



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-98-291

На правах рукописи

Б - 288

БАТЫГИН
Юрий Константинович

**ДИНАМИКА ЯРКИХ ПУЧКОВ
В НЕЛИНЕЙНЫХ ПОЛЯХ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 1998

Работа выполнена в Институте физических и химических исследований (RIKEN), Япония

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

ЗЕНКЕВИЧ
Павел Романович

доктор физико-математических наук,
Институт теоретической
и экспериментальной физики, г. Москва

ПАРХОМЧУК
Василий Васильевич

доктор физико-математических наук,
профессор, член-корреспондент РАН,
ИЯФ им.Будкера СО РАН, г. Новосибирск

ПЕРЕЛЬШТЕЙН
Элкуно Аврумович

доктор физико-математических наук, профессор,
Объединенный институт
ядерных исследований, г.Дубна

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Институт физики высоких энергий, г. Протвино

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 1998 г. в « _____ »
часов на заседании Диссертационного совета Д-047.01.03 при Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.
Адрес: 141980, г.Дубна Московской обл., ул.Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « _____ » _____ 1998 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д-047.01.03
доктор физико-математических наук, профессор

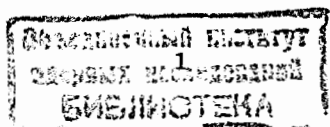
Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Достижение высокой яркости и высокой интенсивности пучка представляют значительный интерес для разработчиков многих ускорительных проектов, поскольку данные свойства пучка позволяют эффективнее использовать ускорители в целях изучения процессов, сопровождающих столкновение заряженных частиц, создания источников излучения, а также при транспортировке и фокусировке пучка на большие расстояния. Для современных и будущих ускорительных проектов наиболее важными, ключевыми параметрами являются яркость пучков и светимость коллайдеров. Обе характеристики определяют качество пучков и являются мерой их интенсивности. Яркие пучки позволяют фокусировать значительную энергию в малом объёме. Это делает яркие пучки привлекательным источником подвода энергии для управляемого термоядерного синтеза, создания интенсивных источников нейтронов, при разработке интенсивных ускорителей для трансмутации отходов ядерной промышленности и производства трития. По мере того, как повышаются требования к интенсивности пучка, возрастает важность коллективных эффектов пучка в ускорителях.

Рост интенсивности ускоренных пучков существенно отстаёт от роста энергии частиц, что является свидетельством того, что коллективные эффекты пучка, носящие, как правило, сильно нелинейный характер, ещё недостаточно изучены и не в полной мере контролируются разработчиками ускорителей. Эксперименты, в которых используются интенсивные заряженные пучки, демонстрируют выраженное нарастание эмиттанса пучка и образование ореола из-за нелинейных сил объёмного заряда. Подавление формирования ореола признано ключевой проблемой в физике ярких пучков.

Задача о сохранении начальной функции распределения интенсивного пучка связана с поиском равновесных состояний неоднородного пучка во внешнем поле. Аналитическое самосогласованное описание ярких пучков основано, как правило, на линейном приближении к собственным силам пространственного заряда пучка. В рамках уравнений Капчинского-Владимирского (КВ) удаётся строго решить задачу о согласовании фазового



объёма интенсивного однородного заряженного пучка с линейным фокусирующим каналом. Вместе с тем линейная модель не может описать рост эмиттанса пучка, образование ореола и не даёт ответа на вопрос, как согласовать с каналом пучок с существенно нелинейными кулоновскими силами без искажения фазового объёма. Это вызывает необходимость разработки нового подхода к аналитическому описанию динамики ярких пучков.

Другой ключевой проблемой в физике ускорителей является повышение светимости коллайдеров. Светимость современных коллайдеров в значительной мере ограничена эффектами встречи пучков (beam-beam effects), что также относится к классу явлений, связанных с объёмным зарядом пучка. Несмотря на длительное исследование данного явления, на сегодняшний день нет законченной теории неустойчивости сталкивающихся пучков. Фундаментальным механизмом ограничения устойчивости пучков является возникновение хаоса в динамической системе вследствие возбуждения и перекрытия нелинейных резонансов. Однако такой подход не описывает всей совокупности явлений, связанных с неустойчивостью в точке встречи пучков. В частности, до сих пор не было получено выражения для коэффициента диффузии неустойчивости, как функции параметров ускорителя.

Мощным средством изучения нелинейных эффектов пучков является численное моделирование. Компьютеры в силу своей дискретной природы удобны для моделирования сильно нелинейных процессов с большим числом переменных, что составляет основу проблемы взаимодействия многих частиц в самосогласованном поле. Современное математическое обеспечение расчёта пучков недостаточно снабжено стандартизованными алгоритмами и программами. Отсутствуют надёжные средства контроля за правильностью работы программ, низок уровень документированности разработок.

В условиях постоянного расширения и усложнения проблем, связанных с яркими интенсивными пучками, представляются актуальными разработка нового подхода для исследования динамических характеристик сильноточных ярких пучков и получение новых данных об одночастичных и коллективных нелинейных эффектах заряженных пучков в ускорителях.

Целью работы является

- создание модульной библиотеки программ для систематического исследования динамики пучков с преобладанием объёмного заряда пучка методом макрочастиц,
- разработка новой аналитической теории, описывающей равновесные состояния неоднородных ярких пучков в фокусирующих каналах и в ускоряющих ВЧ полях,
- проведение широкого круга расчётов по исследованию устойчивости равновесных состояний пучка с нелинейными кулоновскими силами, по предотвращению роста эмиттанса пучка и образованию ореола пучка в ускоряюще - фокусирующем канале,
- развитие теории неустойчивости сталкивающихся пучков, исследование деполяризации вследствие столкновения пучков, выработка предложений по подавлению данной неустойчивости и повышению светимости коллайдеров.

Научная новизна результатов работы

1. Впервые разработана модульная библиотека программ для расчёта динамики ярких пучков методом макрочастиц. Программа BEAMPATH предназначена для исследования динамики аксиально-симметричных, квадрупольно-симметричных и z- однородных пучков в каналах, содержащих ВЧ зазоры, RFQ секции, мультипольные линзы, соленоиды и поворотные магниты. Разработан датчик начальных распределений частиц в фазовом пространстве с различной степенью нелинейности. Модульный принцип организации математического обеспечения позволяет формировать значительное число версий структуры при относительно малом количестве исходных программных модулей.

2. Впервые найдены условия равновесия яркого неоднородного пучка в фокусирующем канале. Сохранение эмиттанса пучка, предотвращение формирования ореола пучка выведены из первых принципов как задача согласования яркого пучка с нелинейными кулоновскими силами с фокусирующим каналом. Показано, что для согласования пучка с каналом фокусирующее поле должно быть нелинейной функцией пространственных координат.

3. Впервые показана возможность адиабатического согласования первоначально неоднородного яркого пучка с фокусирующим каналом в отсутствие возникновения ореола пучка. Показано, что постепенное изменение нелинейного фокусирующего поля приводит к модификации начального неоднородного пучка в пучок, согласованный с линейным фокусирующим полем. Идеальное согласование возможно осуществить в плазменной линзе со специфическим распределением частиц с противоположным зарядом. Другим методом является использование знакопеременной квадрупольной фокусировки с мультипольными компонентами поля.

4. Впервые выведено самосогласованное распределение яркого пучка частиц в однородном канале с произвольным фокусирующим потенциалом. Последовательно выведены аппроксимационные формулы для самосогласованного потенциала пучка и пространственного распределения частиц, демонстрирующие эффект экранировки внешнего поля ярким пучком. Методом усреднения найдены выражения для эффективного потенциала знакопеременной структуры с мультипольными компонентами.

5. Впервые аналитическими и численными методами показана возможность транспортировки яркого пучка с произвольным реалистичным неоднородным пространственным распределением в квадрупольно-додекапольном канале при условии подавления роста эмиттанса и образования ореола пучка. Показано, что профиль пучка должен повторять эквипотенциали эффективного фокусирующего поля.

6. Впервые найдено приближенное трехмерное самосогласованное распределение яркого сгруппированного пучка частиц в ускоряющем ВЧ поле. Найдено аналитическое выражение для профиля ускоренных сгустков. Показано, что профиль пучка существенно отличается от широко используемой аппроксимации сгустка эллипсоидом или цилиндром с переменной плотностью. Показано, что равномерное распределение энергии в сгустке (equipartitioning) является следствием стационарности функции распределения пучка.

7. Впервые проведено аналитическое исследование каналов с нелинейной оптикой заряженных частиц для получения однородных полей

облучения. Получены аналитические соотношения, связывающие начальное и конечное распределение плотности пучка через параметры нелинейных оптических элементов. Найдено объяснение образования пиков распределения на границах зоны облучения. Предложен метод круговой развёртки пучка с целью однородного облучения больших мишеней.

