



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

Дубна, Московская область, Россия 141980 Dubna Moscow Region Russia 141980  
Telefax: (7-495) 632-78-80 Tel.: (7-49621) 65-059 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**Утверждаю:**

Директор Международной  
межправительственной организации  
Объединенного института ядерных  
исследований,  
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН  
Матвеев В.А.



*Матвеев* «26» октября 2017г.

**ОТЗЫВ**

**ведущей организации на диссертацию**

Шильцева Владимира Дмитриевича

«Электронные линзы для суперколлайдеров», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

**Актуальность темы исследования**

Диссертация В.Д. Шильцева посвящена актуальной научной теме – созданию и применению электронных линз (ЭЛ), важного нового инструмента для адронных коллайдеров. Автор построил и использовал ЭЛ для компенсации эффектов встречи и очистки гало пучков высокой интенсивности и больших энергии в коллайдере Теватрон (Collider Run 11 (2001-2011)) в течение его продолжительной работы и затем в коллайдере RHIC. Это позволило увеличить пиковую и интегральную светимость, очистку гало пучка обоих коллайдеров.

**Оценка структуры и содержания работы**

Содержание и структура диссертации хорошо взаимно согласованы и соответствуют поставленной цели исследования, критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования. Выдвигаемые соискателем

теоретические и методические положения, а также сформулированные в диссертации выводы и предложения, как результаты исследования, являются новыми.

Целями данной работы являются определение основных физических параметров ЭЛ, их проектирование и создание, проведение с их использованием исследований в протон-антипротонном коллайдере Теватрон. Для этого решены следующие задачи:

1. Определены основные физические параметры ЭЛ и предельные ограничения, предъявляемые к их работе на основе требований динамики пучков коллайдера.

2. Выполнено численное моделирование взаимодействия ЭЛ и адронных пучков в коллайдерах Теватрон и LHC. Проведена оценка эффективности работы ЭЛ, а также проверка аналитических оценок эффективности и критериев устойчивости пучков в Теватроне.

3. Определена оптимальная электромеханическая схема для ЭЛ в коллайдере Теватрон.

4. Созданы и установлены две ЭЛ в коллайдере Теватрон.

5. В коллайдере Теватрон выполнен ряд пионерских исследований по компенсации эффектов встречи "лоб в лоб" паразитных эффектов встречи, продольной и поперечной коллимации пучков протонов и антипротонов.

6. Эффективно решены вопросы, связанные с использованием ЭЛ в круглосуточной работе коллайдера.

7. Рассмотрены и изучены дополнительные возможности применения ЭЛ в современных ускорителях и накопителях, в частности, в Большом Адронном Коллайдере (LHC) ЦЕРН.

Диссертация представлена введением, пятью главами и заключением. Текст ее размещен на 205 страницах с 115 рисунками и 15 таблицами. Список литературы состоит из 242 наименований.

Выдвинутые соискателем теоретические и методологические положения, а также сформулированные в виде выводов и предложений, являются новыми.

Во введении обоснована актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, сформулированы основные цели работы.

В первой главе представлена история сверхпроводящих коллайдеров, изложены основы метода встречных пучков и главные проблемы динамики пучка. Дан обзор метода действия ЭЛ и их практического применения для решения проблем достижения высокой светимости коллайдеров. Рассмотрены проблемы работы коллайдеров с большим числом сгустков, проблемы наличия различных паразитных эффектов, вызывающих потери пучка, уменьшение интегральной светимости, а также проблемы пространственного заряда, приводящего к недопустимому росту эмиттанса и др.

Рассмотрены условия безопасной работы коллайдеров при ультравысокой энергии.

Установлено, что ЭЛ представляют новый эффективный инструмент для оптимальной работы коллайдеров.

Технология ЭЛ в подсистемах пучковой диагностики, а также при использовании ЭЛ в коллайдерах Теватрон и RHIC рассмотрены в главе 2. Определены основные требования к

ЭЛ для различных применений, в том числе, для компенсации эффектов встречи "лоб-в-лоб", компенсации паразитных эффектов встречи, коллимации полым электронным пучком и компенсации эффектов пространственного заряда пучков коллайдеров. Определены величины тока и энергии пучка электронов, его поперечные размеры его.

