

На правах рукописи

ШИЛЬЦЕВ Владимир Дмитриевич

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ СУПЕРКОЛЛАЙДЕРОВ

**01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук при участии Лаборатории им. Ферми (США).

НАУЧНЫЙ КОНСУЛЬТАНТ:

Диканский Николай Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Корчуганов Владимир Николаевич – доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Научный комплекс по перспективным ускорительным технологиям, г. Москва, заместитель руководителя.

Иванов Сергей Владиславович – доктор физико-математических наук, академик РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт физики высоких энергий им. А.А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Протвино, директор.

Зенкевич Павел Романович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, ведущий научный сотрудник

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна.

Защита диссертации состоится «25» декабря 2017 г. в «10:00» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН.

Автореферат разослан «19» сентября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

П.А. Багрянский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Суперколлайдеры, как, возможно, наиболее сложные из когда-либо построенных инструменты для научных исследований, широко известны своими многими технологическими прорывами и многочисленными открытиями в физике. Три таких коллайдера были построены — Теватрон (Tevatron) в лаборатории Ферми в США, Релятивистский Коллайдер Тяжелых Ионов RHIC в BNL, Большой адронный коллайдер LHC в CERN — и каждая из этих машин представляет собой эпоху в исследованиях по физике частиц. В то время, как строительство 21-километрового коллайдера УНК в Протвино и 87-километрового Сверхпроводящего Супер коллайдера SSC в Техасе было прекращено в начале 90-х годов, концепции еще более крупных протон-протонных коллайдеров активно развиваются в настоящее время в Китае, Европе и в США. Сложность суперколлайдеров и, как правило, очень высокая их стоимость требуют обеспечения наивысшей производительности — высокой светимости, чтобы окупить инвестиции в строительство этих машин. Электронные линзы представляют собой новый инструмент для ускорителей заряженных частиц высоких энергий, в частности, для сверхпроводящих адронных коллайдеров. Электронные линзы были предложены автором, построены и использованы для компенсации эффектов встречи и коллимации пучков высокой интенсивности и высокой энергии в коллайдере Tevatron в течение десятилетия его работы Collider Run II (2001–2011), а после этого и в RHIC. С тех пор, как широкие возможности электронных линз экспериментально продемонстрированы в Tevatron, они стали широко использоваться для улучшений светимости суперколлайдеров и коллимации пучков высокой интенсивности в ускорителях протонов высокой интенсивности, использование электронных линз для этих целей, а также для компенсации эффектов пространственного заряда и других приложений в ускорителях активно продолжается, как теоретически, так и экспериментально.

В этой работе приводится подробное описание физики и технологии электронных линз для адронных коллайдеров высоких энергий, а также представлены теоретические и экспериментальные работы по этой тематике на сегодняшний день.

Основные цели работы

В работе рассматриваются физические принципы работы, технология и приложения нового элемента современных ускорителей и суперколлайдеров — электронных линз (ЭЛ). Целями работы являются определение основных необходимых физических параметров ЭЛ, проектирование и создание ЭЛ, проведение исследований с ними и использование их в работе ускорителя, протон-антипротонного суперколлайдера Tevatron. Для этого решены следующие задачи:

1. На основе требований динамики пучков в суперколлайдерах определить основные физические ограничения и параметры, предъявляемые к электронным линзам.
2. Провести численное моделирование взаимодействия электронных пучков ЭЛ и адронных пучков в суперколлайдерах, для оценки эффективности работы электронных линз и проверки аналитических оценок эффективности и критериев устойчивости.
3. Определить оптимальную электромеханическую схему проекта для электронных линз.
4. Создать две ЭЛ и установить их в коллайдере Tevatron.
5. Провести ряд пионерских исследований с ними в протон-антипротонном суперколлайдере Tevatron, в частности, по компенсации эффектов встречи лоб в лоб и паразитных эффектов встречи, продольной и поперечной коллимации пучков протонов и антипротонов.
6. Решить вопросы, связанные с постановкой ЭЛ на круглосуточную работу в суперколлайдерах.
7. Рассмотреть дополнительные возможности использования ЭЛ в ускорителях.

Научная новизна

Автором работы впервые предложен и детально разработан метод электронных линз для компенсации паразитных эффектов встречи, для продольной коллимации пучков, для поперечной коллимации полыми ЭЛ, для компенсации эффектов пространственного заряда.

Впервые были построены электронные линзы, которые будучи установлены и использованы в суперколлайдере Tevatron показали свою большую эффективность в компенсации паразитных эффектов встречи для протонов, эффектов встречи лоб в лоб для антипротонов, в продольной коллимации пучков протонов и антипротонов, в поперечной коллимации антипротонов полым электронным пучком. Консультации автора использованы для построения ЭЛ для суперколлайдера RHIC и демонстрации компенсации в нем лобовых эффектов встречи и повышения светимости.

Впервые проведен анализ эффективности и разработаны проекты ЭЛ для суперколлайдера LHC.

Практическая ценность результатов работы

В работе исследованы требования, физические ограничения и практические проекты ЭЛ, построены две линзы для Tevatron и их опыт использован в строительстве двух ЭЛ для RHIC. В обоих коллайдерах использование ЭЛ привело к значительному увеличению интегральной светимости. Кроме компенсации эффектов встречи и коллимации, разработанные методы ЭЛ позволяют существенно уменьшить эффекты пространственного заряда в высокоэнергетических ускорителях. Разработанные технологии электронных линз могут быть

использованы в существующем суперколлайдере ЛНС и будущих коллайдерах FCC и SpnC для подавления эффектов встречи, коллимации и стабилизации пучков затуханием Ландау, за счет создания разброса бетатронных частот.

Автор выносит на защиту следующие результаты работы:

1. Предложен метод электронных линз для компенсации паразитных и лобовых эффектов встречи, а также для ряда других приложений в суперколлайдерах. На основе требований динамики пучков в суперколлайдерах определены основные физические параметры электронных линз.
2. Проведено численное моделирование взаимодействия электронных пучков электронных линз и адронных пучков в суперколлайдерах, для оценки эффективности работы электронных линз и проверки аналитических оценок эффективности и критериев устойчивости.
3. Определен оптимальный электромеханический дизайн электронных линз, включая магнитную систему с прецизионными СП соленоидами, электронные пушку и коллектор, систему с рекуперацией энергии электронного пучка, вакуумную систему, высоковольтный модулятор анода, систему пучковой диагностики.
4. Созданы две электронные линзы для коллайдера Tevatron, которые были установлены для работы с пучками протонов и антипротонов.
5. Решен ряд вопросов, связанных с постановкой электронных линз на круглосуточную работу в суперколлайдерах.
6. Проведены ряд пионерских исследований с электронными линзами в протон-антипротонном суперколлайдере Tevatron, 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 экспериментально продемонстрированы поперечная коллимация пучков протонов и антипротонов с помощью трубчатого пучка в ЭЛ и продольная коллимация с помощью пульсирующего пучка электронов в ЭЛ.
8. Разработаны теория и проекты по использованию ЭЛ в ускорителях ЛНС, HL-ЛНС, FCC и других для целей компенсации эффектов встречи, эффектов пространственного заряда, коллимации и затухания Ландау.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Текст диссертации содержит 205 страниц, 115 рисунков, 15 таблиц. Список литературы состоит из 242 работ.

Апробация диссертационной работы

Основные результаты, представленные в данной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях, семинарах и рабочих собраниях: PAC-, IPAC-, EPAC-, и NAPAC- в 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2013, 2014, 2015 и 2016; Sarantsev-2009 (ОИЯИ, Алушта), а также на научных семинарах в ИЯФ СО РАН (Новосибирск), Fermilab, CERN, BNL, ANL, LBNL, SLAC, HKUST и др.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 3 книги и более 80 научных работ, из них 14 — в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК [6–20].

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко обоснована актуальность рассмотренных в диссертации вопросов, сформулированы основные цели работы, а также в сжатой форме изложено содержание отдельных глав.

Первая глава носит вводный характер. В ней изложены основы метода встречных пучков, краткая история адронных сверхпроводящих суперколлайдеров, основные проблемы динамики пучков, с которыми они сталкиваются, а также дан обзор метода электронных линз и их практического применения для решения вопросов на пути к высокой производительности таких ускорителей.

Учитывая, что СП магниты обеспечивают примерно в 5 раз более сильные магнитные поля (и, соответственно, более короткие туннели), и то, что они позволяют уменьшить требуемую электрическую мощность объекта почти на порядок, то не удивительно видеть, что коллайдеры с такими СП магнитами (суперколлайдеры) предлагают доступ к самым высоким энергиям в пределах ограниченных финансовых ресурсов. Тем не менее, очень высокие суммарные затраты на суперколлайдеры обычно ведут к требованию достижения максимально возможной производительности — светимости.

Хотя только три адронных суперколлайдера достигли оперативной стадии — Tevatron, RHIC и LHC, но при этом были еще два примечательных проекта очень больших суперколлайдеров в прошлом, а именно, Superconducting Super Collider (SSC) в Техасе, США и коллайдер УНК в Протвино, Россия. По разным причинам, в основном, приписанных к их масштабу, стоимости и сложности, они были прекращены в 1991 и 1993 годах, соответственно. Предлагались и предлагаются еще большие по размерам и энергиям суперколлайдеры, такие как Очень Большой Адронный Коллайдер (VLHC) в США в начале 2000-х годов, Будущий Циклический Коллайдер (FCC) в CERN и Супер протон-протонный коллайдер (SppC) в Китае.

Светимость коллайдера зависит только от параметров пучка и при гауссовых распределениях в пучке равна:

$$L = \gamma f_0 \frac{N_B N_{p,1} N_{p,2}}{4\pi\beta^* \varepsilon} F(\sigma_s, \beta^*, \theta), \quad (1)$$

где $N_{p(1,2)}$ — это число частиц в сгустке в каждом из двух встречных пучков, N_B — это число сгустков в пучке, ε — это средний среднеквадратичный нормированный эмиттанс двух круглых пучков $(\varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2})/2$, $F < 1$ — геометрический коэффициент потери светимости, γ — релятивистский фактор, а f_0 — частота обращения. Как правило, для протон-протонных коллайдеров интенсивности сгустков и эмиттансы примерно одинаковы $N_{p1} = N_{p2} = N_p$ и $\varepsilon_{p1} = \varepsilon_{p2} = \varepsilon_p$, в то время как это не всегда так для пучков разных видов, например, в протон-антипротонном коллайдере Tevatron $N_p \gg N_a$ и $\varepsilon_p \gg \varepsilon_a$. Геометрический фактор снижения светимости F учитывает «эффект песочных часов» (изменение поперечного размера пучка вдоль области столкновения), который зависит от соотношения длины сгустка σ_s и бета-функции в точке столкновения β^* и/или уменьшения из-за угла пересечения θ между двумя орбитами пучков в точке взаимодействия (IP).