8. Впервые проведены аналитические исследования нелинейных эффектов динамики интенсивного пучка в низкоэнергетичном канале транспортировки. Получены аналитические выражения для искажения эмиттанса пучка за счёт сферических аберраций аксиально-симметричных линз и собственных нелинейных сил объёмного заряда пучка. Найдено количественное объяснение образования полого профиля пучка в системе экстракции пучка.

9. Впервые детально исследована диффузионная неустойчивость пучка, возникающая при случайных флуктуациях в поперечных размерах сталкивающихся пучков. Показано, что динамическая система сталкивающихся пучков всегда неустойчива. Это дополняет общепринятое толкование неустойчивости как образования хаотического движения частиц вследствие перекрытия сепаратрис нелинейных резонансов. Получено выражение для коэффициента диффузии в расширении эмиттанса пучка, позволяющее объяснить экспериментально наблюдаемую сильную диффузию при столкновении пучков с существенно разными поперечными размерами.

10. Впервые исследован эффект столкновения пучков на деполяризацию спина в протон - протон коллайдере. Найдена матрица для вращения спина после произвольного числа оборотов частиц в кольце. Показано, что деполяризация спина вследствие столкновения пучков может быть подавлена, если пучки при столкновении стабильны, и рабочая точка находится достаточно далеко от спиновых резонансов. Тем не менее, при диффузионной неустойчивости сталкивающихся пучков спин частиц подвержен сильной деполяризации. Результаты исследований позволяют качественно объяснить экспериментальные результаты, наблюдаемые на коллайдере PETRA, где сильная деполяризация развивалась вследствие развала пучка из-за эффекта столкновений при том, что максимальная светимость достигалась при неизменной поляризации, если было обеспечено устойчивое состояние сталкивающихся пучков.

Практическая ценность работы

Разработанная в диссертации компьютерная программа BEAMPATH используется в RIKEN, KEK (Japan), University of Frankfurt (Germany) и Schonberg Research Corporation (USA). Аналитические и численные работы по согласованию пучка в канале нового инжектора RIKEN позволили увеличить интенсивность пучка в 2 - 2.5 раза. Исследование эффекта изготовления полюсов ускорителя на захват частиц в RIKEN RFQ позволило обеспечить высокое значение токопрохождения (90%), экспериментально наблюдаемое при работе ускорителя. Предложенный в диссертации (совместно с В.В.Кушиным и С.В. Плотниковым) новый метод сканирования протяженных мишеней методом круговой развертки пучка, защищенный патентом, получил дальнейшее развитие при разработке систем облучения в JAERI (Japan). Разработанный в диссертации аналитический аппарат нелинейного преобразования пучков в каналах с мультиполями высших порядков использован компанией Northrop Grumman (USA) в разработках каналов для равномерного облучения больших поверхностей. Исследования по неустойчивости сталкивающихся пучков и достижению максимальной светимости использованы в проекте Фабрики Радиоактивных Изотопов (RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory, Japan).

Апробация работы

Результаты диссертации опубликованы в 86 печатных работах, в том числе в журналах "Physical Review", "Nuclear Instrument and Methods", "Journal of Applied Physics". Результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989, 1992); 3rd European Particle Accelerator Conference, Berlin (Germany, 1992); Computational Accelerator Physics Conference, Los Alamos (USA, 1993); 1993 Particle Accelerator Conference, Washington D.C. (USA, 1993); 17th International Linac Conference, Tsukuba (Japan, 1994); 4th European Particle Accelerator Conference, London (UK, 1994); 4th International Conference on Charged Particle Optics, Tsukuba (Japan, 1994); International Workshop on Particle Dynamics in Accelerators: Emittance in Circular Accelerators, Tsukuba (Japan, 1994); 1995 Particle Accelerator Conference, Dallas (USA, 1995); 12th International Workshop on ECR Ion

Sources, RIKEN (Japan, 1995); 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka (Japan, 1995); International Workshop on Space Charge Dominated Beams and Applications of High Brightness Beams, Bloomington, Indiana (USA, 1995); 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Hitachinaka (Japan, 1995); 5th European Particle Accelerator Conference, Barcelona, (Spain, 1996); 14th International Conference on Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, Texas University (USA, 1996); XVI RCNP Osaka International Symposium on Multi-GeV High - Performance Accelerators and Related Technology, Osaka (Japan, 1997); Workshop on Beam Physics, Center for Advanced Science and Technology, Hyogo, (Japan, 1996); 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Harima Science Garden City, Hyogo, (Japan, 1997); Beam Physics Meeting, SPring-8, Himedji, (Japan, 1997); 2nd US-Japan Workshop on Heavy-Ion Fusion and Related Topics, Berkeley (USA, 1997); 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, B.C., (Canada, 1997); First Asian Particle Accelerator Conference, KEK, Tsukuba (Japan, 1998); Workshop on Space Charge Physics in High Intensity Hadron Rings, Shelter Island (USA, 1998).

Кроме того, результаты диссертации обсуждались на семинарах в RIKEN (Japan, 1994 - 1998), Kyoto University (Japan, 1995), Michigan State University (USA, 1995), Stanford Linear Accelerator Center (USA, 1995), Los Alamos National Laboratory (USA, 1996), Brookhaven National Laboratory (USA, 1997, 1998), Japan Atomic Energy Research Institute (1998), Fermi National Laboratory (USA, 1998).

Положения, выносимые на защиту

1. Развито модульное математическое обеспечение для моделирования динамики аксиально-симметричных, квадрупольно-симметричных и z-однородных пучков в каналах, содержащих ВЧ зазоры, RFQ секции, мультипольные линзы, соленоиды и поворотные магниты. Применение модульного принципа позволяет построить гибкую структуру, способную реализовать большое число программных версий при относительно малом числе исходных базовых модулей.

2. Найден новый класс самосогласованных решений для равновесия неоднородных ярких пучков с заданной функцией распределения в непрерывных фокусирующих каналах. Условия согласования для пучка с нелинейными силами пространственного заряда требуют включения в потен-

циал фокусирующих сил нелинейных членов более высокого порядка, чем квадратичные. Адиабатическое изменение нелинейного фокусирующего поля вдоль тракта транспортировки приводит к постепенной трансформации начально неоднородного пучка в распределение, согласованное с линейным фокусирующим каналом. Полученные решения обобщают известное ранее самосогласованное равновесие для пучка Капчинского-Владимирского на случай произвольного неоднородного пучка.

3. Найдено самосогласованное распределение яркого пучка в заданном произвольном непрерывном фокусирующем поле. Показано, что самосогласованный потенциал яркого пучка частиц всегда стремится к тому же распределению, что и внешний фокусирующий потенциал, с противоположным знаком, вне зависимости от фокусирующего поля. Найдено, что введение додекапольной компоненты поля в квадрупольную структуру совместно с модификацией границы пучка приводит к подавлению роста эмиттанса и предотвращению образования ореола пучка за счёт собственных нелинейных кулоновских сил.

4. Получено выражение для стационарного самосогласованного профиля сгруппированного пучка в ВЧ поле. Показано, что условие равномерного распределения энергии в сгустке по степеням свободы (equipartitioning) является следствием стационарности функции распределения. Численными расчётами показана возможность подавления роста эмиттанса и образования ореола пучка за счёт дефокусировки в ВЧ поле.

5. Развита теория нелинейного преобразования плотности пучка в канале с мультипольными линзами для создания однородных полей облучения протяжённых мишеней яркими пучками. Найдены оптимальные соотношения для выбора параметров линз и дано объяснение образованию пиков распределения пучка на мишени, наблюдаемому экспериментально. Решена задача о перераспределении плотности неоднородного пучка под действием собственных нелинейных кулоновских сил в пространстве дрейфа. Предложен новый метод однородного облучения мишени пучком частиц с круговой развёрткой ВЧ полем.

6. Показано, что система сталкивающихся пучков всегда неустойчива при наличии шума в поперечных размерах пучков, если приращение импуль-

са частицы при столкновении является нелинейной функцией координаты. Полученное выражение для коэффициента диффузии позволяет объяснить усиление диффузии при столкновении пучков с существенно разными размерами, наблюдаемое экспериментально в ионных коллайдерах.

7. Показано, что деполяризация спина вследствие столкновения пучков может быть подавлена, если пучки устойчивы при столкновениях, и рабочая точка кольца выбрана далеко от нелинейных спиновых резонансов. Диффузионная неустойчивость встречных пучков приводит к монотонной деполяризации пучков. Проведенные исследования позволяют качественно объяснить экспериментальные результаты в коллайдере PETRA, где сильная деполяризация наблюдалась при развале пучка за счёт неустойчивости при столкновении пучков. В то же время деполяризация пучков отсутствовала, если пучки при столкновении оставались устойчивыми.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, 9 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 347 страниц текста, включая 121 рисунок и 25 таблиц.