В третьей главе подробно обсуждается применение ЭЛ для компенсации последствий эффектов встречи пучков в коллайдерах. Изучено также влияние флуктуаций на рост эмиттанса антипротонов. В результате внесены важные изменения в работу Теватрона. Установлено опытным путем, что разработанные ЭЛ совместимы с работой коллайдера, и при этом доказано наличие компенсации эффектов встречи в протон-антипротонном коллайдере Теватрон. Две ЭЛ с Гауссовым профилем электронного пучка использованы для частичной компенсации эффектов встречи в коллайдере RHIC. Разработано предложение по применению ЭЛ для увеличения параметра светимости коллайдера LHC.

В четвертой главе обсуждается применение ЭЛ для коллимации поперечного и продольного гало пучка. Рассмотрена концепция коллимации полым электронным пучком. Особое внимание обращено на движение частиц, не захваченных в ВЧ-сепаратрису коллайдера. Они представляют серьезную угрозу для работы коллайдеров, так как могут привести к срыву сверхпроводимости в магнитах во время ускорения и при сбросе пучка.

В главе 5 обсуждается применение ЭЛ для компенсации эффектов пространственного заряда в протонных ускорителях высокой энергии, в том числе, в инжекторах коллайдеров. В протонных кольцах с пучками высокой яркости рассмотрены возможности достижения интегрируемой нелинейности динамики пучка при подавлении образования гало и потерь частиц. Обсуждены варианты компенсации положительного заряда пучка протонов коллайдеров отрицательным зарядом неподвижных или низкоэнергичных электронов.

Представлены параметры ЭЛ для компенсации пространственного заряда в быстроциркулирующем протонном синхротроне Booster на энергию 8 ГэВ в Фермилаб.

В заключении представлены основные результаты диссертации.

Автор выносит на защиту следующие положения (цитирую):

1. Предложен метод ЭЛ для компенсаций паразитных и лобовых эффектов встречи, так и для ряда приложений в суперколлайдерах. На основании требований динамики пучков в суперколлайдерах определены основные физические параметры ЭЛ.

2. Проведено численное моделирование взаимодействия электронных пучков ЭЛ и адронных пучков в суперколлайдерах для оценки эффективности работы ЭЛ и проверок аналитических оценок эффективности и критериев устойчивости.

3. Определен оптимальный электромеханический дизайн ЭЛ, включая магнитную систему с прецизионными СП соленоидами, электронную пушку и коллектор, систему с рекуперацией энергии электронного пучка, вакуумную систему, высоковольтный модулятор анода, систему пучковой диагностики.

4. Созданы две ЭЛ для коллайдера Теватрон, которые были установлены для работы с пучками протонов и антипротонов.

5. Решен ряд вопросов, связанных с постановкой ЭЛ на круглосуточную работу в суперколлайдерах.

6. Проведен ряд пионерских исследований с ЭЛ в протон-антипротонном суперколлайдере Теватрон, в частности, по компенсации эффектов встречи "лоб в лоб" и паразитных эффектов встречи, приведшие к существенному улучшению времени жизни пучков высокой энергии.

7. Предложены и впервые продемонстрированы поперечная коллимация пучков протонов и антипротонов с помощью трубчатого пучка в ЭЛ и продольная коллимация с помощью пульсирующего пучка электронов ЭЛ.

8. Разработаны теория и проекты по применению ЭЛ в коллайдерах LHC, HL-LHC, FCC и других для целей компенсации эффектов встречи, эффектов пространственного заряда, коллимации и затухания Ландау.

#### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме диссертации**

Содержание диссертации соответствует указанной специальности 01.04.20 и теме диссертации. Проведено изучение работы коллайдера Теватрон и использование ЭЛ для их оптимального применения. Дано подробное описание физики и технологии ЭЛ и их использований для адронных коллайдеров высоких энергий, представлены теоретические и экспериментальные разработки по этим проблемам.

#### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

В автореферате содержится достаточно полная информация о целях и задачах диссертационной работы, кратко изложено основное содержание и представлены результаты диссертации. Указан список публикаций автора, содержащих основные результаты его работы. Текст автореферата вполне корректно отражает содержание и основные результаты диссертации.

#### **Личный вклад соискателя в получении результатов исследования**

Личный вклад автора в результаты, представленные в диссертации, является определяющим во всех разработках и создании ЭЛ для работы коллайдеров Теватрон и RHIC. Свидетельств о плагиате научных данных не обнаружено.

#### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность полученных в диссертации данных обеспечена теоретическим обоснованием и экспериментальным подтверждением эффективности применения ЭЛ для работы коллайдеров Теватрон и RHIC. Полученные результаты неоднократно представлялись на конференциях и в научной печати.