Для достижения высокой светимости необходимо максимизировать интенсивность сгустков с как можно более малыми эмиттансами и сталкивать их с высокой частотой повторения в тех местах, где фокусирующая оптика обеспечивают самые низкие значения функций $\beta_{x,y}^*$. В Таблице 1 приведены значения пиковой светимости и ключевых параметров пучков в протон-(анти)протонных суперколлайдерах.

Таблица 1. Светимости и параметры протон-протонных / протон-антипротонных сверхпроводящих суперколлайдеров

	E_{CM} , ТэВ	L , $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$N_{p(a)}$, 10^{11}	N_B	$\varepsilon_{p(a)}$, мкм	β^* , см	ξ	W , МДж
Tevatron	1,96	0,043	2,9/0,8	36	3/1,5	28	0,025	1,7
SSC	40	0,1	0,075	1724	1	50	0,004	418
УНК	6	0,1	3	348	7,5	150	0,005	50
RHIC	0,5	0,025	1,9	111	3,1	65	0,018	0,8
LHC	14	1,0	1,15	2808	3,7	55	0,01	360
FCC	100	5,0	1	10600	2,2	110	0,01	8400

Многочисленные вопросы, которые необходимо решать проектировщикам и операторам суперколлайдеров включают а) эффекты из-за столкновений (паразитные и лобовые эффекты встречи, pile up — нагромождение событий, время жизни светимости и т. д.) и б) однопучковые эффекты (одночастичная стабильность и динамическая апертура (dynamic aperture, DA), импеданс и коллективные эффекты, эффекты электронного облака, стабильность машины и шумы, приводящие к росту эмиттанса, проблемы коллимации и защиты машины, производство частиц и их охлаждения, эффекты пространственного заряда, поляризации и т. д.).

В адронном коллайдере, сталкивающиеся пучки должны иметь небольшие поперечные размеры для достижения высокой светимости, см. уравнение (1). Это приводит к сильным электромагнитным силам, оказываемым каждым пучком на частицы другого пучка. Взаимодействие пучков, как правило, приводит к сильному увеличению потерь частиц, росту эмиттанса и сокращению времени жизни светимости и интеграла светимости (иногда — к значительным и быстрым потерям интенсивности пучка и квенчу (quench) сверхпроводящих магнитов). Эффекты встречи являются одним из самых жестких ограничений на производительность коллайдера. В Таблице 1 приводится максимальный параметр взаимодействия пучков (beam-beam parameter) ξ , равный смещению бетатронной частоты частиц (tune) из-за столкновений, который был достигнут в адронных суперколлайдерах:

$$\xi = N_{\text{IP}} \xi_{\text{IP}} = N_{\text{IP}} \frac{N_{\text{p}} r_{\text{p}}}{4\pi\epsilon} \leq 0,025, \quad (2)$$

где $r_{\text{p}} = e^2/mc^2 = 1,53 \cdot 10^{-18}$ м — классический радиус протона, N_{p} и ϵ — интенсивность и эмиттанс встречного сгустка, N_{IP} — число мест встречи.

В отличие от e^+e^- коллайдеров, в которых обычно доминирует быстрое затухание бетатронных колебаний из-за синхротронного излучения и где попытки преодолеть максимальный beam-beam параметр пучка $\xi \sim 0,05-0,1$ приводят к пороговому эффекту (снижение светимости), ограничения в адронных коллайдерах, как правило, «мягкие» и соответствуют приблизительной границе между «оптимальными» и «едва терпимыми» условиями, такими как потери частиц, фоны в детекторе, рост эмиттанса и темпы деградации светимости, и т. д. Тем не менее, учитывая, что адронные машины весьма чувствительны к гораздо меньшим изменениям отстроек $dQ_{x,y} \sim 0,001$ от оптимальной рабочей точки машины (Q_x, Q_y), то параметры этих коллайдеров тщательно выбираются так, чтобы уместить в область стабильности по частотам разброс частот порядка ξ . Например, в ускорителе Tevatron, вертикальные и горизонтальные частоты частиц занимают область между резонансами 5-го и 7-го порядка (между $Q_{x,y} = 3/5 = 0,6$ и $Q_{x,y} = 4/7 = 0,571$ при целой части

$[Q_{x,y}] = 20$), и разброс частот из-за эффектов встречи полностью перекрывает эту область, см. Рисунок 1.

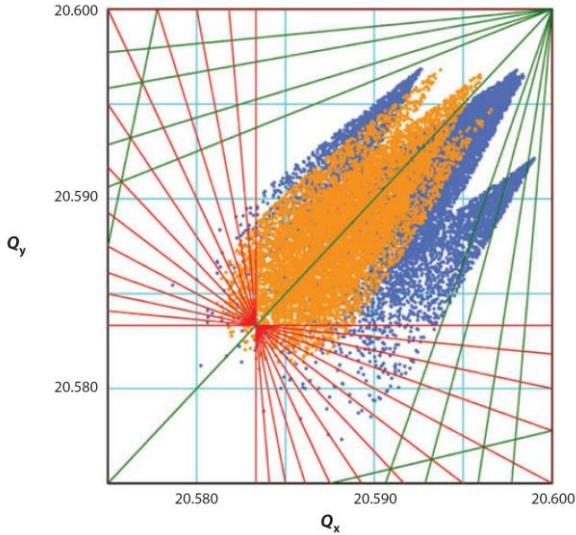


Рисунок 1. Распределения протонных и антипротонных бетатронных частот в Tevatron накладываются на резонансы. Линиями показаны различные суммовые и разностные резонансы до двенадцатого порядка. Светлые точки вблизи диагонали представляют частоты протонов; группы более темных точек вдали от диагонали представляют вычисленные распределения частот для всех 36 антипротонных сгустков. Разброс частот для каждого пучка рассчитывается для частиц до амплитуды 6σ с учетом измеренных интенсивностей и эмиттансов

Дополнительное осложнение происходит от работы с большим количеством сгустков — от десятков до тысяч, как указано в Таблице 1 — нужных для уменьшения эффекта pile-up («нагромождение трудно различимых событий за одно столкновение»), характерного для адронных коллайдеров. Из-за больших сечений полных неупругих ион-ионных / протон-протонных / протон-антипротонных / протон-ионных реакций, значительное число частиц пучка распадается в каждом акте межсгустковых столкновений, создавая запутанную картину событий в детекторах частиц, которые не могут быть решены во времени:

$$N_{\text{pileup}} = \frac{L\sigma_{\text{inel}}}{f_0 N_B}, \quad (3)$$

где сечение неупругих реакций $\sigma_{\text{inel}} [\text{мбарн}] \approx 70 + 20 \log(E[\text{ТэВ}])$. Для того, чтобы сохранить количество событий на столкновение достаточно низким при

условии высокой средней светимости, нужно увеличить количество сгустков. В Tevatron pile-up был $N_{\text{pileup}} < 15$ с $N_B = 36$, в то время как pile-up достигает 30 на LHC при проектной светимости с $N_B = 2808$ сгустками.

Разделение двух пучков необходимо, чтобы избежать многочисленных $2 \times N_B$ мест столкновений, которые сразу привели бы к недопустимому общему параметру столкновений — см. уравнение (2) — и оставить только одно или несколько выделенных мест лобовых столкновений.

Характер взаимодействия дальнего действия и, следовательно, его сила отличается для каждого сгустка с особенно большими вариациями на концах пакетов сгустков. Это приводит к тому, что все индикаторы динамики пучка зависят от положения пучка в пакете сгустков. Например, в ускорителе Tevatron, работающем с тремя пакетами по 12 сгустков в каждом пучке, наблюдались: значительные искажения пучковых орбит около 40 мкм, сдвиги бетатронных частот на $\Delta Q_{LR} \approx 0,005$, вариации коэффициента поперечной связи и хроматизма $\Delta Q'_{LR} = \Delta(dQ/(dp/p))_{LR} \approx 6$. Не удивительно, что с такими существенными различиями в бетатронных частотах и хроматичностях, времена жизни интенсивностей антипротонов и протонов и темпы роста эмиттанса существенно различались от сгустка к сгустку.

Во время второго периода работы коллайдера Tevatron (Run II, 2001–2011), потери пучков протонов и антипротонов на энергии инжекции составляли около 5 % и 1 %, соответственно, при ускорении — около 2 % и 3 %, и в процессе сжатия бета-функции — около 1–2 % и 0,5 %. . Влияние паразитных эффектов на время жизни светимости τ_L можно оценить в 12–17 % (т. е. около (2,5–3,5 % / ч) из общей скорости (19–21 % / ч)). Так что, в целом, даже в последние годы работы Tevatron, после десяти лет исследований, усовершенствований и оптимизаций, эффекты встречи все еще уменьшали интеграл светимости на 23–33 %. Вредные последствия эффектов встречи пучков в RHIC и LHC примерно такого же порядка.

Помимо вопросов, связанных с эффектами встречи, многие проблемы возникают из-за явлений в одиночных пучках. Одно из самых серьезных ограничений устанавливается силами пространственного заряда в низкоэнергетических ускорителях — инжекторах в коллайдер, которые приводят к неприемлемому росту эмиттанса и потерям частиц, если параметр сдвига частоты бетатронных колебаний из-за пространственного заряда:

$$-\Delta Q_{sc} = \frac{N_p r_p B_f}{4\pi \epsilon_n \beta_p \gamma^2} \quad (4)$$

превышает определенное значение, как правило, около $\sim 0,3$ (здесь $\beta_p = v_p/c$ и γ — релятивистские параметры, B_f — коэффициент бунчировки, т. е. отношение пикового тока к среднему току).

Одна из самых больших проблем для сверхпроводящих коллайдеров ультравысоких энергий — это безопасная работа с гигантской энергией $W = IE/f$, переносимой пучками, см. Таблицу 1, и с гало пучков. Например, в ЛНС, с $I = 0,5 \text{ А}$ циркулирующего тока и при $E = 7 \text{ ТэВ}$ запасенная в пучке в номинальном режиме энергия равняется $W = 360 \text{ МДж}$. Даже скромные потери 1 % запасенной интенсивности в течение приблизительно 10 с будут производить пиковую нагрузку мощностью 500 кВт. Это, безусловно представляет собой высокий риск, так как предел для квенча в магнитах ЛНС составляет около 8 Вт/м. Сложные системы коллимации необходимы для защиты машины и детекторов от потерь пучка, и фона частиц гало. Двухступенчатая система коллимации ускорителя Tevatron, состояла из 14 коллиматоров и успешно выполняла свои функции при 2 Мдж энергии пучка на 1 ТэВ, в то время как 108 коллиматоров были установлены в трехступенчатой системе коллимации ЛНС, чтобы гарантировать неэффективность перехвата гало менее $2 \cdot 10^{-5}$ на метр ускорителя для циркулирующего тока $3 \cdot 10^{14}$ протонов в пучке. Из-за малого размера пучка и высокой энергии пучка, рекордно высокие плотности энергии в ЛНС и будущих адронных суперколлайдеров представляют собой серьезную проблему для материала коллиматоров как при регулярных потерях пучков, так и при различных сценариях аварийных сбросов частиц.