Во Введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи диссертации. Изложена новизна результатов, практическая ценность работы, даны положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание работы по главам.

В первой главе приведена численная модель динамики интенсивных заряженных пучков в ускорителях частиц, реализованная в виде программы BEAMPATH [1-5]. Для описания динамики потока используется метод макрочастиц. Интегрирование траекторий частиц осуществляется схемой с постоянным шагом по времени в криволинейных координатах. Начальное заполнение поперечного четырёхмерного фазового пространства реализовано в виде датчика случайных чисел для следующих распределений: КВ, "Водяной мешок", параболическое, Гауссово [8]. Моделирование продольного фазового объёма соответствует инъекции непрерывного в z - направлении пучка с конечным разбросом продольных импульсов.

Поле пространственного заряда пучка рассчитывается из решения уравнения Пуассона в сопутствующей системе координат, где движение частиц нерелятивистское. Используются три типа симметрии: однородный по z пучок (двумерная задача в x - y координатах), аксиально-симметричные сгустки (двумерная задача в r - z координатах), сгустки с квадрупольной симметрией (трёхмерная задача в x - y - z координатах) [2, 78].

На первом этапе определяют распределение пространственного заряда в области, занимаемой пучком методом "частица в ячейке". Затем рассчитывают поле пространственного заряда пучка из численного решения уравнения Пуассона на сетке. В декартовых двумерных и трёхмерных координатах используют метод Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) по каждой из координат. В цилиндрических двумерных координатах используют БПФ по продольной координате и метод прогонки по радиусу.

На заключительном этапе проводят дифференцирование сеточной функции потенциала и определяют компоненты электростатического поля. После этого осуществляют переход в лабораторную систему координат и определяют компоненты электрического и магнитного полей, создаваемых объёмным зарядом пучка.

Поля ускоряющих элементов (ВЧ зазоры, RFQ) описаны в виде рядов Фурье-Бесселя. Поля фокусирующих элементов (мультипольные линзы, соленоиды, поворотные магниты) вычисляют по разложению поля вблизи оси или интерполируют сплайнами по заданным значениям в узлах пространственной сетки.

При разработке программы ВЕАМРАТН использован метод структурно-модульного программирования, который позволяет моделировать значительное число объектов, используя относительно малое количество исходных базовых модулей. Структурно-модульный подход позволяет разрешить основное противоречие, возникающее при создании большой программы, между основными целями проекта и эффективностью модели в каждом специфическом случае [7].

Вторая глава связана с исследованием равновесных состояний неоднородного пучка с большим пространственным зарядом в сильном нелинейном фокусирующем поле (рис. 1, 2) [13, 14, 18, 37, 39, 57, 79, 80, 81]. Обеспечение равновесных состояний для пучка означает сохранение функ-

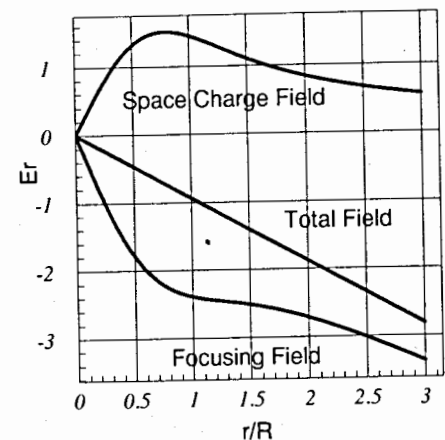


Рис. 1. Поле объёмного заряда (верхняя кривая), общее поле структуры (средняя кривая) и требуемое фокусирующее поле (нижняя кривая) для равновесного состояния пучка с Гауссовым распределением.

ции распределения частиц, т.е. транспортировку пучка без возрастания эмиттанса и образования ореола. Сформулированы две постановки самосогласованной задачи: (1) нахождение потенциала фокусирующих сил $U_{ext}(x, y)$ по заданной функции распределения $f(x, p_x, y, p_y)$, и (2) нахождение функции распределения пучка, согласованного с заданным фокусирующим каналом.

Общий метод нахождения согласованных условий для пучка с заданной произвольной функцией распределения, развитый в диссертации, состоит в том, что известную функцию распределения пучка $f(x, p_x, y, p_y)$ подставляют в уравнение Власова

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{m\gamma} \left(\frac{\partial f}{\partial x} p_x + \frac{\partial f}{\partial y} p_y \right) - q \left(\frac{\partial f}{\partial p_x} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial p_y} \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где γ — энергия частиц, q, m — заряд и масса частиц, и решают относительно неизвестного общего потенциала структуры $U = U_{ext} + U_b \gamma^{-2}$, который есть комбинация потенциала фокусирующего поля U_{ext} и потенциала пространственного заряда пучка U_b . Поскольку функция распределения

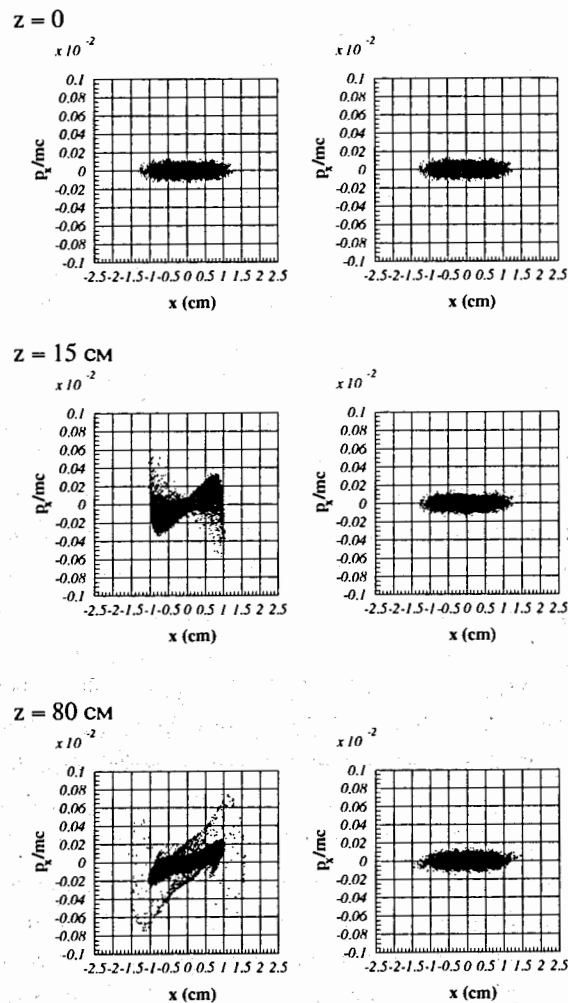


Рис. 2. Рост эмиттанса и образование ореола в фазовом пространстве яркого неоднородного протонного пучка с энергией 150 кэВ, током 0.5 А, начальным эмиттансом 0.07π см мрад и функцией распределения $f = f_0 \exp[-2(p_x^2 + p_y^2)/p_0^2 + (x^2 + y^2)^2/R_0^4]$ в линейном фокусирующем канале (слева) и сохранение функции распределения пучка в нелинейном фокусирующем поле (справа).

пучка задана, собственный потенциал пучка U_b есть также известная функция, полученная из решения уравнения Пуассона

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_b}{\partial r} \right) = -\frac{\rho(r)}{\epsilon_0}. \quad (2)$$

Тогда требуемый потенциал фокусирующей структуры, в котором поддерживается заданное распределение частиц, есть разность между общим потенциалом и потенциалом пространственного заряда пучка $U_{ext} = U - U_b \gamma^{-2}$. Решение данной проблемы зависит от конкретного распределения частиц.

Приведены самосогласованные решения для внешнего потенциала, поддерживающего пучок с различными распределениями в фазовом пространстве, обладающими эллиптической симметрией: Гауссовым, "Водяной мешок", параболическим. Показано, как меняются согласованные условия для пучка с распределением, не обладающим эллиптической симметрией.

Устойчивость распределений частиц в нелинейном фокусирующем поле определяется теоремой Ньюкомба, которая гласит, что бесстолкновительная плазма устойчива относительно всех видов возмущений, если функция распределения частиц есть спадающая функция Гамильтониана $df/dH \leq 0$. Большинство функций распределения реальных пучков (например, Гауссово) удовлетворяет данному условию устойчивости.

Дополнительной возможностью в обеспечении транспортировки пучка без возрастания эмиттанса является адиабатическое преобразование яркого неоднородного пучка [38]. Если фокусирующее поле обеспечивает согласование начально неоднородного пучка, и нелинейная компонента фокусирующего поля адиабатически уменьшается в продольном направлении, то эмиттанс пучка является интегралом движения. В этом случае неоднородный пучок постепенно трансформируется в более однородный пучок, оставаясь все время согласованным с каналом. Указанная возможность открывает путь к согласованию неоднородных пучков с линейными фокусирующими каналами.