#### **Теоретическая и практическая значимость полученных результатов**

Обоснованы, теоретически рассчитаны и построены две ЭЛ для Теватрона и полученный опыт использован при создании двух ЭЛ для коллайдера RHIC. В обоих коллайдерах применение ЭЛ привело к значительному увеличению интегральной светимости вследствие компенсации эффектов встречи, применения коллимации и существенного понижения уровня влияния пространственного заряда в сильноточных ускорителях.

## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Разработанные технологии ЭЛ могут быть применены в коллайдере LHC и будущих коллайдерах FCC и SpC для подавления эффектов встречи, коллимации гало пучков и контролируемого введения разброса бетатронных частот частиц коллайдера.

### **Новизна и научная ценность полученных результатов**

Автор впервые предложил и детально разработал метод ЭЛ для компенсации паразитных эффектов встречи, для продольной коллимации пучков, для поперечной коллимации пучков полыми электронными пучками ЭЛ, для компенсации эффектов пространственного заряда. Впервые построены ЭЛ, которые установлены и использованы в коллайдере Теватрон. Они показали свою важную роль для компенсации паразитных эффектов встречи пучков протонов, эффектов встречи "лоб-в-лоб" для антипротонов, а также в поперечной коллимации антипротонов полым электронным пучком. Впервые проведен анализ эффективности применения ЭЛ, и разработаны предложения для коллайдера LHC.

### **Замечания по диссертационной работе**

В представленной работе не обнаружено существенных недостатков, заслуживающих замечаний в отзыве. Работа написана вполне хорошим литературным языком. Единственное некорректное выражение встречается на стр. 164: "Более перспективным подходом является компенсация положительного заряда пучка протонов отрицательным пространственным зарядом неподвижных или низкоэнергетических электронов ....". Видимо, имеются в виду электроны в ловушках, где они имеют низкую энергию (температуру) и, тем не менее, движутся.

### **Апробация и публикации научных материалов**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на многих (более 20) научных конференциях, семинарах ИЯФ СО РАН, Fermilab, CERN, BNL, ANL, LBNL, SLAC, HKUST, и др. (см. диссертацию). По теме диссертации опубликовано 3 книги и более 80 научных статей, из них 14 в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

### **Заключение по диссертации о соответствии её требованиям "Положения о порядке присуждения ученых степеней" по пунктам 9 и 10.**

Диссертация Шильцева Владимира Дмитриевича на соискание ученой степени доктора физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики и техники ускорителей и накопителей заряженных частиц.

Применение ЭЛ является новым достижением в экспериментальной ускорительной физике.

В диссертации предложены новые, научно-обоснованные физико-технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие фундаментальной

науки – физики и техники ускорителей заряженных частиц, что соответствует требованиям п. 9 "Положения о присуждении ученых степеней" ВАК.

Диссертация В.Д. Шильцева "Электронные линзы для суперколлайдеров" представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, соответствующую всем требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Шильцев Владимир Дмитриевич заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

Диссертационная работа и отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на открытом заседании Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского Семинара Международной межправительственной организации ОИЯИ, протокол № 68 от 26 мая 2017г.

Отзыв составил:

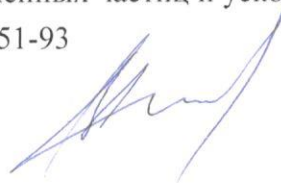
Ученый секретарь Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского Семинара ОИЯИ Эрнст Истюреевич Уразаков,  
доктор технических наук, профессор, советник Лаборатории Физики Высоких Энергий ОИЯИ,  
специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника  
e-mail: vta@jinr.ru ; тел: 8- 496-21-6-44-92

Подпись  
23.10.2017

 Э.И. Уразаков

Председатель Секции физики пучков заряженных частиц и ускорительной техники Общеинститутского Семинара ОИЯИ Игорь Николаевич Мешков,  
член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор,  
советник дирекции ОИЯИ, главный научный сотрудник СЭО ЛЯП ОИЯИ,  
специальность 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника  
e-mail: meshkov@jinr.ru, тел.: 8-496-21-6-51-93

Подпись  
23.10.2017

 И.Н. Мешков

Главный ученый секретарь ОИЯИ Александр Савельевич Сорин,  
доктор физико-математических наук, профессор  
Почтовый адрес:  
Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6.  
Тел. 8-496-21-65940, 8-496-21-62221.  
e-mail: main@jinr.ru

Подпись  
23.10.2017

 А.С. Сорин