

УДК 539.1.07; 539.12; 539.13

HERA-B — ДЕТЕКТОР ДЛЯ ВЫСОКИХ ЗАГРУЗОК

А. А. Бельков, И. А. Голутвин, Ю. К. Кирюшин

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Лаборатория физики частиц

Обсуждается статус и перспективы эксперимента на установке HERA-B, создаваемой в DESY для поиска CP -нарушения в эксклюзивных распадах B -мезонов.

The status and perspectives of the HERA-B experiment at DESY to search for CP violation in the exclusive B -meson decays are discussed.

Экспериментальную установку HERA-B начали создавать в 1994 г. в DESY (Гамбург) на протонном пучке ep -коллайдера HERA с энергией 920 ГэВ ($\sqrt{s} \approx 40$ ГэВ). Эта установка предназначалась для поиска CP -нарушения в эксклюзивных распадах B -мезонов, рождающихся в pN -взаимодействиях на управляемой проволочной мишени, помещенной в гало протонного пучка. Использование такой мишени позволяет не только хорошо локализовать вершину первичного взаимодействия, но также обеспечивает слабую интерференцию с другими экспериментами на ep -коллайдере HERA (H1, HERMES, ZEUS).

По оценкам, при частоте банчей 10 МГц ожидается частота взаимодействий около 40 МГц, то есть 4–5 pN -взаимодействий на каждый банч. При отношении сечений $\sigma_{b\bar{b}}/\sigma_{\text{inel}} \approx (0,5 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$ это соответствует частоте образования $b\bar{b}$ -пар на уровне 20 ÷ 60 Гц. При этом для различных каналов распадов нейтральных B -мезонов ожидаются следующие числа событий в год:

$$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0 — 1500 \text{ событий (поиск } CP\text{-нарушения);}$$

$$B^0 \rightarrow J/\psi \Phi — 1200 \text{ событий (поиск } CP\text{-нарушения);}$$

$$B^0 \rightarrow D_s^+ l^- \nu — 900 \text{ событий (измерение } B_s\text{-смешивания);}$$

$$B^0 \rightarrow D_s^+ \pi(3\pi) — 1500 \text{ событий (измерение } B_s\text{-смешивания);}$$

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- — 1500 \text{ событий (поиск } CP\text{-нарушения);}$$

$$B^0 \rightarrow J/\psi X — 1500 \text{ событий (измерение сечения рождения } B\text{-мезонов).}$$

Таким образом, ускоритель HERA можно рассматривать как фабрику B -мезонов, обеспечивающую широкую физическую программу исследований.

В качестве главной задачи эксперимента рассматривался поиск CP -асимметрии в распаде $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$. Эта асимметрия возникает в результате

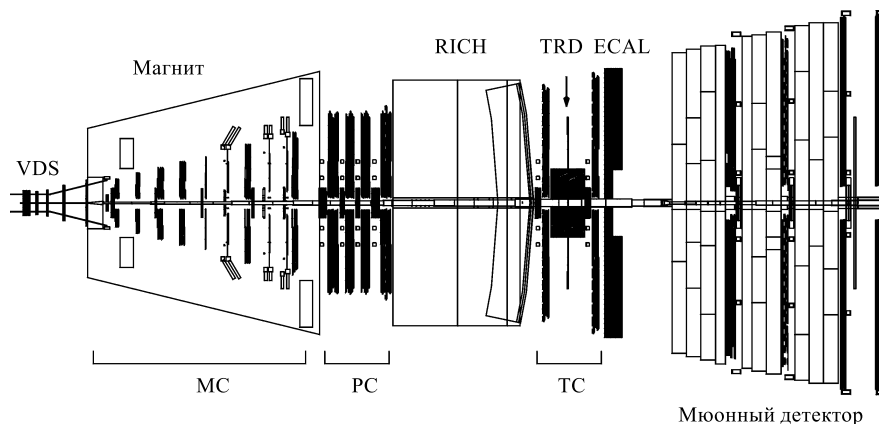


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки HERA-B: вершинный детектор VDS, суперслои MC, PC и TC внешнего трекера, детектор черенковских колец RICH, детектор переходного излучения TRD, электромагнитный калориметр ECAL и мюонный детектор

интерференции амплитуд переходов $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ и $B^0 \rightarrow \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ и пропорциональна $\sin(2\beta)$, где β — угол унитарного треугольника для углов матрицы Кабиббо–Кобаяши–Маскавы. Предусматривалось мечение аромата нейтрального B -мезона по знаку второго ассоциативно рожденного заряженного B -мезона. При ожидаемой статистике 1500 распадов $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ в год предполагалось достичь точности определения угла унитарного треугольника β на уровне $\Delta \sin(2\beta) \approx 0,13$.