Требуемое нелинейное фокусирующее поле может быть создано распределением противоположно заряженных частиц вдоль фокусирующей

установки (плазменная линза). Более реалистичный путь создания нелинейного потенциала заключается в использовании квадрупольного канала с мультипольными компонентами высшего порядка, что обсуждается в следующей главе.

Третья глава посвящена нахождению стационарного самосогласованного распределения плотности частиц в заданном фокусирующем поле [55, 60, 76]. Эта формулировка является обратной по отношению к задаче, рассмотренной во второй главе, где был найден потенциал фокусирующего поля, поддерживающего пучок с заданной функцией распределения.

Выведен самосогласованный потенциал яркого пучка $V_b(x, y)$ в заданном произвольном фокусирующем поле $V_{ext}(x, y)$:

$$V_b = \gamma^2(1+\delta - V_{ext}) - \gamma^2 \sqrt{(1+\delta - V_{ext})^2 - V_{ext}(V_{ext} - 2)}, \quad (3)$$

где $V_b(x, y) = q U_b(x, y)/H_0$, $V_{ext}(x, y) = q U_{ext}(x, y)/H_0$, $H_0 = m c^2(\epsilon/R)^2/(4\gamma)$, ϵ - нормализованный эмиттанс пучка, R - радиус пучка и $\delta \ll 1$ - малый параметр, обратно пропорциональный яркости пучка. Показано, что согласованный пучок всегда стремится к компенсации внешнего поля, что является проявлением экранировки Дебая для заряженной плазмы.

Предложена четырёхпроводная квадрупольная структура с додекапольной компонентой для подавления возрастания эмиттанса и образования ореола неоднородного пучка в канале [38, 45, 47, 55]. Показано, что применение более низкой по порядку нелинейности октупольной компоненты недостаточно для создания согласованных условий транспортировки пучка [59]. Продемонстрировано, что адиабатическое изменение нелинейного фокусирующего поля вдоль канала приводит к постепенной трансформации вначале неоднородного пучка в распределение, согласованное с линейным фокусирующим каналом [54]. Данный анализ обеспечивает условия для транспортировки неоднородного яркого пучка без серьёзного возрастания эмиттанса и образования ореола.

Четвёртая глава диссертации посвящена проблеме самосогласованного равновесия яркого сгруппированного пучка в ускоряющем ВЧ поле [58, 77]. Разработанный в третьей главе аппарат нахождения самосогласованного распределения пучка в непрерывном фоку-

сирующем канале обобщён на случай трёхмерного распределения сгруппированных сгустков в ускоряющем ВЧ поле. Самосогласованная постановка задачи для движущегося распределения заряда включает совместное решение уравнения Власова для функции распределения частиц в шестимерном фазовом пространстве и уравнения для скалярного потенциала пучка.

Показано, что равномерное распределение частиц по степеням свободы в сгустке (equipartitioning)

$$\frac{\epsilon_t}{R} = \frac{\epsilon_l}{\gamma l}, \quad (4)$$

где ϵ_t , ϵ_l - поперечный и продольный среднеквадратические эмиттансы пучка, l - полуразмер сгустка в продольном направлении, является следствием стационарности функции распределения пучка. Показано, что для ярких пучков плотность пространственного заряда близка к постоянной величине внутри сгустка. Найдено, что приближение к профилю пучка описывается нелинейным уравнением:

$$F(R, \zeta) = I_0 \left(\frac{k_z R}{\gamma} \right) \sin(\phi_s - k_z \zeta) + \sin \phi_s - (2\phi_s - k_z \zeta) \cos \phi_s + C_1 (k_z R)^2 = 0, \quad (5)$$

где $I_0(x)$ - функция Бесселя, $\zeta = z - z_s$ продольное отклонение от синхронной частицы, ϕ_s - синхронная фаза, $k_z = \omega / v_s$ - волновое число, C_1 - константа, зависящая от внешних и собственных кулоновских полей.

Проведено численное моделирование формирования и ускорения интенсивных пучков в линейном резонансном ускорителе с фокусировкой соленоидом в условиях предотвращения роста эмиттанса и образования ореола за счёт ВЧ дефокусировки [11, 39]. Из результатов расчётов следует, что рост эмиттанса происходит преимущественно на этапе группирования частиц, где амплитуда фазовых колебаний велика. На этом этапе велика дисперсия частот поперечных колебаний вследствие зависимости частоты от ВЧ фазы. Когда пучок сгруппирован, рост эмиттанса насыщается. Для значений магнитного поля, близких к нижнему пределу поперечной устойчивости $\omega_l/\Omega = 1.25$, где ω_l - Ларморова частота и Ω - частота продольных колебаний, наблюдается сильный рост эмиттанса (до 100%). С увеличением магнитного поля до $\omega_l/\Omega = 2.5$ рост эмиттанса за счёт ВЧ дефокусировки существенно сокращается и может быть практически подавлен.

Пятая глава посвящена изучению новых методов однородного облучения протяжённых поверхностей яркими пучками. Это является важным приложением ускоренных ярких пучков в проектах по созданию ускорителей для трансмутации отходов ядерной промышленности, интенсивных источников нейтронов, производства трития. Во многих системах однородность облучения должна составлять $\pm 5...10\%$.

Распределение пучка в выходной части ускорителя обычно характеризуется высокой концентрацией частиц в ядре и размытым ореолом на периферии. В настоящее время экспериментально и теоретически исследуется новый метод создания больших однородных зон облучения путём преобразования плотности пучка в канале транспортировки, содержащем мультиполи высокого порядка (октуполи, додекаполи). Для выравнивания плотности пучка используют нелинейную модуляцию поперечных скоростей частиц с тем, чтобы в процессе дрейфа пучка периферийные частицы стягивались к его ядру.

В данной главе развита теория канала с нелинейной оптикой заряженных частиц для равномерного облучения больших поверхностей [6, 9, 10, 12]. Получены соотношения, связывающие начальное и конечное распределение частиц в канале через параметры мультипольных линз. Выведенные соотношения позволяют объяснить образование пиков на границах распределения пучка на мишени, наблюдаемых экспериментально, а также выбрать параметры линз в зависимости от поставленных условий облучения мишени. Определена устойчивость выравнивания плотности частиц по отношению к изменению параметров системы. Исследован эффект поперечного эмиттанса пучка на выравнивание плотности частиц [12]. Решена самосогласованная задача о перераспределении плотности Гауссового пучка в пространстве дрейфа под влиянием нелинейных сил объёмного заряда [30].

Предложен (совместно с В.В.Кушиным и С.В.Плотниковым) новый метод однородного облучения мишеней методом круговой развёртки пучка ВЧ полем, защищённый патентом [23]. В предложенном методе траектория пучка на мишени представляет собой раскручивающуюся спираль (при облучении непрерывным пучком) или совокупность концентрических колец (при облучении сгруппированным пучком) [15, 22].

В шестой главе описаны работы по улучшению параметров инжектора тяжёлых ионов в ускорительном комплексе Института Физических и Химических Исследований (RIKEN, Япония). Существующий комплекс включает линейный ускоритель тяжёлых ионов на энергию 0.7 - 4 МэВ/нуклон, за которым следует кольцевой циклотрон на энергию 150-200 МэВ/нуклон. С 1996 г. в RIKEN развивается новый проект Фабрики Радиоактивных Изотопов (RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory) [34, 35, 36, 49, 71].

Качество пучка в интенсивном тяжело-ионном ускорителе во многом определяется системой инжекции. В 1994-1996 годах в RIKEN были проведены работы по замене инжектора для увеличения интенсивности пучка [32, 33, 53]. Современный инжектор включает 18 Гц ЭЦР источник ионов, линию транспортировки и ускоритель RFQ. После запуска нового инжектора в 1996 г. возникла необходимость дальнейшего увеличения интенсивности ускоренных пучков. Проведение аналитических исследований и расчётов динамики пучка в системе транспортировки и ускорителя RFQ по программе BEAMPATH выявило необходимость проводки пучка при более высоком значении вытягивающего напряжения из источника ионов. Увеличение величины вытягивающего напряжения с 10 кВ до 20 кВ и, соответственно, замена ускоряющей структуры RFQ в 1997 г. позволили поднять интенсивность пучка в инжекторной части в 2-2.5 раза [73]. Повысилось также значение эффективности проводки пучка через весь тракт линейного тяжелоионного ускорителя с 50% до 70%.

