

621.384.6(049.3)

**ПУЧКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ: НАБЛЮДЕНИЕ,  
ДИАГНОСТИКА И КОРРЕКЦИЯ**

*Frontiers of Particle Beams: Observation, Diagnosis, and Correction: Proceedings of a Topical Course Held by the Joint US — CERN School on Particle Accelerators at Anacapri, Isola di Capri, Italy, October 20—26, 1988/Eds. M. Month, S. Turner.— Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong: Springer-Verlag, 1989.— 509 p.— (Lecture Notes in Physics. V. 343).*

В самое последнее время мы стали свидетелями еще одного триумфального успеха физики ускорителей сверхвысоких энергий. Летом 1989 г. в ЦЕРН был введен в строй Большой электрон-позитронный коллайдер (LEP), на котором два месяца спустя были получены замечательные результаты по точному измерению ширины нейтральных  $Z$ -бозонов, что позволило получить четкое указание на то, что число поколений кварков и лептонов равно трем. Этот и предыдущие выдающиеся успехи, такие, как открытие  $c$ -кварка и  $W$ -бозонов, стали возможны только благодаря высочайшему уровню развития ускорительной физики и техники. Этому немало способствует выработанная разветвленная сеть кратковременных школ и рабочих совещаний по ускорителям как в Северной Америке так и при ЦЕРН.

Рецензируемый сборник составлен из материалов третьей в серии специальных школ по ускорителям, организуемых совместно США и ЦЕРН. Первый из этих курсов был посвящен нелинейной динамике и ее применению в физике ускорителей. Эта школа состоялась в Санта Маргарите ди Пула, Сардиния, в январе 1985 г., и ее труды были опубликованы в томе 247 «Лекций по физике» издательства «Шпрингер». Вторая шко-

ла, состоявшаяся на острове Саус-Ладре, Техас в октябре 1986 г., была озаглавлена «Последние новости физики пучков заряженных частиц» и служила введением в современные концепции в физике и технологии ускорителей частиц. Эти труды составляют том 296 «Лекций по физике».

Рассматриваемый том 343 указанной серии лекций возник в результате проведения последней из этих школ, которая состоялась в Анакапри, Изольда ди Капри, Италия, 20—26 октября 1988 г. На ней рассматривались методы наблюдения, диагностики и коррекции свойств пучков заряженных частиц при их ускорении и циркуляции в ускорителях и накопительных кольцах, вопрос, который не получил широкого обсуждения в прошлом.

Программа школы включала лекции по трем основным направлениям:

- явления, используемые для наблюдения за пучком,
- одночастичные параметры,
- коллективные параметры.

Каждое из этих направлений предварялось одной или более общей лекцией, за которыми следовали подробные лекции по специальным вопросам, таким, как шум Шоттки, замкнутые орбиты или измерения импеданса. Ставилась цель показать, как наблюдать разнообразное поведение пучка, как интерпретировать и классифицировать эти наблюдения, и затем, как управлять или исправлять соответствующие параметры. Программа лекций была дополнена тремя семинарами, на которых рассматривались будущее мониторинговое на электрон-позитронных коллайдерах и специальные вопросы неплоских машин и экспериментальной трассировки частиц.

В открывающей сборник статье Г. Грюндера «Физика ускорителей как профессия» подчеркивается междисциплинарный и международный характер этой сложной области науки, базирующейся на широком использовании классической и квантовой механики, электромагнетизма, статистической физики, а также опирающейся на передовую мировую технологию. Автор выделяет два типа ускорителей для проведения научных исследований. К первому типу относятся установки мирового класса с уникальными характеристиками и возможностями. Вторую более многочисленную группу составляют региональные установки, обеспечивающие возможность проведения исследований гораздо большему числу экспериментаторов.

