит на насыщение на уровне  $dE_T/d\eta = 5200$  ГэВ и  $dn_{ch}/d\eta = 6200$ .

4. Исследовано влияние ядерного экранирования партонных структурных функций на множественное рождение частиц в ядро-ядерных взаимодействиях при ультрарелятивистских энергиях. Показано, что учет глюонных степеней свободы при малых  $x$  и КХД-эволюции ПСФ приводит к менее высокой оценке влияния этого эффекта (примерно в 2 раза) на глобальные характеристики по сравнению с расчетами, выполненными в пределе насыщения экранирования при малых  $x$  ( $\leq 10^{-3}$ ).
5. Изучено влияние эффектов гашения струй и ядерного экранирования на  $A$ -зависимость и зависимость от степени центральности взаимодействия множественного рождения частиц  $\sim A^\alpha$ . Показано, что для центральных событий взаимодействия атомных ядер эффект гашения струй приводит к усилению ( $\alpha = 1,52$ )  $A$ -зависимости по сравнению с глауберовской моделью взаимодействий ( $\alpha = \frac{4}{3}$ ), тогда как эффект экранирование ослабляет эту зависимость до  $\alpha = 1,13$ .
6. В гидродинамическом пределе Бьеркена вычислены начальные условия (начальные значения плотности энергии и частиц) формирования сильновозбужденной горячей ядерной материи и время жизни кварк-глюонной плазмы с учетом различных механизмах экранирования партонных структурных функций. Продемонстри-

рована возможность фазового перехода в состояние КГП в случае взаимодействий легких ядер с  $A \geq 40$  и нецентральных  $b \simeq R_A$  столкновений при энергии  $\sqrt{S} = 5.5$  ТэВ/нуклон.

7. Показано, что в центральной области псевдобыстрот ( $|\eta| \leq 2, 0$ ) поперечная энергия может быть реконструирована с эффективностью  $90 \div 93$  % при отсутствии магнитного поля и  $57 \div 70$  % при его наличии. Измерение плотности поперечной энергии и множественности позволят получить дополнительную информацию о механизмах вторичных взаимодействий и провести экспериментальную проверку предсказаний существующих моделей ядерных взаимодействий.
8. Предложен и обоснован метод мониторинга интенсивности ядерных взаимодействий. Оценена эффективность предложенного метода, для сталкивающихся ядер с  $A \geq 40$  она составляет 98%, для  $pp$ -взаимодействий – 80%. Показано, что характерная форма корреляций энергии, зарегистрированной в двух плечах калориметра переднего направления установки CMS, позволяет отсеять фоновые события, обусловленные взаимодействием ядер пучков с ядрами остаточного газа и элементами установки. Временное разрешение калориметра ( $\sim 1$  нс) позволяет зафиксировать продольную координату точки взаимодействий с точностью до размера области взаимодействий двух встречных пучков протонов ( $\sim 30$  см).
9. Для эксперимента CMS предложена и разработана схема экспериментального определения прицельного параметра взаимодействий. Показано, что поперечная энергия  $E_T$ , регистрируемая калориме-



тром переднего направления, сильно коррелирует с прицельным параметром, что обеспечивает точность измерения прицельного параметра на уровне  $1 \div 2$  фм. Отбор событий в области псевдобыстрот  $3,0 \leq |\eta| \leq 5,0$  позволяет существенно понизить или полностью исключить неопределенности, обусловленные вторичными взаимодействиями.

В приложении приведены результаты вычислений основных геометрических характеристик симметричных ядро-ядерных взаимодействий – функции ядерного профиля, ядерного перекрытия, число участников взаимодействий и число парных нуклон-нуклонных столкновений. Расчеты выполнены на основании модели Глаубера-Ситенко.

Диссертация основывается на следующих опубликованных работах:

1. П.И. Зарубин, М.В. Савина, С.В. Шматов, "Плотность адронов при энергиях ЛHC", *Письма в журнал ЭЧАЯ* **2** [105] (2001) 26.
2. M.V. Savina, S.V. Shmatov, N.V. Slavin, "Manifestation of jet quenching in differential distributions of the total transverse energy in nucleus-nucleus collisions", *JINR Rapid Communication* **87** (1998) 45 [hep-ph/0007115].
3. M.V. Savina, S.V. Shmatov, N.V. Slavin, P.I. Zarubin, "Global features of nucleus-nucleus collisions in ultrarelativistic domain", *JINR Rapid Communication* **91** (1998) 65 [hep-ph/0007128].
4. A.I. Malakhov, M.V. Savina, S.V. Shmatov, N.V. Slavin, P.I. Zarubin, V. Genchev, "Physics with global characteristics of nucleus-nucleus collisions in ultrarelativistic domain", Proceeding of the "XIV International Seminar on High Energy Physics Problem" (August 17-22, 1998, Dubna), p.246, ed. A.M.Baldin and V.V.Burov, E1,2-2000-166, Дубна.
5. M.V. Savina, S.V. Shmatov, N.V. Slavin, P.I. Zarubin, "Global characteristics of nucleus-nucleus collisions in ultrarelativistic domain", *Ядерная физика* **62** (1999) 2263 [hep-ph/0007130].
6. M.V. Savina, S.V. Shmatov, N.V. Slavin, P.I. Zarubin, "Global event characteristics in ultrarelativistic nuclear collisions", Proceedings of the International Workshop "Relativistic Nuclear Physics: From MeV to TeV", (June 26 – July 1, 2000, Slovak Republik, Stara Lesna), E1,2-2001-076, Дубна.

7. G. Baur, M. Bedjidian, S. Chatrchyan, ..., S. Shmatov, ..., "Heavy Ion Physics in CMS", CMS NOTE-2000/060, принята к опубликованию в *Eur. J. Phys.*
8. П.И. Зарубин, М.В. Савина, С.В. Шматов, "Влияние эффекта партонного экранирования на распределения глобальных переменных", *препринт ОИЯИ P2-2000-112*, *Ядерная физика* **64** (2001) 2124.
9. С.В. Шматов, "Начальные условия эволюции неравновесной кварк-глюонной плазмы", *препринт ОИЯИ P2-2002-180*, направлена в журнал *Ядерная физика*.
10. V.A. Krasnov, A.I. Malakhov, M.V. Savina, S.V. Shmatov, P.I. Zarubin, "Method of a fast selection of inelastic nucleus-nucleus collisions for the CMS Experiment", *JINR Rapid Communication* **87** (1998) 39.
11. J. Damgov, V. Genchev, V.A. Kolosov, ..., S.V. Shmatov, ..., "Heavy Ion Studies with CMS HF Calorimeter", CMS NOTE-2001/055, *Письма в журнал ЭЧАЯ* **4** [107] (2001) 93.
12. S. Shmatov, P. Zarubin, "Estimation of the Collision Impact Parameter", *JINR preprint E1-2001-64*, *J. Phys.* **G27** (2001) 93 [hep-ph/0008332].

---

Получено 25 сентября 2002 г.

Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 26.09.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,56. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 53530.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.