Исследовано пространственное распределение частиц в источнике ионов на электроно-циклотронном резонансе, определена доля извлекаемых частиц из ЭЦР плазмы и параметры вытягиваемого пучка [75]. Приведены аналитические соотношения для согласования пучка с каналом в режиме транспортировки пучка с преобладанием объёмного заряда [44]. Найдено количественное объяснение образования трубчатого профиля пучка в низкоэнергетической области транспортировки пучка [16, 24, 26]. Детально исследован эффект аббераций аксиально-симметричных линз на искажение формы эмиттанса пучка [25, 46] и внесены рекомендации по уменьшению эффекта абберации линз. Определён критерий влияния собственных нелинейных сил объёмного заряда на искажение эмиттанса пучка в системе

транспортировки [46]. Детально исследован эффект влияния формы электродов четырёхпроводной линии на токопрохождение частиц в ускорителе RFQ в RIKEN [17, 27, 28, 29, 48]. Использование результатов исследования диссертации позволило обеспечить устойчивое высокое значение эффективности токопрохождения частиц в ускорителе (90%), экспериментально наблюдаемое при работе ускорителя [31, 50, 51, 52, 72].

Седьмая глава посвящена расчётам светимости коллайдера [86]. В новом проекте Фабрики Радиоактивных Изотопов RIKEN предусматривается создание серии колец для последовательного накопления, охлаждения, ускорения и столкновения пучков изотопов при энергии 1...3 ГэВ/нуклон. Предполагается проводить исследования на встречных электрон - ионных пучках [21, 43], а также сливающихся ион - ионных столкновениях [42]. Вследствие короткого времени жизни радиоактивных изотопов, достижение высоких значений светимости является главной целью проекта.

Получено уточнённое выражение для светимости сгруппированных пучков, сталкивающихся под углом 2φ [86]:

$$L = \frac{N_b f_0 N_1 N_2 \sqrt{1 - \beta^2 \sin^2 \varphi}}{2\pi \sqrt{\sigma_{y1}^2 + \sigma_{y2}^2} \sqrt{2\sigma_z^2 \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi (\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2)}} \quad (6)$$

Для планируемых параметров коллайдера $f_0 = 1$ МГц, $N_1 = N_2 = 2 \cdot 10^{10}$, $N_b = 50$, $\sigma_{y1} = \sigma_{y2} = \sigma_{x1} = \sigma_{x2} = 0.4$ мм светимость есть $L = 10^{30}$ сек⁻¹ см⁻².

Исследован новый тип столкновения сливающихся пучков [20, 42], который предполагается использовать для экспериментов по синтезу тяжёлых ядер, где энергия столкновения должна быть достаточно малой. В сливающихся столкновениях два попутно движущихся пучка пересекают друг друга под малым углом. Слияние двух пучков приводит к низкой энергии столкновений чуть выше кулоновского барьера, что трудно получить другими экспериментальными методами. Расчёт светимости приводит к выражению [86]

$$L = \frac{N_b f_0 N_1 N_2}{2\sqrt{2}\pi \sqrt{\sigma_{y1}^2 + \sigma_{y2}^2} \sigma_z \cos \varphi} \sqrt{\frac{1 - \beta^2 \cos^2 \varphi}{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \left(\frac{\sigma_{x1}^2 + \sigma_{x2}^2}{\sigma_z^2} \right)}}, \quad \varphi \neq 0, \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Для типичных значений параметров планируемого коллайдера RIKEN, $N_1 = N_2 = 2 \cdot 10^{10}$, $N_b = 50$, $\sigma_{y1} = \sigma_{y2} = 0.4$ мм, $\sigma_z = 100$ мм, $\varphi = 10^\circ$, максимальное значение светимости сливающихся пучков есть $L_{\max} = 2.4 \cdot 10^{27}$ сек⁻¹ см⁻². Отношение светимостей (6), (7) есть величина порядка $\sigma_x / (2\sigma_z) \approx 10^{-3}$. Это означает, что в сливающихся столкновениях достижимая величина светимости на несколько порядков меньше, чем для встречных столкновений, поскольку сливающиеся пучки почти параллельны друг другу.

В восьмой главе рассматривается диффузионная неустойчивость сталкивающихся пучков [19, 40, 41, 62, 63, 67, 82]. Светимость в циклическом коллайдере ограничена преимущественно эффектами взаимодействия пучков в месте встречи. Важной количественной характеристикой данного явления служит величина сдвига частоты бетатронных колебаний частиц из-за столкновений пучков, линейная часть которого не превышает малых значений $\xi = 0.005$ в ион-ионных и $\xi = 0.05$ в электрон-позитронных коллайдерах. Фундаментальное ограничение интенсивности сталкивающихся пучков связано с возникновением хаоса в динамической системе вследствие возбуждения и перекрытия нелинейных резонансов. Другим механизмом образования неустойчивости является диффузия, создаваемая случайными флуктуациями в распределении сталкивающихся пучков. Измерения, проведённые на коллайдере LEP в ЦЕРН свидетельствуют о том, что распределение плотности пучка в фиксированной точке коллайдера меняется от оборота к обороту. В данной главе детально исследуется эволюция эмиттанса пучка при наличии шума в поперечном размере встречного пучка $\sigma_n = \sigma_0 (1 \pm u \cdot u_n / 2)$, где σ_0 - номинальное значение среднеквадратического размера встречного пучка, u - амплитуда шума, u_n - однородная случайная функция с единичной амплитудой и n - номер оборота. Это лишь один из возможных источников шума и выбран для демонстрации отличия возникающей при этом неустойчивости от хаотического движения частиц из-за перекрытия резонансов.

В результате расчётов показано, что при наличии шума сталкивающиеся пучки всегда подвержены диффузионной неустойчивости, если приращение импульса частицы при столкновении является нелинейной функцией координаты. Рост эмиттанса пучка ϵ_n как функция номера оборота

описывается формулой $\epsilon_n / \epsilon_0 = \sqrt{1 + Dn}$. Получено выражение для коэффициента диффузии D в расширении эмиттанса пучка [62, 82]:

$$D = \pi^2 (\xi u)^2 \left(\frac{a}{2\sigma_0}\right)^4, \quad (8)$$

где a есть размер исследуемого пучка, и $2\sigma_0$ - размер встречного пучка. Из формулы (8) следует, что неустойчивость при нелинейном периодическом случайном воздействии на поперечный импульс пучка проявляется при любых значениях параметра взаимодействия пучков ξ и амплитуды шума u , т.е. система сталкивающихся пучков всегда неустойчива. Дополнительным фактором является сильная зависимость коэффициента диффузии от отношения размеров пучков ($a/2\sigma_0$). Как следует из (8), при сильном различии поперечных размеров пучков ($a/2\sigma_0 > 1$) диффузия идет гораздо быстрее, что является хорошо известным экспериментальным фактом. Рассмотрена возможность подавления диффузионной неустойчивости применением охлаждения пучков [83].

Девятая глава посвящена исследованию деполяризации спина в коллайдере с поляризованными пучками [61, 64, 65, 66, 68, 84, 85]. Эта проблема является важным аспектом в разработке коллайдера RHIC (Брукхейвен, США) [74]. В течение ускорения спин подвержен различным резонансам, приводящим к деполяризации. Дополнительным источником деполяризации является столкновение пучков, что ещё не исследовалось детально.

Разработан аналитический аппарат исследования процесса деполяризации спина в коллайдере. Бетатронные колебания частиц описаны как линейный осциллятор, возмущаемый нелинейным приращением импульса частицы при столкновении пучков. Вращение спина описано как последовательное произведение матриц в дипольных магнитах, в Сибирских Змейках и в точке столкновения пучков. В линейном приближении получена матрица вращения спина в коллайдере после произвольного числа оборотов. Из полученной матрицы следует аналитическое выражение для значений средних и среднеквадратических компонент спина после произвольно большого числа оборотов. Это выражение показывает, что деполяризации

спина можно избежать, если рабочая точка кольца удалена от спиновых резонансов, и сталкивающиеся пучки устойчивы в фазовом пространстве. Исследование также обнаруживает сильную деполяризацию частиц, если сталкивающиеся пучки подвержены диффузионной неустойчивости [85].

Этот вывод находится в качественном соответствии с экспериментальными результатами, полученными на электрон-позитронном коллайдере PETRA. В этих экспериментах деполяризация спина отсутствовала, если движение частиц встречных пучков было устойчиво. Напротив, значительная деполяризация наблюдалась экспериментально, если встречные пучки были неустойчивыми. Деполяризация пучка коррелировалась с развалом пучка вследствие электрон-позитронных столкновений.

В заключении суммируются **основные результаты и выводы работы**.

1. Создан новый аппарат исследования ярких пучков заряженных частиц в каналах транспортировки и ускорения. Разработано модульное математическое обеспечение для расчёта динамики интенсивных пучков в ускорителях методом макрочастиц. Программа предназначена для исследования динамики аксиально-симметричных, квадрупольно-симметричных и однородных в продольном направлении пучков в каналах, содержащих ВЧ зазоры, RFQ секции, мультипольные линзы, соленоиды и поворотные магниты.