Электронные линзы — это электронные пучки низкой энергии, удерживаемые в магнитном поле, электромагнитные поля которых используются для активного манипулирования циркулирующими пучками в ускорителях высоких энергий. К примеру, пучок электронов с энергией 10 кВ током 3 А и диаметром 1 мм генерирует поле около $\sim 1 \text{ МВ/м}$. Силы пространственного заряда электронов линейны на расстояниях меньше характерного радиуса пучка $r < a_c$, но падают, как $1/r$ при $r \gg a_c$. Помещение пучка электронов в сильное продольное магнитное поле позволяет генерировать очень стабильные в поперечном направлении, яркие и тонкие пучки различных профилей желаемой плотности $j_e(r)$ из внешних источников электронов. Есть целый ряд уникальных преимуществ, которые способствуют широкому применению электронных линз в адронных коллайдерах высоких энергий:

а. пучок электронов воздействует на высокоэнергетические частицы только через электромагнитные силы, без каких-либо ядерных взаимодействий;

б. в типичной конфигурации электронной линзы электроны производятся на катоде электронной пушки и сразу после области взаимодействия попадают в коллектор, таким образом, свежие порции электронов взаимодействуют с высокоэнергетическими частицами на каждом обороте, не оставляя возможности для когерентных неустойчивостей;

в. ток пучка электронов может быстро изменяться на очень коротком масштабе времен $O(10 \text{ нс})$ и электронные линзы в импульсном режиме, ввиду

наличия высоковольтных модуляторов напряжения с быстрым временем нарастания, могут быть синхронизированы для работы с отдельными пучками протонов или подмножеством сгустков и работать с различной интенсивностью для каждого подмножества.

Электронные линзы (ЭЛ) для суперколлайдеров впервые были рассмотрены в 1993 году Э.Н. Цыгановым и др. с целью уменьшить разброс бетатронных частот в SSC, вызванный пучок-пучковыми лобовыми взаимодействиями, и, независимо от них, в 1997 году автор и коллеги предложили ЭЛ для компенсации паразитных и лобовых эффектов встречи в протон-антипротонном коллайдере Tevatron.

Всеобъемлющая теория электронных линз для компенсации паразитных (long-range) взаимодействий и детальный анализ конструктивных требований были разработаны в 1999 году. Первые две электронные линзы были разработаны для компенсации пучковых взаимодействий, изготовлены и установлены в Tevatron в 2001 и 2004 годах. Они позволили впервые продемонстрировать компенсацию эффектов встречи пучков путем сдвига бетатронных частот отдельных сгустков и провести пионерские эксперименты по компенсации лобовых эффектов встречи в 2003 и 2009 годах. Они же продемонстрировали настолько высокую эффективность удаления незахваченных в ВЧ сепаратрисы протонов и антипротонов из впускных промежутков между группами сгустков, что с 2001 года до конца работы Tevatron в 2011 году, постоянно, в режиме «24/7», использовались для продольной коллимации пучка. Поперечная коллимация с помощью электронных линз с полым электронным пучком была предложена автором в 2006 г., и одна из двух TEL использовалась для успешной демонстрации коллимации трубчатым пучком электронов в 2010–2011 годах.

Уникальные преимущества метода электронных линз вызвали ряд предложений для многих других приложений.

По аналогии с параметром пучок-пучкового взаимодействия (2) и параметром эффектов пространственного заряда (4), смещение бетатронной частоты частицы (например, протона) электронным пучком $dQ_{x,y}$ может быть использовано в качестве параметра силы электронных линз в суперколлайдерах:

$$dQ_{x,y} = \frac{\beta_{x,y} L_e r_p}{2\gamma e c} \cdot j_e \cdot \left(\frac{1 \mp \beta_e}{\beta_e} \right), \quad (5)$$

где $\beta_{x,y}$ — бета-функции (горизонтальные, вертикальные) в местах расположения линз, L_e и j_e — длина и плотность тока электронного пучка. Для многих применений электронных линз в адронных суперколлайдерах, требуемый сдвиг частот составляет порядка 0,001–0,01.

Во второй главе рассмотрена технология электронных линз — от подсистем до пучковой диагностики и интеграции — с электронными линзами для коллайдеров Tevatron и RHIC, используемых в качестве примеров.

Основные требования к электронным линзам для различных применений, в т. ч. для компенсации эффектов встречи лоб в лоб, компенсации паразитных эффектов встречи, коллимации полым электронным пучком и компенсации эффектов пространственного заряда: нужные токи пучка электронов, варьируются от 0,3 до 20 А, энергии электронного пучка в диапазоне от 5 до 80 кВ и поперечные размеры в диапазоне от 100 мкм до 3,5 мм, с типичной длиной линз примерно от 2 до 4 м. Требуемая модуляция тока в диапазоне от 100 нс до DC (постоянного тока).

Удовлетворение этим требованиям является довольно сложной задачей для из-за сильного расталкивания в интенсивном электронном пучке. Предпочтительным решением для этой задачи в электронных линзах является погружение электронного пучка в сильное продольное магнитное поле. Размер электронного пучка должен быть примерно такой же или сравним со среднеквадратичным размером протонного пучка, т. е., как правило, порядка 1 мм. Поперечное распределение тока зависит от конкретного применения электронной линзы. Максимальный ток объемного заряда, ограниченного диодом электронной пушки, задается законом Чайлда-Ленгмюра:

$$J_c = PU_a^{3/2}, \quad (6)$$

где первеанс P — параметр, зависящий от пушечной геометрии, а U_a — разность потенциалов между катодом и анодом пушки. Как правило, первеанс представлен в единицах микропервеанса $P = \mu P \times 10^{-6} \text{ A/B}^{3/2}$. Высокий первеанс (до 10) с хорошим качеством пучка может быть достигнут при использовании выпуклого катода, погруженного в магнитное поле порядка 1 кГс или более. Такое расположение оказалось вполне подходящим для электронных линз в Tevatron и RHIC, где использовались электронные пушки с выпуклым катодом с μP в диапазоне от 1 до 6.

Электронные линзы должны иметь продольное магнитное поле для жесткости и контроля размера электронного пучка, и его транспортировки от катода через область взаимодействия к коллектору. Для электронного пучка 10 кВ, требуемое для этого магнитное поле составляет 0,15 Тл. Намного более сильное магнитное поле порядка 3–6 Тл необходимо для поддержания стабильности пучка антипротонов и уменьшения коэффициента x – y связи из-за искажений пучка электронов. Требуемая плотность тока для пучка диаметром ~ 2 мм составляет $j_c = J/\pi a_c^2 \approx 315 \beta_e/(1 + \beta_e) \text{ A/cm}^2$, или примерно 53 А/см² для 10 кВ электронного пучка, $\beta_e = 0,2$. С другой стороны, срок службы оксидного катода значительно понижается, если плотность тока превышает 5–10 А/см². Чтобы уменьшить катодную плотность тока, можно использовать адиабатическое магнитное сжатие, при котором пучок рождается на катоде с большим радиусом в слабом поле V_c и транспортируется в область более сильного магнитного поля B , с сохранением адиабатического инварианта $V_c a_c^2 = B a^2$. Для электронной линзы с катодной плотностью тока около

2,1 А/см² и $a_c = 5$ мм, максимальный коэффициент «сжатия» $R = B/B_c = a_c^2/a^2$ должен быть порядка 25, например, $B = 4$ Тл, $B_c = 0,16$ Тл. Такие магнитные поля являются вполне осуществимы технически и достигнуты в электронных линзах Tevatron и, в последствии, в RHIC. Нелинейная компенсация лобовых эффектов встречи требует точного контроля распределения поперечной плотности заряда электронов $\rho_c(r)$. Это может быть сделано с помощью прикатодных электродов в диодной электронной пушке. Если прикладывать потенциал к этим электродам, отличающийся от потенциала катода, то искаженное распределение электрического поля на поверхности катода будет уменьшать (или увеличивать) эмиссию электронов из различных радиальных участков катода.

В ряде работ проведены оценки продольного магнитного поля, необходимого, чтобы избежать «head-tail» неустойчивости в электронной линзе и рассчитана зависимость порогового поля от параметров электронного и (анти) протонного пучков. Три вида оценок — упрощенная теоретическая модель, многомодовый анализ и прямое численного моделирования — все в конечном итоге дают совпадающие результаты, а именно, минимальное требуемое поле B_{thr} можно представить в форме:

$$B_{thr} \approx 0.95 \frac{eN_a dQ^e}{\sigma_a^2 \sqrt{|Q_x - Q_y|} \cdot Q_s} \quad (7)$$

и, например, при $dQ_x^e = 0,01$, $N_{a,p} = 6 \cdot 10^{10}$, $Q_s = 0,001$, $\Delta Q = |Q_x - Q_y| = 0,01$, $a = 1$ мм пороговое поле соленоида должно быть больше, чем $B_{thr} = 1$ Тл.

Флуктуации электронного тока от оборота к обороту ведут к переменным во времени квадрупольным ударам, которые приводят к росту поперечного эмиттанса (анти) протонного пучка. Для параметров Tevatron $f_0 = 48$ кГц и $dQ^e = 0,01$, надо иметь $(\delta J_e / J_e) < 0,5 \cdot 10^{-3}$, чтобы получить приемлемое время роста эмиттанса в 10 часов.

Основные технологии и методы электронных линз отработаны и опробованы в протон-антипротонном коллайдере Tevatron в 2001–2011 гг. Основные соответствующие параметры коллайдеров и линз приведены в Таблице 2.

Для Tevatron были построены две электронные линзы (Tevatron Electron Lenses, TEL-1 и TEL-2) и установлены в двух разных местах кольца Tevatron, F48 и A11, в 2001 и 2004 годах, соответственно. Рисунок 2 изображает общую компоновку TEL-2. Электронный пучок генерируется в термоэлектронной пушке, погруженной в соленоидальное магнитное поле. Сильно замедленные электроны ускоряются до энергии 5–10 кВ и следуют вдоль линии магнитного поля в основной сверхпроводящий соленоид, где и происходит взаимодействие со сгустками протонов / антипротонов высокой энергии. В то время, как высокоэнергичные частицы продолжают двигаться по орбите коллайдера,

низкоэнергетические электроны, выходящие из основного соленоида, направляются в коллектор. Линзы TEL-1 и TEL-2 были использованы в трех режимах работы: а) для компенсации эффектов встречи пучков; б) для удаления незахваченных частиц из промежутков между сгустками (bunch trains), а также в) для поперечной коллимации полыми электронными пучками. Были обнаружены три условия, имеющие решающее значение для успешной компенсации эффектов встречи электронными линзами: а) электронный пучок должен быть точно нацелен в поперечном направлении на протонный (антипротонный) пучок, с точностью 0,2–0,5 мм, по всей длине взаимодействия около 2 м; б) флуктуации тока электронов должны быть в пределах одной наносекунды, чтобы минимизировать рост эмиттанса пучков высоких энергий; и в) поперечный профиль плотности тока электронов должен иметь определенную форму, в зависимости от применения, например, распределение с плоским верхом и гладкими краями необходимо для компенсации паразитных эффектов встречи дальнего действия, полый пучок необходим для поперечной коллимации.