Детектор HERA-B, общая схема которого показана на рис. 1, позволяет осуществить магнитную спектрометрию и идентификацию заряженных частиц e^\pm , μ^\pm и K^\pm , разделение первичных и вторичных вершин, а также выделение событий с помощью триггера на треки с большим поперечным импульсом и инвариантную массу двух противоположно заряженных лептонов в области J/ψ -резонанса.

Отличительной особенностью эксперимента HERA-B является высокий уровень радиационной загрузки, сопоставимый с радиационными условиями, которые ожидаются в будущих экспериментах на LHC в CERN. Высокий уровень фона предъявляет особые требования как к радиационной стойкости трековых детекторов установки HERA-B, так и к селективности триггерной системы. Так, при частоте банчей 10 МГц для выделения распада $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ ожидается отношение сигнала к фону на уровне от 10^{-9} до 10^{-11} при средней загрузке каналов трековых детекторов $20 \div 30\%$. Поэтому по проекту триггер первого уровня установки HERA-B должен обеспечивать подавление

фона как минимум в 200 раз (при допустимом времени выработки решения 12 мкс), а вся четырехуровневая триггерная система в целом — в $5 \cdot 10^5$ раз.

В соответствии с обязательствами ОИЯИ, сотрудники ЛФЧ участвовали в следующих работах по подготовке и проведению эксперимента HERA-B:

- конструирование, инсталляция и наладка элементов внешнего трекера;
- сборка, настройка и эксплуатация внешнего трекера;
- разработка и отладка программ для «off-line»-реконструкции, калибровки и контроля работы детекторов в режиме «on-line»;
- набор статистики в сеансах и физический анализ данных.

Внешний трекер (камеры MC, PC и TC на рис. 1) предназначен для регистрации заряженных частиц на расстояниях больше 20 см от оси протонного пучка. Он состоит из модулей дрейфовых камер сотового типа с трубками гексагональной формы, изготовленными из углеродистого подалона. Размер ячеек трубок — 5 или 10 мм, длина отдельного модуля (трубки) — от 1 до 4 м. В состав внешнего трекера вошло около 1000 модулей общей площадью 1000 м². В целом внешний трекер содержит около 115000 каналов считывания сигналов (TDC). Модули сгруппированы в 13 суперслоев (камер), показанных на рис. 2: 7 камер (MC) находятся внутри магнита; 4 камеры (PC), расположенные между магнитом и детектором черенковских колец RICH, используются для распознавания образов треков; две триггерные камеры (TC) расположены между детектором RICH и электромагнитным калориметром ECAL. Максимальный размер суперслоя (TC2) $4,6 \times 6,5$ м.

Сотрудники ЛФЧ ОИЯИ внесли большой вклад в производство модулей внешнего трекера. С этой целью в Дубне была создана специализированная чистая зона с линией массового производства модулей из материалов и комплектующих, поставляемых DESY, Германия. Производительность линии, имевшей 6 рабочих мест, составляла 6 модулей в неделю. Были созданы специальные установки для комплексных испытаний изготовленных камер: стенд с радиоактивным источником ¹⁰⁶Ru [1] для контроля работоспособности камер и стенд для испытания в космических лучах [2] для измерения трековой эффективности, дрейфовой зависимости $r(t)$ и пространственного разрешения камер. Вся информация о каждой проволоке в камере (натяжение проволоки, высоковольтные испытания и т. д.), включая результаты испытания модуля на установке с радиоактивным источником (темновой ток для группы проволок, шумы, частота срабатываний проволоки, эффективность камеры), заносилась в базу данных контроля качества камер. Прямой доступ к этой базе данных через Интернет обеспечивал доступ к информации о массовом производстве в Дубне для всех участников коллаборации HERA-B.