2. Найден условия равновесия неоднородных ярких пучков в каналах транспортировки. Сохранение эмиттанса и предотвращение формирования ореола пучка выведено из первых принципов (уравнение Власова для функции распределения пучка и уравнение Пуассона для электростатического потенциала пучка) как проблема согласования пучка с непрерывным фокусирующим каналом.

3. Показано, что устойчивость исследованных равновесных состояний следует из теоремы Ньюкомба для пучков с функцией распределения, спадающей от Гамильтониана.

4. Решена задача о самосогласованном распределении яркого пучка в канале с произвольным фокусирующим потенциалом. Проанализирована четырёхпроводная квадрупольная структура с мультипольной компонентой

поля 6-го порядка (додекапольной компонентой) для предотвращения возрастания эмиттанса заряженного пучка.

5. Выведено аналитическое приближённое решение для самосогласованного равновесного распределения сгруппированного пучка в ВЧ поле. Найдено, что равномерное распределение энергии пучка между степенями свободы является следствием стационарности функции распределения. Получено аналитическое выражение для равновесного профиля пучка в ВЧ поле. Показано, что вариация градиента фокусирующих сил по отношению к градиенту ускоряющих сил позволяет контролировать рост эмиттанса и образование ореола за счёт дефокусировки пучка в ВЧ поле.

6. Развита теория преобразования плотности пучка в канале с нелинейной оптикой заряженных частиц для получения однородных полей облучения. Решена самосогласованная задача о перераспределении плотности пучка под действием собственных нелинейных сил объёмного заряда в пространстве дрейфа. Предложен новый метод однородного облучения мишени пучком частиц с круговой развёрткой ВЧ полем.

8. Проведён цикл расчётных работ по повышению интенсивности действующего инжектора тяжёлых ионов в ускорительном комплексе RIKEN. В результате удалось поднять интенсивность пучка в инжекторной части в 2 - 2.5 раза при одновременном улучшении эффективности проводки пучка через инжектор и линейный ускоритель вплоть до инжекции в кольцевой циклотрон. Обеспечено высокое устойчивое значение коэффициента захвата частиц в режим ускорения (90%) в структуре с RFQ.

9. Исследован новый аспект диффузионной неустойчивости, возникающей в сталкивающихся пучках. Показано, что в условиях шума система сталкивающихся пучков всегда неустойчива. Полученное выражение для коэффициента диффузии как функции параметров ускорителя позволяет объяснить возрастание диффузии при столкновении пучков с существенно разными размерами, наблюдаемое экспериментально на всех действующих ионных коллайдерах.

10. Исследована деполяризация спина из-за столкновения встречных пучков в протон-протонном коллайдере. Найдено, что деполяризация спина вследствие столкновения пучков может быть предотвращена, если сталкивающиеся пучки устойчивы, и спиновые резонансы не возбуждаются.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ю.К.Батыгин, Исследование характеристик электронного пучка на трехмерной модели макрочастиц, Ускорители, Вып. 20, М.: Энергоатомиздат, 1981, с.с. 52-55.
2. Ю.К.Батыгин, Моделирование трехмерной динамики релятивистского потока с учетом сил объёмного заряда и излучения, Моделирование физических процессов, М.: Энергоатомиздат, 1982, с.с. 7-11.
3. Ю.К.Батыгин, Модульный подход к разработке математического обеспечения для расчета динамики интенсивных пучков, Труды 11 Всесоюзного Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989, Том 1, с.с. 484-485.
4. Ю.К.Батыгин, Разработка вычислительных программ для решения физических задач, М.: МИФИ, 1989, 24 с.
5. Y.K.Batygin, BEAMPATH: A Program Library for Beam Dynamics Simulation in Linear Accelerators, Proceedings of the 3rd European Particle Accelerator Conference (EPAC92), Berlin, 1992, p.p. 822-824.
6. Y.K.Batygin, Beam Intensity Redistribution in a Nonlinear Optics Channel, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B79, 1993, p.p. 770-772.
7. Y.K.Batygin, A Structured-Modular Approach to Software Design for High Current Beam Dynamics Simulation, Computational Accelerator Physics, AIP Conference Proceedings 297, Los Alamos, 1993, p.p. 196-202.
8. Y.K.Batygin, Particle Distribution Generator in 4D Phase Space, Computational Accelerator Physics, AIP Conference Proceedings 297, Los Alamos, 1993, p.p. 419 - 426.
9. Ю.К.Батыгин, Канал с нелинейной оптикой заряженных частиц для равномерного облучения больших поверхностей, М.: Препринт МИФИ, 1993, 24с.
10. Y.K.Batygin, Multipole Channel Parameters for Equalization of Beam Intensity Distribution, Proceedings of the 1993 Particle Accelerator Conference, Washington, Vol. 1, 1993, p.p. 50-52.

11. Y.K.Batygin, On Emittance Growth in High Intensity RF Linac with Solenoid Focusing, Proc. 10th International Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS 94), San Diego, ed. by William Rix and Roger White, Vol. II, 1994, p.p. 544-547.
12. Y.K.Batygin, Density Uniforming of Large Momentum Spread Beam, Proceedings of the 17th International Linac Conference (LINAC 94), Ed. K.Takara, Y.Yamazaki and K.Nakahara, Vol. 1, Tsukuba, Japan, 1994, p.p. 490-492.
13. Y.K.Batygin, Nonlinear Potential Distribution for High Current Beam Transport without Emittance Growth, Proceedings of the 17th International Linac Conference (LINAC 94), Ed. K.Takara, Y.Yamazaki and K.Nakahara, Vol. 1, Tsukuba, Japan, 1994, p.p. 487-489.
14. Y.Batygin, Conservation of High Current Beam Emittance in Nonlinear Focusing Field, Proceedings of the International Workshop on Particle Dynamics in Accelerators: Emittance in Circular Accelerators, Ed. by S.Machida and K.Hirata, Tsukuba, Japan, KEK Proceedings 95-7, 1994, p.p. 88-96.
15. Y.K.Batygin, V.V.Kushin and S.V.Plotnikov, Circular Beam Scanning of Large Targets, Proceedings of the 4th European Particle Accelerator Conference (EPAC94), London, 1994, p.p. 2435-2437.
16. Y.Batygin, A.Goto, Y.Yano, Hollow Beam Formation in the Extraction Region of ECRIS, RIKEN Accelerator Progress Report, Vol. 28, 1994, p.p. 170-171.
17. Y.Batygin, A.Goto, O.Kamigaito, Y.Yano, Beam Dynamics Study in Variable Frequency RFQ Linac for RILAC, RIKEN Accelerator Progress Report, Vol. 28, 1994, p.p. 172-173.
18. Y.Batygin, Invariability of Intense Beam Emittance in Nonlinear Focusing Channel, Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference (PAC95), Dallas, TX, 1995, p. 3251.
19. Y.Batygin and T.Katayama, Study of Incoherent Beam-Beam Effects at Radioactive Isotope Beam Factory, Proceedings of the 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Hitachinaka, Japan, 1995, p.p. 356-358.
20. Y.Batygin and T.Katayama, Merging Beam-Beam Interaction at DSR, RIKEN Accelerator Progress Report 1995, Vol. 29, p.p. 252-253.
21. Y.Batygin and T.Katayama, Beam-Beam Interaction of Electrons and Ions at Double Storage Ring, RIKEN Accelerator Progress Report 1995, Vol. 29, p.p. 254-255.