Таблица 2. Основные параметры коллайдера Tevatron и, для сравнения, RHIC, и их электронных линз

Параметр	Символ	Значение		Единицы
<i>Электронные линзы</i>		<i>TEL</i>	<i>RHIC</i>	
Энергия e^- (раб./макс.)	U_e	5/10	9,5	кВ
Ток e^- (раб./макс.)	J_e	0,6/3	0,9	А
Поле основного соленоида	B_m	3,1/6,5	5,0	Тл
Поле пушечного соленоида	B_g	0,29	0,3	Тл
Размер пучка в основном соленоиде	a_e	2,3	0,3 (rms)	мм
Радиус катода	a_c	7,5	7,5	мм
Частота импульсов тока	T_0	21	13	мкс
Длиг. импульсов тока, «0-to-0»	T_c	0,6	~0,4	мкс
Длина взаимодействия	L_e	2,0	2,1	м
Макс. сдвиг бетатр. частоты	$dQ_{a,p}^e$	0,009	+0,012	

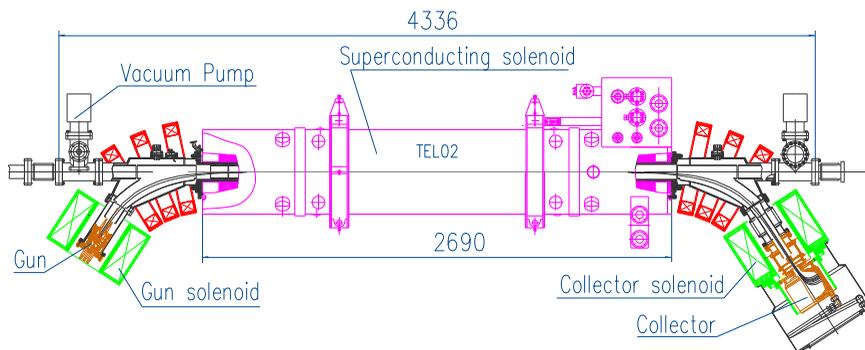


Рисунок 2. Общая схема ЭЛ-2(TEL-2), установленной в секторе A11 Tevatron, вид сверху. Электроны движутся слева направо и взаимодействуют внутри сверхпроводящего соленоида с антипротонами, которые движутся в противоположном направлении, или с протонами, которые движутся в том же направлении

Магнитная система электронной линзы Tevatron имеет три соленоида ориентированных, как показано на Рисунке 2. Пушечный соленоид расположен под углом к орбите Tevatron, главный сверхпроводящий (СП) соленоид окружает вакуумную камеру, а расположение коллекторного соленоида симметрично пушечному. Геометрический центр вакуумной камеры Tevatron точно совмещен с магнитной осью (в центре) основного соленоида. Электроны, происходящие из электронной пушки, следуют магнитным силовым линиям, изогнутым в горизонтальной плоскости. Соленоиды были изготовлены в Институте физики высоких энергий в Протвино, в России и испытаны в Fermilab. Главный соленоид TEL способен достичь максимального поля 6,5 Тл при токе 1780 А и температуре жидкого гелия 4,6–5,3 К.

Пушечный и коллекторные соленоиды используют охлаждаемые водой медные обмотки, которые генерируют максимальное поле около 0,4 Тл на оси при максимальном токе 340 А.

Регулировка траектории электронов TEL внутри основного соленоида по отношению к прямой (анти) протонной орбите необходима в четырех степенях свободы: по положению и углам в горизонтальном и вертикальном направлениях. Шесть сверхпроводящих дипольных корректоров используются для этого. Они расположены на внешней поверхности катушки СП соленоида. Четыре пары длинных катушек длиной 250 мм образуют короткие вертикальные и горизонтальные диполи на каждом конце соленоида. Две пары 2-метровых катушек расположены в центральной области СП соленоида. Короткие катушки при токе 200 А могут перемещать электронный пучок на 40 мм в поле 3 Тл основного соленоида, а длинные катушки способны отклонять траекторию в главном соленоиде на 30 мрад при токе 50 А.

Магниты электронной линзы были разработаны и построены, чтобы быть прямыми и однородными в пределах спецификации, которая позже была подтверждена в специальных измерениях магнитных силовых линий. Высокая плотность тока, быстрая модуляция и требование гладкого профиля плотности тока в ЭЛ привело к выбору электронной пушки с выпуклым катодом, что дает более высокий первеанс и модуляцию тока анодным напряжением (то есть, без сетки). В ходе экспериментальных исследований пучка и эксплуатации TEL-1 и TEL-2 потребовалось иметь несколько разных профилей тока электронов: а) прямоугольное распределения для одинакового сдвига частот для всех частиц высоких энергий, проходящих через электронный пучок — этот профиль имеет недостаток сильного нелинейного воздействия за пределами границ электронного пучка; б) в форме колокола (близко к распределению Гаусса) — оно обладает более слабыми нелинейностями, но меньшим размером пучка; в) «гладкий край и плоская вершина» (SEFT) распределение сочетает в себе преимущества обоих ранее упомянутых распределений; г) полое (трубчатое) распределение электронов пучка для поперечной коллимации. Соответственно, четыре электронные пушки были разработаны для TEL, см. их параметры в Таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры электронных пушек TEL

Параметр	Пушка №1	Пушка №2	Пушка №3	Пушка №4	
Диаметр катода	10	10	15	15	мм
Профиль тока	Прямоуг.	Гауссов	SEFT	Польый	
Первеанс	5,9	1,7	4,2	3,1	мкА/В ^{3/2}
Макс. плотность тока	6,3	4,8	3,0	2,8	мкА/В ^{3/2} /см ²
Напряжение на прикатодном электроде для отсечки тока	2,5	3	3,5	—	$U_{\text{control}}/U_{\text{anod}}$
Мощность ИП катода	35–45	35–45	60–70	60–70	Вт
В-поле на катоде	1–4	1–4	1–4	1–4	Тл

Электронные пушки были смоделированы и оптимизированы с помощью программы UltraSAM, чтобы иметь желаемое распределение плотности тока и высокой первеанс. Пушки используют сферические катоды с углом открытия ± 45 градусов. Прикатодный электрод («управляющий электрод») устанавливается вокруг катода пушки для манипулирования распределением плотности тока пучка. Механически, все три пушки выглядят одинаково, как показано на Рисунке 3. Они собираются на вакуумном фланце диаметром 171,5 мм

(6³/₄ дюйма) из нержавеющей стали и используют керамические кольца в качестве изоляторов между электродами. Пушки используют сферические выпуклые диспенсерные катоды Heatwave Labs (Watsonville, CA) диаметром не менее 10 или 15 мм. Вольфрамовые катоды импрегнированы барием и работают при температурах 950–1200 °С. Они оснащены Mo-Re гильзами и молибденовым монтажным фланцем, и имеют внутреннюю нить накала нагревателя (бифилярная вариант, один провод нагреватель внутренне заземлен). Прикатодные электроды выполнены из молибдена, в то время как управляющие электроды и аноды изготовлены из бескислородной меди.

Электронный ток пушек TEL был импульсным и мог быть синхронизирован с практически любым сгустком или группой сгустков в Tevatron. Профили тока контролировались прикатодными электродами и при необходимости специально измерялись на стенде, см. Рисунок 3 (б).

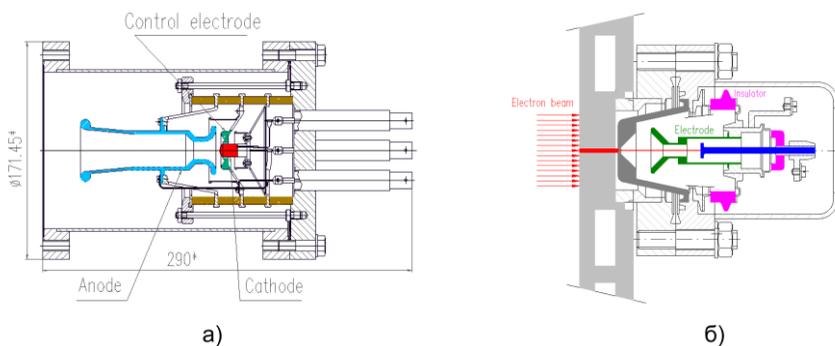


Рисунок 3. а) механическая конструкция пушки TEL; б) система измерения распределения плотности электронного тока пучка для пушек TEL.

В коллекторе электронного пучка TEL магнитное поле конфигурируется так, чтобы силовые линии в коллекторном соленоиде расходились, и электроны, следуя линиям поля, поглощались на гораздо большей площади медного коллектора. Вода охлаждения поступает в коллектор, где проходит через каналы внутри меди и снимает до 50 кВт тепла. Первеанс коллектора может быть оценен, как 9,2–13,6 μP . Пучок электронов в TEL может быть сгенерирован с помощью простой схемы с рециркуляцией мощности.

Эффекты встречи являются уникальными для каждого протонного или антипротонного сгустка в Tevatron, и, соответственно, их компенсация требует варьировать электронные токи, подготовленные для каждого сгустка. Всего есть 1113 ВЧ сепаратрис вдоль орбиты Tevatron (частота ВЧ 53 МГц, частота обращения 47,7 кГц), но только 36 из них заселены протонными сгустками и 36 антипротонными сгустками. Для каждого типа частиц заселенные сепаратрисы расположены в трех цепочках (bunch trains) по двенадцать сгуст-

ков в каждой. Общая длина каждого состава составляет около 4,5 мкс. Расстояние между ними 2,6 мкс. Расстояние между сгустками 396 нс. Длина взаимодействия в TEL составляет около 2 метров, что эквивалентно 33 нс времени прохождения для электронов 10 кВ ($\beta_e = 0,2$). (Анти) протонный пучок входит в пространство взаимодействия линзы, когда она уже заполнена электронами. (Анти) протонам с $\beta = 1$ требуется всего 6 нс, чтобы пройти через TEL. После того как последняя частица сгустка (анти)протонов оставляет пространство взаимодействия, можно отключить электронную пушку. Принимая во внимание также длину (анти) протонного пучка — около 10 нс — минимальная плоская вершина импульса напряжения пушки TEL составляет около 50 нс. В Tevatron все пучки проходят через одну и ту же вакуумную камеру и, в идеале, для того, чтобы TEL действовала на только один тип частиц, общая длительность импульса электронов должна быть ограничена до менее чем 400 нс. Помимо импульсов электронного тока, нужных для компенсации паразитных эффектов встречи, дополнительные импульсы электронов требуются в промежутках между составами сгустков для удаления частиц пучка, незахваченных системой ВЧ. Таким образом, система в идеале должна производить 39 импульсов в течение каждого периода обращения частиц в Tevatron (каждые 21 мкс). Требуемая модуляция тока осуществляется путем изменения полного анодного напряжения 5–10 кВ, и для этого были разработаны и испытаны несколько различных типов высоковольтных анодных модуляторов для TEL.