Р. Талман в своих вводных лекциях напоминает основные положения общей теории линейного трехмерного движения одной частицы в магнитных полях ускорителей. Рассмотрение бетатронного движения ведется в шестимерном фазовом пространстве с использованием матричного формализма. Исследуется возможность перехода к двумерному движению. Описываются обобщенные параметры Твисса, и приводится способ нахождения собственных векторов и собственных частот. Анализируется связь поперечного и продольного движений и способы ее компенсации. Более подробно связанное поперечное движение рассмотрено в статье Л. Тэнга.

Контроль и управление положением замкнутой орбиты и частотами бетатронных колебаний относятся к числу первостепенных задач любой системы управления ускорителем. Существенное увеличение размеров ускорителей и их работа в коллайдерном режиме накладывают жесткие ограничения на отклонение этих параметров от проектных. Высокое качество замкнутой орбиты исключительно важно для эффективной работы ускорителя и получения низкого фона на экспериментальных детекторах. Методам измерения и способам коррекции искажений замкнутой орбиты

в циклических ускорителях посвящена статья Ж.-П. Кучука. Обсуждаются влияние на замкнутую орбиту дефектов магнитной структуры и способы улучшения орбиты. Рассматривается вклад энергетического разброса в положение орбиты. Описываются методы минимизации отклонений траекторий в линиях транспортировки пучков и минимизация амплитуд бетатронных колебаний при инжекции. Широкое распространение получил метод коррекции орбиты по наблюдению за специально сформированным тонким пучком частиц.

Измерение частот бетатронных колебаний является основным диагностическим инструментом при оптимизации процесса инжекции и вывода частиц, а также всей работы ускорителя как целого. Такие измерения важны для проверки и коррекции реальной магнитной структуры ускорителя, для идентификации опасных резонансов, определения локальных значений бетатронных функций. М. Серно описывает методы измерения частот по исследованию отклика пучка на возбуждение поперечных колебаний локальным быстроизменяющимся внешним полем. В измерительную систему составной частью входит датчик положения пучка.

Мониторами пучков частиц в ускорителях служат главным образом электромагнитные устройства, которые отводят малое количество энергии от пучка, не оказывая на него существенного влияния. В статьях М. Серно, А. Хофмана и Г. Ламбертсона довольно подробно описываются традиционные способы наблюдения за пучком с помощью электродов с разрезами и так называемых электродов в виде пуговицы, полосковых линий, резонаторных и магнитоиндукционных датчиков. Эти устройства позволяют измерить ток пучка, его положение и форму. Для измерений когерентных синхротронных колебаний, продольных размеров сгустков и расстояния между сгустками используются короткие продольные электроды.

Для измерения поперечных размеров и временной структуры электронных пучков, их угловой расходимости, а следовательно и эмиттанса, уже продолжительное время используется синхротронное излучение. А с недавних пор для этой цели начинает использоваться и ондуляторное излучение, которое в ряде случаев предпочтительнее синхротронного. Оптические методы диагностики по магнитотормозному излучению рассматриваются в статьях А. Хофманом и Р. Барбини и др. (см. также [1]).

Наряду с прозрачными для наблюдения в линейных ускорителях, в каналах транспортировки между ускорителями, при однооборотных режимах работы циклических ускорителей удобны перекрывающие пучок мониторы. Р. Юнг дает обзор таких мониторов, в основе действия которых лежат: явление люминесценции, переходное излучение, вторичная электронная эмиссия, рождение вторичных частиц или процесс тормозного излучения, ионизация остаточного газа или специальных газовых струй.