22. Y.K.Batygin, V.V.Kushin and S.V.Plotnikov, Uniform Target Irradiation by Circular Beam Sweeping, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 363, 1995, p.p. 128-130.
23. Ю.К.Батыгин, В.В.Кушин, С.В.Плотников, Способ импульсного облучения протяженных мишеней, ВНИИГПЭ, Патент, заявка N 94037126/25/036310, приоритет от 28.09.94, положительное решение от 25.09.1995.
24. Y.Batygin, A.Goto, Y.Yano, Hollow Beam Profile in the Extraction System of ECR Ion Source, Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference (PAC95), Dallas, TX, 1995, p. 1001.
25. Y.Batygin, A.Goto, Y.Yano, Nonlinear Effect of Einzel Lens to the Beam Extracted From ECR Ion Source, Proceedings of the 12th International Workshop on ECR Ion Sources, ed. by M.Sekiguchi and T.Nakagawa, RIKEN, Japan, INS-J-182, 1995, p.317.
26. Y.Batygin, A.Goto and Y.Yano, Hollow Beam Formation in the Extraction Region of ECRIS, Proceedings of 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Hitachinaka, Japan, 1995, p.p. 353-355.
27. Y.Batygin, A.Goto, O.Kamigaito, Y.Yano, Effect of Field Variation on Beam Parameters in RIKEN RFQ Linac, Proceedings of 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Hitachinaka, Japan, 1995, p.p. 359-361.
28. Y.Batygin, A.Goto, O.Kamigaito, Y.Yano, Beam Dynamics Study in RIKEN RFQ Linac, Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Japan, September 6 - 8, 1995, p.p. 338-340.
29. Y.Batygin, A.Goto, O.Kamigaito and Y.Yano, Misalignment Effect of Vanes on Beam Transmission Efficiency in an RFQ Linac, RIKEN Accelerator Progress Report 1995. Vol. 29, p.223-224.
30. D.L.Bruhwiller and Y.K.Batygin, Beam Transport for Uniform Irradiation: Nonlinear space charge forces and the effect of boundary conditions, Proceedings of the PAC95, Dallas, 1995, p. 3254.
31. O.Kamigaito, A.Goto, Y.Miyazawa, T.Chiba, M.Hemmi, S.Kohara, M.Kase, Y.Batygin, Y.Yano, Development of a Variable-Frequency RFQ Linac for the RILAC, Proceedings of the 20th Linear Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Japan, 1995. p.p. 82-84.

32. A.Goto, Y.Miyazawa, M.Hemmi, O.Kamigaito, T.Nakagawa, M. Kase, T.Chiba, N.Inabe, S.Kohara, T.Kageyama, Y.Batygin, E.Ikezawa and Y.Yano, Construction of a New Pre-Injector System for the RILAC, Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town, 8-13 October, Editor John C. Cornell, World Scientific (Singapore - New Jersey-London-Hong Kong), 1995, p.p. 202-205.
33. A.Goto, Y.Miyazawa, M. Hemmi, O.Kamigaito, T.Nakagawa, M.Kase, T.Chiba, N.Inabe, S.Kohara, T.Kageyama, S.Numata, Y.Batygin, E.Ikezawa, Y.Yano, Status of the New Injector System for RILAC, RIKEN Accelerator Progress Report 1995, Vol. 29, p. 219.
34. Y.Yano, A.Goto, Y.Miyazawa, M.Hemmi, T.Chiba, T.Kageyama, K.Ikegami, M.Takanaka, T.Kawaguchi, S.Kohara, M.Kase, T.Tominaka, Y.Batygin, T.Kubo, T.Nakagawa, Y.Tanaka, E.Ikezawa, M.Wakasugi, T.Mitsumoto, N.Inabe, O.Kamigaito, H.Okuno, S.Fujishima, A.Ohtomo, T.Ohkawa, T.Katayama, S.Watanabe, M.Tomizawa, RIKEN RI Beam Factory Project, Proceedings of the 14th International Conference on Cyclotrons and Their Applications, Cape Town, 8-13 October, Editor John C. Cornell, World Scientific (Singapore - New Jersey-London-Hong Kong), 1995, p.p. 590-597.
35. T.Katayama, Y.Batygin, N.Inabe, K.Ohtomo, T.Ookawa, M.Takanaka, M.Wakasugi, S.Watanabe, Y.Yano, K.Yoshida, J.Xia, Y.Rao, Y.Yuan, Double Storage Rings for MUSES, RIKEN Accelerator Progress Report 1995, Vol. 29, p.p. 238-239.
36. T.Katayama, Y.Batygin, N.Inabe, K.Ohtomo, T.Ookawa, M.Takanaka, M.Wakasugi, S.Watanabe, Y.Yano, K.Yoshida, J.Xia, Y.Rao, Y.Yuan, Accumulator Cooler Ring and Booster Synchrotron Ring for MUSES, RIKEN Accelerator Progress Report 1995, Vol. 29, p. 240.
37. Y.Batygin, Conservation of Space-Charge-Dominated Beam Emittance in a Strong Nonlinear Focusing Field, Physical Review E, Vol. 53, 1996, p.p. 5358-5365.
38. Y.Batygin, Adiabatic Matching of Nonuniform Intense Charged - Particle Beam into the Focusing Channel, Physical Review E, Vol. 54, 1996, p.p. 5673-5680.
39. Y. Batygin, On Space Charge Dominated Beam Transport without Emittance Growth, In Space Charge Dominated Beams and Applications of High Brightness Beams, AIP Conference Proceedings 377, Editor S.Y.Lee, Woodbury, New York, 1996, p.p. 290-306.
40. Y.Batygin and T.Katayama, Beam-Beam Instability due to Noise in Opposing Beam Size, RIKEN Accelerator Progress Report 1996, Vol. 30, ISSN 0289-842X, 1996, p.p. 225-226.
41. Y.Batygin and T.Katayama, Hamiltonian Treatment of Nonlinear Beam-Beam Resonances, RIKEN Accelerator Progress Report 1996, Vol. 30, ISSN 0289-842X, 1996, p.p. 223-224.
42. Y.Batygin and T.Katayama, Merging Beam-Beam Collisions at RIKEN RI Beam Factory, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 1173-1175.
43. Y.Batygin and T.Katayama, Beam-Beam Interaction of Electrons and Ions at RIKEN RI Beam Factory, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 1170-1172.
44. Y.Batygin, A.Goto and Y.Yano, Maximum Beam Current in a Low-Energy Transport Line, RIKEN Accelerator Progress Report 1996, Vol. 30, ISSN 0289-842X, 1996, p.p. 193-194.
45. Y.Batygin, A.Goto and Y.Yano, Nonlinear Matcher for Prevention of Emittance Growth in Space Charge Dominated Beams, Proceedings of the 14th International Conference on Application of Accelerators in Research and Industry, Denton, Texas University, November 6-9, 1996, Editors J.L.Duggan and I.L.Morgan, AIP Conference Proceedings 392, Woodbury, New York, p.p. 1223-1226.
46. Y.Batygin A.Goto and Y.Yano, Nonlinear Beam Dynamics Effects in Heavy Ion Transport Line, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 2497-2499.

47. Y.Batygin A.Goto and Y.Yano, Suppression of Space Charge Induced Beam Emittance Growth in Transport Line, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 1236-1238.
48. Y.Batygin A.Goto, O.Kamigaito and Y.Yano, Beam Transmission Efficiency Study at RIKEN RFQ Linac, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 831-833.
49. T.Katayama, Y.Batygin, N.Inabe, K.Ohtomo, T.Ohkawa, M.Takanaka, M.Wakasugi, S.Watanabe, Y.Yano, K.Yoshida, J.Xia, Y.Rao, Y.Yuan, MUSES Project at RI Beam Factory, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 563-565.
50. O.Kamigaito, A.Goto, Y.Miyazawa, T.Chiba, M.Hemmi, S.Kohara, M.Kase, Y.Batygin, Y.Yano, Development of Variable-Frequency RFQ Linac for the RILAC, Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference (EPAC96), Barcelona, Spain, Ed. by S.Myers, A.Pacheco, R.Pascual. Ch. Petit-Lean-Genaz, J.Poole, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996, p.p. 786-788.
51. O.Kamigaito, A.Goto, Y.Miyazawa, T.Chiba, M.Hemmi, M.Kase, S.Kohara, Y.Batygin and Y.Yano, Performance Test of a Variable-Frequency RFQ Linac for RILAC, RIKEN Accelerator Progress Report 1996, Vol. 30, ISSN 0289-842X, 1996, p.p. 189-190.
52. O.Kamigaito, A.Goto, Y.Miyazawa, T.Chiba, M.Hemmi, M.Kase, S.Kohara, Y.Batygin and Y.Yano, Development of a Folded-Coaxial RFQ Linac for the RILAC, Proceedings of the XVIII International Linear Accelerator Conference (LINAC96), Editors C.Hill and M.Vretenar, Geneva, Switzerland, CERN, 1996, p.p. 863-865.