Следует особо отметить, что уже в 1997 г. в ходе испытаний на протонном пучке ускорителя HERA обнаружилось быстрое радиационное старение подалоновых камер, изготовленных по первоначально предложенной технологии. Поэтому массовое производство камер было приостановлено на время

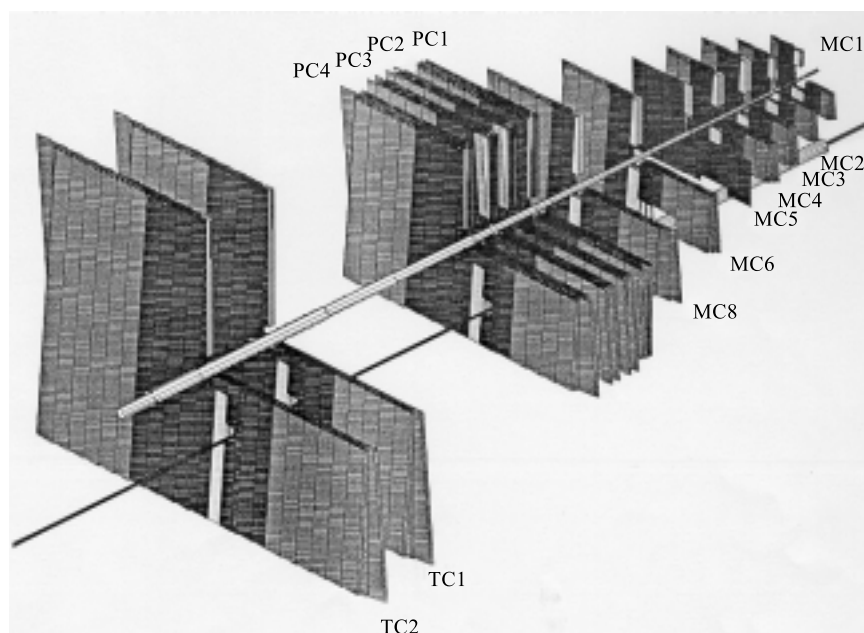


Рис. 2. Суперслои внешнего трекера установки HERA-B (правая верхняя четверть каждого суперслоя вырезана для наглядности). Центральные части каждого суперслоя, которые на рисунке выделены более темным цветом, состоят из модулей с ячейками диаметром 5 мм, в то время как внешние, более светлые слои соответствуют модулям с ячейками диаметром 10 мм

проведения дополнительных исследований с целью выяснения причин быстрого старения и выработки новых технологических решений. В ходе этих исследований, продолжавшихся до начала 1999 г., были выявлены основные процессы, приводящие к быстрому выходу камер из строя при облучении в адронных пучках высокой интенсивности. В частности, был обнаружен эффект Мальтера — появление больших темновых токов из-за быстрого катодного старения трубки, связанного с уменьшением проводимости ее внутренней поверхности в результате появления на ней изолирующего налета. Для предотвращения эффекта Мальтера было предложено использовать покатоновую фольгу с тонким покрытием из золота. В результате длительных комплексных исследований и испытаний была разработана новая технология, гарантирующая работоспособность дрейфовых камер внешнего трекера при уровне накопленной дозы облучения, эквивалентной двум годам непрерывной работы установки HERA-B на пучке.

Массовое производство дрейфовых камер велось одновременно в Дубне, Гамбурге, Цойтене и Пекине. Программа массового производства была полностью выполнена ЛФЧ в сентябре 1999 г. В целом было произведено и доставлено из Дубны в DESY около 300 модулей. Указанное количество модулей соответствует почти 40000 каналов регистрации, что составляет 30 % от полного числа каналов внешнего трекера. Дубненская группа внесла также определяющий вклад в подготовку и монтаж внешнего трекера, проверку и наладку его суперслоев непосредственно в DESY.