TEL оснащены четырьмя мониторами положения пучка (пикап-электроды, ДПП): по одному по вертикали и горизонтали, в начале и в конце основного соленоида. С их помощью вычисляются координаты одновременно для всех трех пучков. Измерения за сотню оборотов дают достаточно хорошую статистическую погрешность измерения положения $\approx 10\text{--}20$ мкм от минимума до максимума.

В третьей главе обсуждается применение электронных линз для компенсации последствий эффектов встречных взаимодействий пучков в коллайдерах: лоб в лоб (head-on) и паразитных (long-range).

Взаимодействие пучков протонов и антипротонов в Tevatron происходит в двух местах лобовых столкновений, расположенных в секторах В0 и D0, и в 70-паразитных местах встречи, где орбиты пучков, как правило, разделены примерно на десяток их среднеквадратичных размеров. В целом, эффекты встречи в ускорителе Tevatron характеризуются сложной смесью последствий дальнего действия и лобового взаимодействия, параметры сдвига частоты из-за встречи лоб в лоб $\xi^p = 0,020$ для протонов и $\xi^a = 0,028$ для антипротонов, дополнительные сдвиги из-за ПЭВ $\Delta Q^p = 0,003$ и $\Delta Q^a = 0,006$, соответственно, а также проявляются существенные различия в динамике отдельных сгустков. Бетатронные частоты Q_x , Q_y являются одними из наиболее важных параметров для динамики пучков в ускорителях, и они могут быть уравнены и

правильно отрегулированы к наиболее оптимальным значениям с помощью электронных линз с модулированными электронными токами.

Очевидно, что две электронные линзы — одна в месте с горизонтальной бета-функции большей, чем вертикальной $\beta_x \gg \beta_y$, а другая в месте, где $\beta_y \gg \beta_x$, совместно могут скомпенсировать любой разброс и уравнивать обе вертикальные и горизонтальные частоты одновременно. Первая из них будет производить больший сдвиг горизонтальной частоты, а вторая — вертикальной. Именно так и расположены две электронные линзы в Tevatron (TEL) в секторах F48 и A11: первая TEL-1 установлена в секторе F48, где горизонтальная бета-функция $\beta_x = 104$ м много больше вертикальной бета-функции $\beta_y = 29$ м и, соответственно, в основном влияет на горизонтальные частоты; в то время как TEL-2 поместили в секторе A11, где $\beta_y = 150$ м и $\beta_x = 68$ м, таким образом она влияет на вертикальную частоту сильнее. Следует отметить, что электронные пучки имеют круглую форму в обеих ЭЛ. В результате применения правильно вычисленных токов в ЭЛ для индивидуальных сгустков будет то, что все частоты частиц всех сгустков станут одинаковыми и могут теперь перестраиваться одновременно обычными методами коррекции частот коллайдера. Это и есть цель КПЭВ (или «линейной» компенсации, т. к. радиальные электронные силы объемного заряда электронов в этом случае почти линейно зависит от радиуса).

В серии первых пучковых экспериментов с электронными линзами для характеристики измерялись зависимости бетатронных частот протонов от тока электронного пучка, его энергии и положения, а также оценивались эффекты, возникающие из-за дефектов и шумов электронного пучка, а также влияния профиля плотности тока электронов на потери пучка в Tevatron.

После правильной синхронизации электронов для достижения максимального эффекта, была изучена зависимость dQ_x , dQ_y от пикового тока электронов и от положения электронного пучка, см. Рисунок 4.

Экспериментально наблюдаемые сдвиги бетатронных частот 980 ГэВ протонов и антипротонов, вызываемые TEL, неплохо согласуются с теоретическими предсказаниями уравнения (5).

Значительный процент естественной убыли протонов из-за их взаимодействия с антипротонным пучком, как в основных, так и в многочисленных паразитных местах встречи является одним из наиболее пагубных эффектов в Tevatron. Этот эффект особенно велик в начале заходов, где общий сдвиг частоты из-за ЛЭВ в двух местах (B0 и D0) может достигать значений +0,020. При этом сгустки протонов под номером 12, 24 и 36 в конце каждой цепочки сгустков, как правило, теряли около 9 % от их интенсивности в час, в то время как другие сгустки только от 4 % до 6 % в час. Эти потери являются очень важной частью общей скорости распада светимости — примерно 20 % в час (опять же, в начале заходов с высокой светимостью).

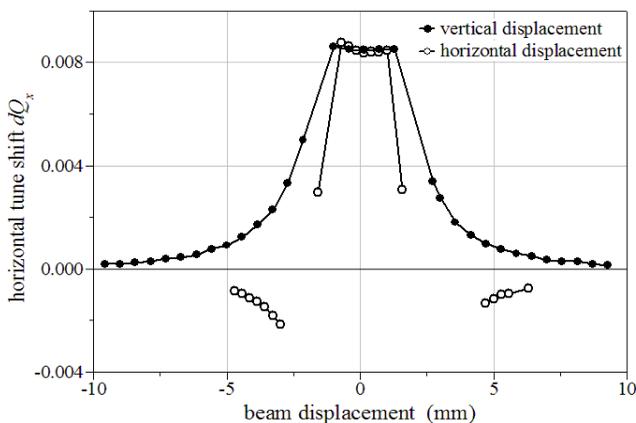


Рисунок 4. Сдвиг бетатронной частоты 980 ГэВ протонов индуцированный TEL-1 — вертикальной (черные точки) и горизонтальной (кружки) — в зависимости от горизонтального смещения пучка электронов с $J_c = 1$ А, $U_c = 6,0$ кВ (электронная пушка с прямоугольным профилем тока)

Главным источником протонных потерь является взаимодействие с антипротонами. Высокий уровень потерь для сгустков 12, 24, 36, и это связано с распределением частот бетатронных колебаний вдоль цепочки сгустков. Сгустки в конце цепочек имеют свои вертикальные бетатронные частоты ближе к резонансам $7 / 12 \approx 0,583$, см. Рисунок 1, и, следовательно, более высокие потери. Средняя частота для Tevatron — Q_y около $0,588-0,589$ — лежит чуть выше этого резонанса, и сгустки в конце каждой цепочки, чьи вертикальные частоты ниже на $\Delta Q_y = -(0,002-0,003)$ в связи с уникальным набором дальних взаимодействия, подвержены более сильным ПЭВ. Средние Q_y , Q_x в коллайдере тщательно оптимизированы, чтобы минимизировать общие потери интенсивности и светимости. Например, увеличение средней вертикальной частоты квадрупольными корректорами не представляется возможным, поскольку оно, как правило, приводит к увеличению потерь и росту эмиттанса при опасной близости к резонансу $3/5 = 0,600$.

Электронный пучок TEL-2 фокусирует протоны и, таким образом, дает положительный вертикальный сдвиг частот пропорциональный электронному току для сгустков протонов, на которые TEL-2 действует и, следовательно, он должен уменьшить потери.

В одном из самых первых демонстрационных экспериментов по КПЭВ, электронный импульс тока TEL-2 был настроен на P12 (протонный сгусток №12), не затрагивая другие сгустки. Рисунок 5 (слева) показывает, что, когда

ток TEL был увеличен до 0,3 А, то время жизни $\tau = N_p / (dN_p / dt)$ P12 поднялось от начального значения $8,75 \pm 0,1$ часа до $17,4 \pm 0,1$ ч (другими словами, коэффициент потерь $1/\tau$ улучшился в два раза по сравнению с примерно 11,4 %/ч до около 5,7 %/ч). В то же время, время жизни сгустка P24, эквивалентного сгустка в другой цепочке сгустков, остается на том же низком уровне и существенно не изменилась (начала 8,66 часов, потом несколько улучшилось до 10 часов по естественным причинам). TEL был оставлен на P12 в течение первых 1,5 часов захода и спад интенсивности этого конкретного сгустка был одним из самых низких среди всех 36 протонных сгустков — как показано на Рисунке 5 (справа), который представляет уровни потерь, за вычетом распада из-за светимости $(dN_p / N_p)_{NL} / dt = (dN_p / N_p)_{total} / dt - \sigma_{int} L / N_p$. Следует отметить, что сдвиг частоты протонов по вертикали при таком умеренном токе электронов $J_e = 0,3$ А составляет около $dQ_y^e = +0,0007$.

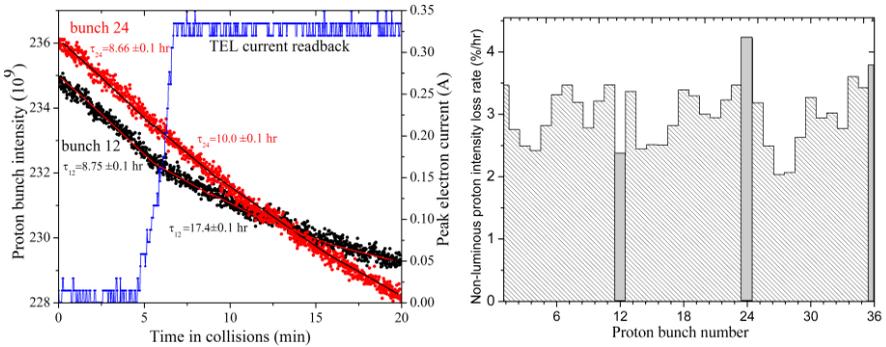


Рисунок 5. (слева) скорости уменьшения интенсивности сгустка протонов номер 12 под действием TEL-2 и контрольного сгустка 24 в начале захода по. 5123 с исходной светимостью $L = 197 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Скачком показан измеренный пиковый ток TEL-2; (справа) средние скорости потери интенсивности сгустков в первые 1,5 часа захода за вычетом распадов частиц из-за светимости

Для того, чтобы изучить более детальные эффекты электронной линзы, другая серия исследований по КПЭВ была проведена в заходе по. 5183 с одной из самых высоких светимостей коллайдера Tevatron, в котором TEL-2 работала в режиме постоянного тока с $J_e = 0,3$ А — обеспечивая тот же эффект на все протонные сгустки в пучке — и которая регулярно выключалась и включалась. Когда TEL-2 была включена в самом начале захода (store), она улучшила время жизни интенсивности всех сгустков, как это представлено на Рисунке 6.