53. A.Goto, Y.Miyazawa, M.Hemmi, O.Kamigaito, T.Nakagawa, M.Kase, T.Chiba, S.Kohara, E.Ikezawa, T.Kageyama, S.Numata, Y.Batygin and Y.Yano, Commissioning Run of a New Injector System for RILAC, RIKEN Accelerator Progress Report 1996, Vol. 30, ISSN 0289-842X, 1996, p.p. 186-187.
54. Y.Batygin, Prevention of Emittance Growth in Space Charge Dominated Beam, Proceedings of the XVI RCNP Osaka International Symposium on Multi-GeV High-Performance Accelerators and Related Technology", Osaka, 12-14 March 1997, Editors K.Hatanaka, K.Sato and K.Tamura, Osaka University (World Scientific, Singapore), 1997, p.p. 33-40.
55. Y.Batygin, Prevention of Halo Formation in High Brightness Beam, Particle Accelerator Conference (PAC97), Vancouver, B.C., Canada, 1997.
56. Y.Batygin, Dynamics of Beam-Beam Interaction, Workshop on Beam Physics, 21-22 November 1996, Center for Advanced Science and Technology, Hyogo, Japan, Spring-8 Proceedings 1997-0001-ACC, p.p. 161-188.
57. Y.Batygin, Physics of high brightness beam transport without halo formation, Beam Physics Meeting, 25-26 September 1997, SPring-8, Himeji, Japan.
58. Y.Batygin, Stationary particle distribution of intense bunched beam in RF accelerating field, RIKEN Accelerator Progress Report 1997, Vol. 31, ISSN 0289-842X, 1997, p.p. 237-238.
59. Y.Batygin, High brightness beam transport in a quadrupole focusing channel with octupole field component, RIKEN Accelerator Progress Report 1997, Vol. 31, ISSN 0289-842X, p.p. 239-240, 1997.
60. Y.Batygin, Self-consistent distribution of a space charge dominated beam in continuous focusing channel and application to halo-free beam transport, Proceedings of the 2nd US-Japan Workshop on Heavy-Ion Fusion and Related Topics, Berkeley, California, 12-14 November 1997, UCRL-MI-129243, 1997.
61. Y.Batygin and T.Katayama, Spin depolarization in presence of beam-beam interaction, Proceedings of the 11 Symposium on Accelerator Science and Technology, SPring-8, Harima Science Garden City, Hyogo, Japan, 1997, p.p. 282-284.
62. Y.Batygin and T.Katayama, Diffusion instability in noisy beam-beam interaction, Proceedings of the 11 Symposium on Accelerator Science and Technology, SPring-8, Harima Science Garden City, Hyogo, Japan, 1997, p.p. 505-507.

63. Y.Batygin and T.Katayama, Diffusion beam-beam instability, RIKEN Accelerator Progress Report 1997, Vol. 31, ISSN 0289-842X, 1997, p.p. 235-236.
64. Y.Batygin and T.Katayama, Analytical and numerical study of spin depolarization in particle collider, Spin Note AGS/RHIC/SN No. 67, Brookhaven National Laboratory, November 1997.
65. Y.Batygin and T.Katayama, Spin depolarization in high energy particle collider, RIKEN Accelerator Progress Report 1997, Vol. 31, ISSN 0289-842X, 1997, p.p. 246-247.
66. Y.Batygin and T.Katayama, Numerical study of spin depolarization in RHIC due to beam-beam collision, Spin Note AGS/RHIC/SN No. 053, Brookhaven National Laboratory, 1997.
67. Y.Batygin and T.Katayama, Effect of Noise in Beam-Beam Interaction, Particle Accelerator Conference (PAC97), Vancouver, B.C., Canada, 1997.
68. Y.Batygin and T.Katayama, Beam-beam simulation at RHIC, Spin Note AGS/RHIC/SN No. 052, Brookhaven National Laboratory, February 24, 1997.
69. G.Shirkov, Y.Batygin and Y.Yano, Particle-in-cell model for numerical simulation of multicomponent ECR plasma and electron-ion beams, RIKEN-AF-AC-5, 1997.
70. T.Katayama, Y.Batygin, N.Inabe, K.Ohtomo, T.Ohkawa, M.Takanaka, M.Wakasugi, S.Watanabe, Y.Yano and K.Yoshida, Electron and RI Beam Collision Experiments at MUSES Project, Proceedings of the XVI RCNP Osaka International Symposium on Multi-GeV High -Performance Accelerators and Related Technology", Osaka, Editors K.Hatanaka, K.Sato and K.Tamura, Osaka University (World Scientific, Singapore), 1997, p.p. 96-105.
71. T.Katayama, Y.Batygin, N.Inabe, K.Ohtomo, T.Ohkawa, M.Takanaka, M.Wakasugi, S.Watanabe, Y.Yano, K.Yoshida, J.Xia, Y.Rao and Y.Yuan, MUSES Project at RIKEN RI Beam Factory, Nuclear Physics A626, 1997, 545-560.
72. O.Kamigaito, A.Goto, Y.Miyazawa, T.Chiba, M.Hemmi, S.Kohara, T.Nakagawa, E.Ikezawa, Y.Batygin, Y.Yano, Acceleration test of the folded-coaxial RFQ linac for the RILAC, Proceedings of the 11 Symposium on Accelerator Science and Technology, Harima Science Garden City, Hyogo, Japan, 1997, p.p. 92-94.
73. O.Kamigaito, A.Goto, Y.Miyazawa, T.Chiba, M.Hemmi, M.Kase, S.Kohara, Y.Batygin, T.Nakagawa, E.Ikezawa and Y.Yano, Recent development of the variable-frequency RFQ linac for RILAC, RIKEN Accelerator Progress Report 1997, Vol. 31, ISSN 0289-842X, 1997, p.p. 192-193.

74. H.Akikawa, Y.Batygin, H.En'yo, E.Fujisawa, Y.Goto, K.Hatanaka, N.Hayashi, T.Ichihara, K.Imai, M.Ishihara, T.Katayama, T.Kawaguchi, K.Kurita, Y.Mao, A.Masaike, Y.Nakada, H.Okamura, M.Okamura, N.Saito, H.Sakai, Y.Sakemi, T.Sakuma, H.Sato, H.Sato, T.-A.Shibata, Z.Sun, A.Taketani, E.Taniguchi, T.Tominaka, H.Torii, T.Wakasa, Y.Watanabe, H.Wu, M.Xiao, S.Yoneyama and M.Yosoi, RHIC spin project, RIKEN Accelerator Progress Report 1997, Vol. 31, ISSN 0289-842X, 1997, p. 52.
75. Y.Batygin, Spatial distribution of collisionless ions confined in an electron cyclotron resonance ion source, Journal of Applied Physics, 83 (2), 1998, p.p. 684-690.
76. Y.Batygin, Self-consistent distribution of a high brightness beam in continuous focusing channel and application to halo-free beam transport, Phys. Rev. E, 57, 1998, p.p. 6020-6029.
77. Y.Batygin, Stationary Self-Consistent Distribution of Bunched Beam in RF Field, Proceedings of the 6-th European Particle Accelerator Conference (EPAC98), Ed. S.Myers, L.Liljeby, Ch.Petit-Jean-Genaz, J.Poole, K.-G.Rensfelt, Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), Stockholm, 1998, p.p. 1097-1099.
78. Y.Batygin, Accuracy and Efficiency of 2D and 3D Fast Poisson's Solvers for Space Charge Field Calculation of Intense Beam, Proceedings of the 6-th European Particle Accelerator Conference (EPAC98), Ed. S.Myers, L.Liljeby, Ch.Petit-Jean-Genaz, J.Poole, K.-G.Rensfelt, Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), Stockholm, 1998, p.p. 1100 - 1102.
79. Y.Batygin, Self-Consistent Beam Equilibrium and Halo-Free Beam Transport, Proceedings of the 6-th European Particle Accelerator Conference (EPAC98), Ed. S.Myers, L.Liljeby, Ch.Petit-Jean-Genaz, J.Poole, K.-G.Rensfelt, Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), Stockholm, 1998, p.p. 1094-1096.
80. Y.Batygin, Halo-Free Beam Transport in Nonlinear Focusing Channel, First Asian Particle Accelerator Conference (APAC98), 23-27 March 1998, KEK, Tsukuba, Japan.
81. Y.Batygin, Analytical and numerical treatment of halo-free beam transport, Workshop on Space Charge Physics in High Intensity Hadron Rings, Pridwin Hotel, Shelter Island, 4-7 May, 1998.
82. Y.Batygin and T.Katayama, Noise Instability in Nonlinear Beam-Beam Interaction, NIM-A, Vol. 404, 1998, p.p. 1 - 16.

83. Y.Batygin and T.Katayama, Beam-Beam Instability in Presence of Beam Cooling, Proceedings of the 6-th European Particle Accelerator Conference (EPAC98), Ed. S.Myers, L.Liljeby, Ch.Petit-Jean-Genaz, J.Poole, K.-G.Rensfelt, Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), Stockholm, 1998, p.p. 1023-1025.
84. Y.Batygin and T.Katayama, Spin Depolarization by the Beam-Beam Effect, Proceedings of the 6-th European Particle Accelerator Conference (EPAC98), Ed. S.Myers, L.Liljeby, Ch.Petit-Jean-Genaz, J.Poole, K.-G.Rensfelt, Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), Stockholm, 1998, p.p. 1026 - 1028.
85. Y.Batygin and T.Katayama, Spin depolarization due to beam-beam collisions, Physical Review E, Vol. 58, 1998, p.p. 1019-1032.
86. Y.Batygin and T.Katayama, Luminosity of particle collider, RIKEN-AF-AC-10, 1998, 21 p.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 октября 1998 года.