В связи с возрастающими требованиями к интенсивности приобретают все более важное значение коллективные эффекты, обусловленные пространственным зарядом пучка. В лекциях Р. Д. Рута и Р. Д. Кохаупта рассматриваются основные продольные и поперечные коллективные эффекты и вызываемые ими нестабильности. Движущиеся заряженные сгустки порождают в окружающей пучок среде наведенные электромагнитные поля, которые оказывают обратное воздействие на пучок. Подробно исследуется влияние кильватерных (следовых) полей на продольное и поперечное движение. Для линейных и циклических ускорителей рассматриваются односгустковый и многосгустковый режимы работы. В первом случае характерно взаимодействие частиц внутри сгустка, во втором —

взаимодействие последовательности сгустков. Коллективные эффекты могут привести к увеличению поперечных размеров и удлинению сгустков, к изменению энергии в пределах сгустка, к появлению большого разброса энергии от сгустка к сгустку, к смещению сгустка относительно фазы ускоряющего напряжения. В сборнике уделяется много внимания методам уменьшения влияния кильватерных полей. Среди них: уменьшение числа сгустков, уменьшение частоты ускоряющего напряжения, конструирование специальных ускоряющих структур, оптимизация фазы ускоряющего напряжения.

Измерениям кильватерных полей и импеданса целиком посвящена статья Л. Полумбо и В. Г. Вассаро, в которой излагаются последние данные по прямому измерению наведенных полей с помощью пучков заряженных частиц, дается обзор радиотехнических методов измерений.

В 1948 г. Шоттки описал статистические флуктуации тока, вызванные конечным числом носителей заряда. Эти флуктуации часто используются для изучения работы как циклических ускорителей так и накопительных колец. Диагностика с использованием шумов Шоттки обсуждается в статье С. Ван дер Меера и ряде других. Наблюдение продольных сигналов Шоттки используется для нахождения распределения частот обращения частиц, а также полного числа частиц в циркулирующем пучке. Поперечные сигналы, получаемые при разностном включении электродов, используются для измерения зависимости эмиттанса от частоты обращения. Особое внимание уделяется измерению шумов Шоттки от сгруппированного пучка.

На анализе и обработке сигналов с датчиков системы диагностики и коррекции останавливается Д. Бусар. Обсуждается частотный анализ и фильтрация сигналов. Рассматриваются требования к широкополосности сигнальных электродов. Они становятся достаточно жесткими при обработке сигналов Шоттки в экспериментах по стохастическому охлаждению.

Энергия и светимость являются основными параметрами установок со встречными пучками. Р. Джонсон рассматривает методы измерения светимости и энергии на электрон-позитронных и протон-антипротонных коллайдерах. Для измерения светимости используется упругое рассеяние сталкивающихся частиц. Обсуждается зависимость светимости от параметров сгустков и магнитной структуры накопителей. Точная калибровка энергии пучков чрезвычайно важна для электрон-позитронных коллайдеров, поскольку она напрямую определяет точность измерения масс образующихся при столкновении частиц. Рекордную точность дает тонкий метод резонансной спиновой деполаризации, более подробно описанный в [2].

Проблеме получения и сохранения поляризации в больших электрон-позитронных накопителях посвящена статья М. Пласиди. Обсуждается движение спина электрона в магнитном поле, способы управления ориентацией спина, деполаризационные механизмы, принципы комптоновской поляриметрии.

В заключительной не совсем обычной для таких сборников статье Г. Восс делится опытом запуска крупнейших электронных ускорителей и накопителей. Он принимал участие в работах по запуску Кэمبرиджского электронного синхротрона, в настоящее время при его определяющем участии осуществляется запуск первого электрон-протонного коллайдера в Гамбурге. Описывается процедура настройки ускорителя, методы нахождения и устранения технических ошибок, трудности, которые при

этом встречаются. Подчеркивается роль нестабильностей. Практики-ускорительщики найдут здесь много поучительного и узнаваемого.

В целом рецензируемый сборник достаточно полно отражает современный уровень развития методов наблюдения и управления пучками заряженных частиц на крупнейших ускорительных установках. В нем содержится большой объем информации, которая может оказаться полезной при проектировании, сооружении и запуске ускорителей.

*Ю. А. Башмаков*

#### ■ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Черенков П. А. // УФН. 1989. Т. 157. С. 389.
2. Скринский А. Н., Шатунов Ю. М. // Ibidem. Т. 158. С. 315.