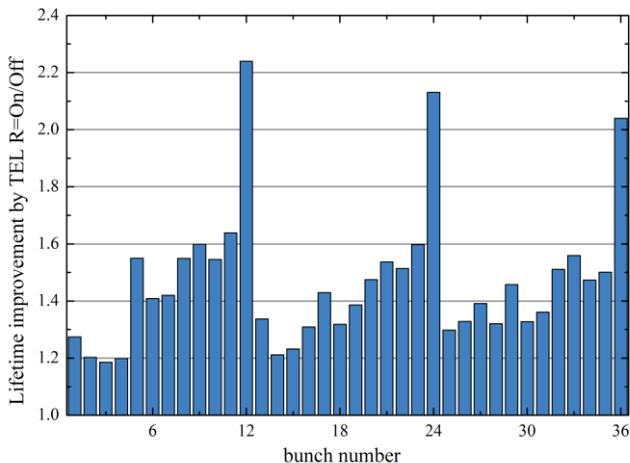


Рисунок 6. Улучшение времени жизни сгустков протонов из-за TEL-2 (DC режим) в начале захода по.5183 с начальной светимостью $L = 253 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Помимо значительного сокращения темпов потери интенсивности протонов, время жизни светимости $\tau_L = L/(dL/dt)$ тоже было улучшено из-за TEL-2 на 10–12 % в начале захода, что приводит к пропорциональному увеличению интегральной светимости.

Основные итоги пионерских исследований компенсации паразитных эффектов встречи с электронными линзами в Tevatron можно подвести следующим образом:

а) результаты исследований показывают, что сдвиг частот протонов и антипротонов из-за электронных линз следует предсказаниям и уравнению (5). Обе электронные линзы — TEL-1 и TEL-2 — действительно производят очень сильное положительное влияние на время жизни протонных сгустков в Tevatron, которые в противном случае больше всего страдают от столкновений с антипротонами. Наблюдаемое улучшение времени жизни протонов в начале захода коллайдера (когда яркость пучков и светимость являются самыми высокими, а взаимодействие самым сильным) может быть более 2. Эти улучшения видны только в первые 10 часов в заходах, после чего ПЭВ и эффекты и выгоды ЭЛ уменьшаются до незначительных уровней. Эффект КПЭВ оказывается зависимым от настроек, но в целом несколько превосходит улучшения от коррекции бетатронных частот традиционными методами. Следует отметить, что различие между двумя электронными линзами — угол изгиба траектории электронов составляет 90 градусов в одной из линз и 57 градусов в другой — существенно не влияет на эффект снижения потерь протонов обеими линзами;

б) экспериментально было показано, что для успешной работы электронных линз нужно плавное поперечное распределение плотности тока электронов, без резких краев, и хорошее нацеливание электронного пучка на протоны (или, если требуется, на антипротоны) — в пределах доли среднеквадратичного размера пучка протонов или антипротонов; а также низкие шумы и пульсации в токе и положении электронного пучка.

в) мы не видели каких-либо признаков когерентных неустойчивостей из-за взаимодействия пучка (анти) протонов с электронным пучком, несмотря на первоначальные опасения.

Результатом лобового взаимодействия пучков является не только сдвиг (анти) протонной бетатронной частоты $\xi = N_p r_p / 4\pi\epsilon$, но и разброс частот, зависящих от амплитуды бетатронных колебаний J_x, J_y . Эффект, обусловленный гауссовским электронным пучком будет иметь ту же функциональную зависимость от амплитуды, но знак, противоположный знаку от столкновения с протонами. В первоначальном предложении по нелинейной компенсации пучка компенсация двух эффектов для всех частиц пучков высоких энергий предполагалась точной и, следовательно, равной нулю или близкий к нулю разброс бетатронных частот $dQ_{x,y}^p(J_x, J_y) + dQ_{x,y}^e(J_x, J_y) = 0$. Из этого можно заключить, что такая компенсация требует соблюдения двух условий: а) эффективное число электронов в ЭЛ равно числу протонов $N_e^* = J_e(1 + \beta_e)L_e / (ec\beta_e) = N_p$; и б) электронный пучок должен иметь тот же поперечный размер, что и пучок протонов в месте расположения ЭЛ $\sigma_e = (\epsilon\beta_{e-lens}/\gamma_p)^{1/2} = \sigma_{p,e-lens}$, здесь β_{e-lens} обозначает бета-функцию в электронной линзе. Обратите внимание, что второе условие допускает установку электронной линзы по существу, в любом месте в кольце, и, в частности, вне основных мест встречи, которые обычно заняты детекторами частиц. Кроме того, было бы полезно устанавливать линзы в местах с большими бета-функциями, где размер σ_e побольше и легче обеспечить необходимую плотность тока электронов $j_e \sim N_e / \sigma_e^2$. Считалось, что именно большой разброс частот в пучке $\sim \xi$ делает невозможной работу коллайдеров с высокой интенсивностью в оперативном пространстве доступных частот между основными нелинейными резонансами — например, размер доступной области $\delta Q \approx 0,028$ в Tevatron с рабочей точкой между резонансами 10 и 7-го порядка $Q_{x,y} = 6/10$ и $Q_{x,y} = 4/7$, или $\delta Q \approx 0,033$ в LHC между $Q_{x,y} = 3/10$ и $Q_{x,y} = 1/3$ — поэтому компенсация разброса соответствующими электронными линзами при выполнении условий а) и б) позволит увеличить максимально возможные интенсивности протонов, и, следовательно, светимость.

Исторически первое экспериментальное подтверждение эффективности нелинейной компенсации было получено в начале работы Tevatron — Collider

Run II, когда электронная линза использовалась для подавления роста эмиттанса антипротонных пучков. Следует отметить, что, хотя профиль электронного пучка и был гауссовым, TEL-1 предназначалась для компенсации ПЭВ и, следовательно, была установлена в месте с очень разными вертикальными и горизонтальными бета-функциями, с не нулевой дисперсией и при неидеальном набеге фазы бетатронных колебаний от основных мест встречи, т. е. условия были далеки от идеальных для КЛЭВ.

TEL-1 была использована в начале нескольких заходов для уменьшения роста эмиттанса в течение первого получаса столкновений. Цель состояла в том, чтобы значительно уменьшить рост эмиттанса конкретного сгустка по отношению к его «родственным» сгусткам (эквивалентные сгустков в двух других цепочках). На Рисунке 7 представлена эволюция вертикальных среднеквадратичных размеров трех антипротонных пучков (9, 21 и 33) в течение первых 34 минут после «инициации столкновений» в заходе 2540 (13 мая, 2003). TEL действует только на A33. Размер сгустка измеряли с помощью монитора синхротронного излучения. Соответствующий рост эмиттанса был $0,68 \pm 0,06 \pi$ мм мрад/ч для антипротонного сгустка A9, $0,37 \pm 0,07 \pi$ мм мрад/ч для A21, но только $0,16 \pm 0,07 \pi$ мм мрад/ч для A33, как это показано на подгоночных прямых Рисунка 7. В ходе этого эксперимента, TEL-1 имела ток 0,6 А, энергию 4,5 кВ и среднеквадратичный размер пучка 0,8 мм. Учитывая длину взаимодействия 2,0 м, ожидаемый максимальный сдвиг горизонтальной антипротонной частоты был $-0,004$, а вертикальной $-0,001$. Через 34 минуты TEL1 была выключена, и скорость роста эмиттансов всех трех сгустков выравнивалась.

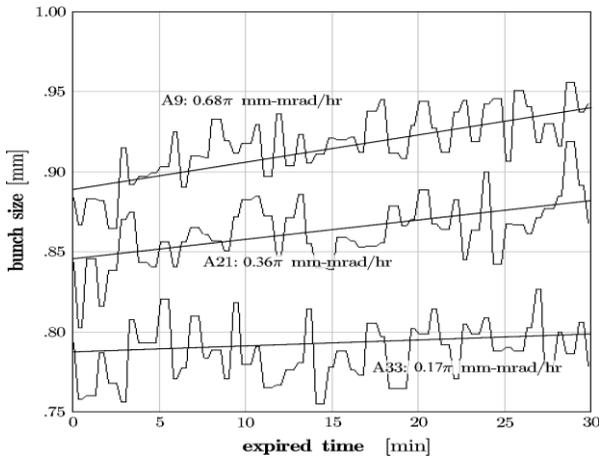


Рисунок 7. Эволюция вертикальных размеров антипротонных сгустков в течение первых 30 минут захода по. 2540. Представлены вертикальные размеры девятого сгустка в каждой из трех цепочек: 9, 21 и 33. TEL-1, с гауссовым электронным пучком, действует только на сгусток A33

Впоследствии, две Гауссовы электронные линзы были успешно использованы для частичной компенсации эффектов встречи в коллайдере RHIC, работавшим в режиме столкновения двух 100 ГэВ поляризованных протонных пучков в 2015 году. Это привело к увеличению пиковой светимости на 150 % и средней светимости на 90 %.

Тема эффективной компенсации эффектов встречи для проекта High Luminosity LHC Upgrade активно обсуждается сейчас, и уже проведены несколько конференций по этому вопросу.

В четвертой главе обсуждается применение электронных линз для коллимации поперечного и продольного гало пучка. Коллимация пучков стала одной из самых сложных проблем для сверхпроводящих адронных коллайдеров высоких энергий. SSC, Tevatron, RHIC, LHC, и все предполагаемые будущие суперколлайдеры ставят решение этого вопроса в основу своих проектов. Требование высокой светимости приводит ко все возрастающей мощности пучков и ко все меньшей площади поперечного сечения пучков частиц все более и более высоких энергий. Даже малые потери циркулирующего пучка могут привести к катастрофическим последствиям из-за повреждения ускорителя и детекторов, если они не будут тщательно контролироваться. Рекордная плотность мощности (мощности на единицу площади пучка) делает чрезвычайно сложной задачей коллимацию таких пучков. После того, как в Tevatron впервые продемонстрирована коллимация поперечного и продольного гало адронных пучков с помощью электронных пучков, электронные линзы в настоящее время рассматриваются как дополнительный, очень гибкий и эффективный элемент системы коллимации всех будущего адронных коллайдеров высоких энергий.

Идеальный круглый полый электронный пучок не имеет электрических или магнитных полей внутри себя и генерирует сильные нелинейные поля снаружи. Если таким электронным пучком окружить циркулирующий пучок (анти) протонов, то он будет толкать частицы гало в поперечном направлении и оставить ядро пучка невозмущенным. Скорость диффузии частиц гало может быть значительно повышена, если электронный ток изменяется во времени, случайным образом или в синхронизации с бетатронными колебаниями. Типичное значение углового удара за границей трубчатого пучка, достижимого в суперколлайдерах, порядка 0,3 мкрад, что значительно меньше, чем среднеквадратичный угол, вызываемый прохождением первичных коллиматоров этих коллайдеров $\theta_{\text{coll}} \approx 17$ мкрад в Tevatron (5 мм вольфрама) или 3,4 мкрад в LHC (0,6 м углерода). Коллимация трубчатым электронным пучком (КТЭП) является эффективной потому, что она работает «мягко», в течение многих оборотов: действительно, всякий раз, когда частица пересекает границу электронного пучка, она получает небольшой радиальный удар.