Физики ЛФЧ активно участвовали в развитии программного обеспечения для моделирования и обработки данных в экспериментах на установке HERA-B, прежде всего, в описании геометрии, моделировании и реконструкции внешнего трекера [3]. Дубненская группа внесла вклад в разработку пакета общего программного обеспечения ARTE для детектора HERA-B, системы считывания данных и пакета программ для контроля качества данных, поступающих с внешнего трекера. Было проведено детальное исследование реконструкции мюонных треков от распадов J/ψ для различных сценариев неполной конфигурации внешнего трекера в случае полной геометрии мюонного детектора [4].

После завершения в конце 1999 г. монтажа суперслоев внешнего трекера физики Дубны, занятые в этих работах, сконцентрировали свои усилия на участии в сеансе облучения внешнего трекера, наборе статистики и анализе данных. В 2000 г. они участвовали в эксплуатации внешнего трекера, проверке кабельных соединений и юстировке геометрии с использованием реальных данных [5]. Кроме того, дубненские физики исследовали на реальных данных эффективность срабатывания ячеек и трековую эффективность дрейфовых камер, а также изучали импульсное разрешение установки при неполной геометрии МС-камер внешнего трекера. Для улучшения реконструкции треков в РС-камерах разработан новый алгоритм распознавания треков, основанный на преобразовании Хафа.

Следует особо отметить, что в 2000 г. дубненская группа получила от немецкого министерства ВМВФ специальный грант для приобретения вычислительной техники, которая была интегрирована в компьютерную ферму ЛФЧ — ЛВЭ. Это дает возможность проводить непосредственно в Дубне работы по развитию программного обеспечения, моделированию установки и анализу данных.

Сеанс облучения, проведенный в 2000 г., явился серьезным испытанием как для отдельных подсистем, так и всей установки в целом. К сожалению, в ходе сеанса выяснилось, что некоторые подсистемы так и не вышли по своим рабочим характеристикам на уровень, предусмотренный в проекте. Особые проблемы возникли с триггером первого уровня, который так и не удалось запустить. Поэтому во время сеанса 2000 г. решались, в основном, методические задачи, а регистрация и анализ распадов B -мезонов оказались

за пределами реальных возможностей установки. Тем не менее, используя только аппаратуру триггера второго уровня, удалось набрать достаточную статистику для измерения сечения образования J/ψ -резонанса. По каналу распада $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ было зарегистрировано около 10000 событий с одним тормозным фотоном и 7000 событий с двумя тормозными фотонами. По каналу распада $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ было зарегистрировано около 4000 событий.

После остановки ускорителя HERA для его модернизации с сентября 2000 г. на установке HERA-B ведутся запланированные работы по ремонту детекторов, а также наладке и оптимизации триггерной системы. Дубненская группа принимает активное участие как в ремонте дрейфовых камер внешних детекторов, так и в изучении их рабочих характеристик с целью дальнейшей оптимизации детектора. По плану эксперименты на установке HERA-B будут возобновлены в 2002 г.

Программа исследований на 2002–2003 гг. рассчитана на получение некоторых промежуточных физических результатов за самое короткое время даже с неоптимизированными детекторами и триггерной системой. В качестве исходных условий эта программа учитывает уровень работы детекторов и триггерной системы установки, достигнутый в 2000 г., и ориентирована на использование триггера на двухлептонные события, одиночные лептоны и жесткие фотоны. Среди наиболее актуальных физических задач следует выделить измерение сечения рождения $b\bar{b}$ -пар и изучение рождения очарованных частиц на большой статистике. Реализация предложенной программы исследований и конкурентная способность эксперимента HERA-B по сравнению с другими экспериментами целиком зависят от того, насколько будет улучшена в ближайшее время работа триггерной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bel'kov A. et al.* HERA-B Note 98-075. OTR 98-019. Hamburg, 1998.
2. *Bel'kov A. et al.* // JINR Rapid Commun. 1998. No. 4[90]. P. 15.
3. *Lanyov A.* HERA-B Note 97-259. Hamburg, 1997.
4. *Bel'kov A., Lanyov A., Moshkin A.* HERA-B Note 98-065. Software 98-010. Hamburg, 1998.
5. *Belkov A., Lanyov A., Spiridonov S.* HERA-B Note 01-005. Software 01-003. Hamburg, 2001; *Barsukova O., Hulsbergen W., Lanyov A.* HERA-B Note 01-007. OTR 01-002. Hamburg, 2001.