Система электронного пучка для КТЭП похожа на другие электронные линзы, т. е. используются электронная пушка с полым тепловым катодом, система магнитов для сжатия размера пучка, коллектор электронов и т. д.

Ввиду функциональной гибкости управления током электронов, можно представить себе три типа усиления диффузии: а) с постоянным электронным током; б) с током, и, следовательно, ударом, который случайным образом меняется от оборота к обороту; и в) с электронным током, меняющемся в резонанс с бетатронными колебаниями частиц. В первом случае, стационарные поля электронного пучка, имеющие сильные нелинейности приводят к появлению нелинейных резонансов точно так же, как и эффекты встречи, так что частицы гало медленно диффундируют в сторону все больших амплитуд и перехватываются коллиматорами. Значительно более высокие темпы удаления частиц гало могут быть достигнуты в системе со случайными флуктуациям ударов $\theta_{\max}(t)$. Этого вполне достаточно для самых реалистичных эксплуатационных требований, но если все же необходима гораздо более быстрая очистка гало, то может быть использован и метод резонансного возбуждения.

Электронные линзы в Tevatron, хотя и не идеально подходят для КТЭП из-за их U-образной формы, а не прямой геометрии, но, тем не менее, дали возможность проведения первоначальных экспериментальных исследований концепции коллимации полым электронного пучка. Соответствующие исследования были проведены в Tevatron в период с октября 2010 года по сентябрь 2011 года и завершились успешной демонстрацией этого нового метода управления гало. В TEL, электронный пучок генерируется в импульсной 5 кВ электронной пушке и транспортируется вдоль силовых линий магнитного поля. Его размер в области взаимодействия контролируется путем изменения соотношения между магнитными полями, в основном соленоиде и пушечном соленоиде. Частицы гало испытывают нелинейные поперечные удары и диффундируют к коллиматорам. Как было отмечено выше, в условиях осесимметричного распределения тока нет электрических или магнитных полей внутри полого электронного пучка, и основная часть циркулирующего пучка антипротонов остается невозмущенной, в то время как частицы в гало 980 ГэВ антипротонного пучка получают радиальный удар до 0,3 мкрад (при пиковом электронном токе 1 А, длиной 2 м и радиусом отверстия 3 мм). Специально была спроектирована и построена электронная пушка с полым оксидно-вольфрамовым катодом диаметром 15 мм и отверстием диаметром 9 мм, просверленным по оси его выпуклой поверхности. Пиковый ток составляет 1,1 А при напряжении 5 кВ. Пушка была установлен в одной из электронных линз Tevatron (TEL-2) в августе 2010 года. Импульс электронного пучка может быть синхронизирован с практически любой цепочкой или группой сгустков. Эксперименты проводились с пучком электронов, действующим на выбранные антипротонные сгустки с тем же самым электронным током на каждом обороте («непрерывный режим работы», аналогичный режиму постоянного тока, обсуждаемому выше, но только для одного или нескольких сгустков).

Эффект удаления гало можно было наблюдать также путем сравнения потерь интенсивности пучка с соответствующим уменьшением светимости. Све-

тимостью пропорциональна произведению интенсивностей антипротонов и протонов, а также обратно пропорциональна эмиттансу пучка $L \sim N_a N_p / \varepsilon$, поэтому, можно было бы ожидать, что если антипротоны удаляются равномерно, неизбирательно, а другие факторы остаются неизменными, то светимость должна уменьшаться на ту же относительную долю $\Delta L/L = \Delta N_a / N_a$. Если полный пучок вызывает рост эмиттанса или потери протонов, то светимость должна уменьшиться еще больше. Но в действительности наблюдалось обратное — относительное изменение светимости было намного меньше, чем изменение интенсивности, что является явным признаком коллимации гало, т. е. тех частиц, которые не вносят вклада в светимость. Кроме того, соотношение между скоростями уменьшения светимости и уменьшения распада интенсивности возросло с уменьшением размера отверстия электронного пучка.

Благодаря значительно улучшенной диффузии частиц гало, КТЭП уменьшает интенсивность гало и тем самым значительно уменьшает влияние вибраций орбиты.

Естественно, что расширение метода КТЭП на ЛНС активно исследуется в последнее время и уже признана многообещающей и нужной для проекта High Luminosity LHC Upgrade. Частицы, не захваченные системой ВЧ ускорителя, и, следовательно, не синхронизированные с ней, представляют собой серьезную угрозу для суперколлайдеров, так как они могут привести к квенчу сверхпроводящих магнитов во время ускорения или при сбросе пучка. Есть несколько механизмов появления таких незахваченных частиц. Например, в Tevatron на стадии инжекции из Main Injector при использовании метода «совмещения» (coalescing), как правило несколько процентов 150 ГэВ частиц остаются за пределами ВЧ сепаратрис. Эти частицы переходят и в Tevatron. Кроме того, однократное рассеяние внутри пучка (эффект Тушека), диффузия из-за многократного рассеяния внутри пучка (IBS), и шумов фазы и амплитуды ВЧ-напряжения, выбивают частицы из ВЧ сепаратрисы. На энергии эксперимента (после ускорения) генерация незахваченных частиц идет в основном из-за шума ВЧ и из-за IBS, в редких случаях — из-за продольных неустойчивостей. Незахваченные частицы пучка находятся за пределами ВЧ сепаратрис и перемещаются в продольном направлении по отношению к основным сгусткам. В отличие от ситуации на энергии инжекции 150 ГэВ, где потери энергии из-за синхротронного излучения (СИ) практически ничтожны, на полной энергии протоны или антипротоны теряют заметную энергию за счет СИ, например, около 9 эВ/оборот в Tevatron и 560 эВ/оборот в ЛНС при 7 ТэВ. Для незахваченных частиц пучка, эта потеря энергии не пополняется за счет системы ВЧ, поэтому они медленно движутся по спирали в радиальном направлении внутрь и погибают на коллиматорах. Типичное время для попадания на коллиматор составляет около 20 минут в Tevatron и несколько минут в ЛНС.

Было установлено, что наиболее эффективным средством для устранения этих частиц являются электронные линзы (TEL). У TEL есть два преимущества: а) электронный пучок проходит в непосредственной близости от орбит

протонов или антипротонов и создает очень сильный поперечный удар; б) ток ЭЛ обладает коротким временем нарастания и спада удара (~100 нс), так что он может быть легко отрегулирован так, чтобы работать в различных схемах пульсации.

Первая TEL-1 была установлена в Tevatron в 2001 году и уже в начале 2002 года, было показано, что она очень эффективно удаляет незахваченные протоны при настройке по времени в промежуток между цепочками сгустков («зазор»), предназначенный для срабатывания импульса кикера сброса пучка, и если работает в резонансном режиме возбуждения. Например, во время типичной работы, цепочка из трех электронных импульсов тока генерируется каждый 7-й оборот с целью возбуждения резонанса 4/7 для наиболее эффективного удаления незахваченных частиц из пучка протонов.

Процесс удаления незахваченных частиц был продемонстрирован в эксперименте, в котором TEL была выключена на примерно 30 минут, а затем включена снова, как показано на Рисунке 8. Около $15 \cdot 10^9$ частиц были удалены из зазоров TEL примерно за $\tau_{TEL} = 3$ мин, а скорость потерь плавно вернулась к равновесному значению.

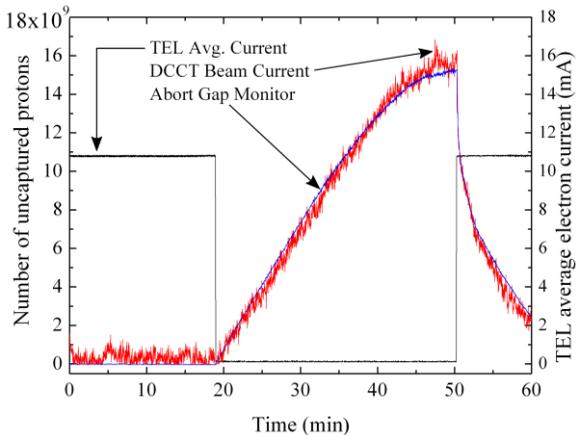


Рисунок8. Накопление незахваченных в ВЧ сепаратрисы частиц и их удаление с помощью TEL-1. Линия «TEL Avg. Current» представляет собой среднее значение тока TEL-1; «DCCT Beam Current» линия — интенсивность незахваченных частиц по измерениям DCCT; также показана интенсивность незахваченных частиц по измерениям их СИ с помощью Abort Gap Monitor (гладкая линия)

Характерное время, необходимое для того чтобы 980 ГэВ частицы потеряли достаточно энергии из-за СИ и выпали на коллиматор, составляет около $\tau_{SR} = 20$ мин, поэтому TEL уменьшает интенсивность накопленных незахваченных частиц примерно как τ_{TEL} / τ_{SR} , то есть, примерно на порядок.

В пятой главе обсуждается применение электронных линз для компенсации пространственного заряда и других приложений. Уникальные свойства и гибкость электронных линз позволяют использовать их во многих других важных приложениях в ускорителях помимо компенсации эффектов встречи и коллимации. В число наиболее активно изучаемых и разрабатываемых идей и предложений входит компенсация эффектов пространственного заряда (КЭПЗ) ЭЛ в протонных ускорителях высокой интенсивности, в том числе в инжекторах супер-коллайдеров; достижение интегрируемой нелинейной динамики пучка для подавления образования гало и потерь частиц в протонных кольцах с пучками высокой яркости; селективный медленный вывод частиц из ускорителей; компенсацию эффектов встречи в e^+e^- коллайдерах и электрон-ионных коллайдерах, систему для создания разброса частот для затухания Ландау и подавления когерентных неустойчивостей пучков, и «пучок-пучковый кикер».

Термин «эффекты пространственного заряда» охватывает целый ряд важных явлений в ускорителях, происходящих из собственных полей пучков заряженных частиц. Силы в параллельном потоке зарядов включают отталкивание из-за собственного электрического поля $E(r)$ и притяжение из-за собственного магнитного поля, которое меньше, чем первое на коэффициент $\beta = v/c$. Полученная результирующая сила отталкивания (расфокусировки) как правило зависит от плотности заряда n_p и релятивистских факторов как $F(r) = e(E(r) - \beta B(r)) = eE(r) \times (1 - \beta^2) \sim n_p / \gamma^2$. В зависимости от силы этих полей и временных масштабов, последствия могут включать в себя очень быстрое расширение пучка и потери частиц в источниках частиц или линаках, опасный рост эмиттанса, деградацию яркости пучка и развитие гало, дающие ограничения производительности, неустойчивости и потери в системах, работающих в течении сотен или тысяч оборотов (циклотроны, синхротроны), и сокращение продолжительности жизни и сложной нелинейной динамики пучков в накопителях и ускорителях, работающих в течение многих миллионов оборотов.

Перспективным подходом является компенсация положительного заряда пучка протонов отрицательным пространственным зарядом неподвижных или низкоэнергетических электронов. Если профили зарядов протонов и электронов функционально одинаковы, например, гауссовы, то для компенсации требуется только относительно небольшое число электронов $\eta = N_e / N_p \approx 1 / \gamma_p^2$. Электронные линзы, в которых электронный пучок генерируется извне с уже нужным поперечным распределением и сталкивается с пучком протонов внутри сильного соленоида, были предложены для эффективной и контролируемой компенсации эффектов пространственного заряда в протонных кольцах высокой интенсивности. Протоны, проходящие через электронный пучок,

испытывают фокусировку, которая имеет знак, противоположный силе собственного дефокусирующего пространственного заряда и может или точно полностью, или частично компенсировать последний, если:

- 1) поперечный профиль электронного заряда $n_e(r)$ имеет такой же профиль, как и у пучка протонов,
- 2) интегральное воздействие электронов равно общему воздействию пространственного заряда протонов по периметру кольца,
- 3) временная структура силы пространственного заряда электронов совпадает с силой пространственного заряда протонов.

Первое условие может быть удовлетворено без особых трудностей: профиль электронного пучка можно контролировать специальными электродами в электронной пушке и посредством магнитной компрессии, чтобы соответствовать профилю и размеру протонного пучка $\sigma_{e,r}^2 = \sigma_{p,r}^2 = \varepsilon_p \beta_p \gamma_p \beta_r$ — точно так же, как и в электронных линзах для компенсации эффектов встречи, например, в TEL. Поперечная жесткость электронного пучка в соленоидальном магнитном поле в области взаимодействия эффективно предотвращает искажения профиля электронного пучка под воздействием протонов. На практике электронный пучок ЭЛ может занимать лишь малую часть периметра кольца C . Если предположить, что общая длина всех электронных линз $L = N_{EL} L_{EL}$, то условием (частичной) компенсации в среднем будет $\Delta Q_{EL} = -\Delta Q_{SC} \times \kappa$, где κ — степень компенсации. Это дает следующее требование на электронный ток в каждой линзе:

$$J_e = \frac{B_f e c N_p}{L_{EC}} \frac{\beta_e}{\gamma_p^2 \beta_p^2 (1 - \beta_e \beta_p)} \kappa \quad (8)$$

Здесь B_f — фактор бунчировки протонов, определенный как отношение максимального к среднему току в пределах одной сепаратрисы ВЧ. Два фактора определяют количество необходимых электронных линз — во-первых то, что более короткие электронные линзы позволяют добиться лучшего соответствия временного профиля воздействия электрона к короткому импульсу тока протонного сгустка, во-вторых, более высокая степень периодичности фокусирующей оптики кольца помогает улучшить одно-частичную и коллективную стабильность. Оба эти эффекта требуют большего числа N_{EL} с более короткой длиной L_{EL} , см. Таблицу 4.

Экспериментальная демонстрация компенсации эффектов пространственного заряда с электронными линзами является одной из ключевых целей программы на ускорителе IOTA (Integrable Optics Test Accelerator), который строится в Fermilab для проведения уникальных тестов, которые заложат основу для новых концепций проектирования высокоинтенсивных машин. Коллективные поперечные неустойчивости пучков создают серьезную угрозу работе адронных суперколлайдеров и устанавливают жесткие ограничения на

интенсивности пучков протонов. Есть несколько способов, чтобы подавить эти неустойчивости и одним из наиболее эффективных является затухание Ландау, которое требует введения разброса бетатронных частот $\delta Q_{x,y}$, как правило, порядка нескольких тысячных (0,001). До сих пор наиболее широко используемым методом реализации этого было применение октупольных магнитов, которые генерируют разброс, пропорциональный квадрату амплитуды частиц $\delta Q_x \sim x^2$. Однако этот метод имеет серьезные ограничения. Например, силы существующих октупольных корректоров в ЛНС не всегда достаточно для поддержания стабильности выше определенной интенсивности сгустков протонного пучка. Более того, даже при их максимальной силе, октуполи значительно уменьшают динамическую апертуру машины и время службы пучка. Причиной этого, является то, что введение требуемого разброса октуполями сразу приводит к значительным нелинейным полям для частиц с большими амплитудами. Чтобы избежать такой деградации времени жизни, автором было предложено использовать электронные линзы, которые будут обеспечивать разброс частот исключительно в ядре пучка, не ухудшая динамики частиц в поперечном гало. В Таблице 5 приведены параметры электронной линзы, которая позволит получать разброс в ЛНС до $\delta Q_{EL} \approx 0,004$ и, таким образом, стабилизировать с помощью затухания Ландау протонный сгусток двойной — по сравнению с проектной — интенсивности около $2,3 \cdot 10^{11}$ протонов. Принимая во внимание гибкость электронных линз, видно, что они могут быть эффективно использованы для стабилизации пучка протонов на всех этапах работы коллайдера — при инжекции, при ускорении, во время процесса сжатия бета-функций и, при необходимости, при столкновениях.

Таблица 4. Основные параметры электронных линз для компенсации пространственного заряда в быстро-циклирующем 8 ГэВ протонном синхротроне Booster в Fermilab (периметр 474 м, $-\Delta Q_{SC} \sim 0,4$)

Параметр	Обозначение	Значение	Единица
Число ЭЛ	N_{EL}	24 12 6	
Длина каждой ЭЛ	L_{EL}	0,7 1,0 2,0	м
Макс. электронный ток	J_e/κ	2,0 3,6 4,2	А
Энергия электронов	U_e	30 40 50	кВ
Поле основного соленоида	B_m	1,1	Тл
Поле пушечного соленоида	B_g	0,3	Тл
Радиус эл. в осн. соленоиде	σ_e	4,5	мм
Радиус катода	a_c	12	мм
Сдвиг частоты	ΔQ_{EL}	0,4	$\times \kappa$

Таблица 5. Требования к электронному пучку, чтобы генерации разброса бетатронных частот $\delta Q_{\text{EL}} \approx 0,004$ в LHC и стабилизации сгустка из протонов

Параметр	Обозначение	Значение	Единица
Длина		2	м
Число ЭЛ		2,0	1 на пучок
Бета-функции в ЭЛ		~200	м
Ток		0,5–1	А
Профиль тока		гауссов	
Радиус пучка ср. кв.		0,3	мм
Поле основного соленоида		6,5	Тл
Поле пушечного соленоида		0,2	Тл
Сдвиг частоты из-за ЭЛ		~0,004	

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые одновременно являются положениями, выносимыми на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы в трех книгах:

1. Shiltsev V., *Electron Lenses for Super-Colliders*. New York: Springer-Verlag New York, 2016.
2. Lebedev V., Shiltsev V. *Accelerator Physics at the Tevatron collider*. New York: Springer New York, 2014.
3. Shiltsev V. *Accelerator Science and Technology Breakthroughs, Achievements and Lessons from Tevatron: John Adams Lecture 2010*. CERN, 2011.

и в следующих работах:

1. Shiltsev V., Koutchouk J.P. *Beam-Beam Compensation Schemes // Handbook of Accelerator Physics and Engineering / ed. by A.W. Chao, K.H. Mess, M. Tigner, F. Zimmermann*. Singapore: World Scientific, 2013.
2. Shiltsev V. *Space-Charge Compensation in Hadron Beams // Handbook of Accelerator Physics and Engineering / ed. by A.W. Chao, K.H. Mess, M. Tigner, F. Zimmermann*. Singapore: World Scientific, 2013.
3. Shiltsev V. *Electron Lenses // Handbook of Accelerator Physics and Engineering / ed. by A.W. Chao, K.H. Mess, M. Tigner, F. Zimmermann*. Singapore: World Scientific, 2013.
4. Holmes S. D., Shiltsev V. D. *The Legacy of the Tevatron in the Area of Accelerator Science // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2013. Vol. 63. pp. 435–465.
5. Шильцев В. Д. *Коллайдеры частиц высоких энергий: прошедшие 20 лет, предстоящие 20 лет и отдалённое будущее // УФН.* 2012. Т. 182, №. 10. С. 1033–1046.

6. Stancari G. et al. Collimation with Hollow Electron Beams // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 107, No. 8. P. 084802.
7. Mokhov N. et al. Tevatron Beam Halo Collimation System: Design, Operational Experience and New Methods // JINST. 2011. Vol. 6, No. 08. P. T08005.
8. Shiltsev V. et al. Tevatron Electron Lenses: Design and operation // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2008. Vol. 11, No. 10. P. 103501.
9. Shiltsev V. et al. Experimental studies of compensation of beam-beam effects with Tevatron electron lenses // New J. Phys. 2008. Vol. 10, No. 4. P. 043042.
10. Zhang X. et al. The Origination and Diagnostics of Uncaptured Beam in the Tevatron and Its Control by Electron Lenses // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2008. Vol. 11. P. 051002.
11. Shiltsev V. et al. Experimental Demonstration of Compensation of Beam-Beam Effects by Electron Lenses // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 99. P. 244801.
12. Shiltsev V. et al. Beam-beam effects in the Tevatron // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2005. Vol. 8, No. 10. P. 101001.
13. Пархомчук В. В., Рева В. Б., Шильцев В. Д. Взаимодействие интенсивного протонного сгустка и электронного пучка в Тэватроне // ЖТФ. 2003. Т. 73, №. 8. С. 105-110.
14. Shiltsev V., Danilov V., Finley D., Seryi A. Compensation of Beam-Beam Effects in the Tevatron with Electron Beams // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 1999. Vol. 2. P. 071001.
15. Burov A., Danilov V., Shiltsev V. Antiproton Stability in Tevatron with Electron Lens // Phys. Rev. E. 1998. Vol.59, No.3. P.3605.
16. Shiltsev V., Zinchenko A Electron Beam Distortions in Beam-Beam Compensation Set-up // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 1998. Vol.1. P. 064001.
17. Shiltsev V. Beam-Beam Kicker for Superfast Bunch Handling // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. Vol. 374. P. 137–143.
18. Шильцев В.Д. Влияние внешних шумов на динамику пучков в больших коллайдерах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. ИЯФ СО РАН, Новосибирск, 1994.

ШИЛЬЦЕВ Владимир Дмитриевич

Электронные линзы для суперколлайдеров

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 8.09.2017 г.

Подписано в печать 9.09.2017 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 2.1 усл. печ.л., 1.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Обработано на РС и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11