



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000-53  
ОРИ

В.В. Таланов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ  
ПОЛЯ ВТОРИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
И ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ НАГРУЗОК  
В ДЕТЕКТОРАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ  
ЭКСПЕРИМЕНТА LHCb НА LHC**

Направлено в *ИТЭ*

Протвино 2000

**Аннотация**

Таланов В.В. Исследование формирования поля вторичного излучения и оценка радиационных нагрузок в детекторах центральной области эксперимента LHCb на LHC.: Препринт ИФВЭ 2000-53. – Протвино, 2000. – 20 с., 9 рис., 3 табл., библиогр.: 29.

Проведено моделирование формирования поля вторичного излучения в центральной области эксперимента LHCb на LHC для принятой на данный момент конфигурации детекторов. Показаны особенности характеристик поля излучения в зависимости от расположения детекторов в эксперименте и конструкции вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента. Приведены оценки радиационных нагрузок, определяющие функционирование детекторов в данной фоновой обстановке.

**Abstract**

Talanov V.V. Study of Secondary Field Formation and Radiation Loads in the Central Region Detectors of the LHCb Experiment at LHC: IHEP Preprint 2000-53. – Protvino, 2000. – p. 20, figs. 9, tables 3, refs.: 29.

The numerical study of secondary field formation for the central region of LHCb experiment at LHC has been carried out. The specific characteristics of radiation field, depending on the detectors location in the experimental region and on the accelerator vacuum chamber design are shown. The estimations of radiation loads which determine the detectors performance in the particular background environment are given.

Эксперимент LHCb [1],[2], проектируемый в ЦЕРН (Женева, Швейцария), предназначен для прецизионных измерений эффектов нарушения  $CP$ -инвариантности и редких распадов частиц. Эксперимент должен быть расположен в восьмой точке встреч пучков сооружаемого в ЦЕРН ускорителя LHC [3] и, как предполагается, будет работать при светимости в точке встреч до  $5 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Основными детекторами эксперимента LHCb являются (см. рис. 1): расположенный вокруг точки встреч вершинный детектор, центральная и внешняя трековые системы, частично расположенные внутри дипольного магнита, два черенковских детектора с регистрацией кольца излучения, электромагнитный и адронный калориметры и мюонный детектор.

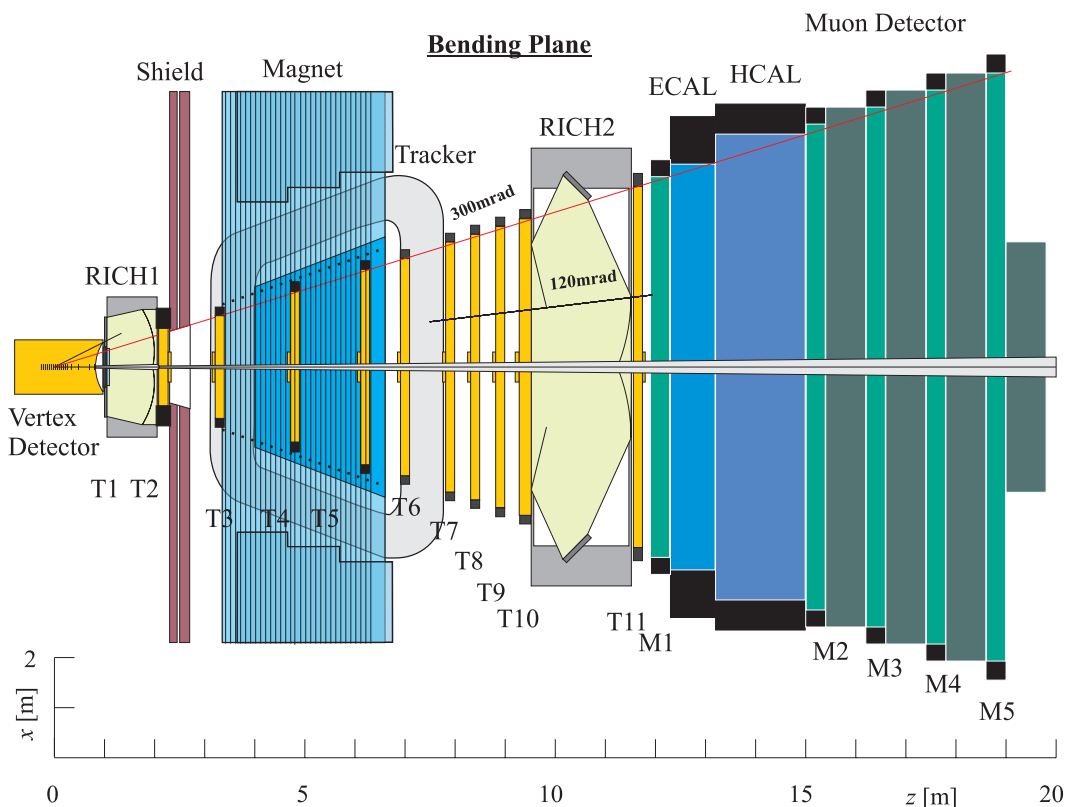


Рис. 1. Конфигурация эксперимента LHCb (вид сверху).

Верхняя граница диапазона быстрот, перекрываемого детекторами центральной области эксперимента, определяется конструкцией вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента, вокруг которой размещаются детекторы. На момент проведения исследования практически во всей области эксперимента, начиная с 2,5 м от точки встреч, предполагается использовать узкую алюминиевую вакуумную камеру конической формы [4], с углом раствора 10 мрад ( $\eta=5,3$ ) и толщиной от 1 до 6 мм. Узкая вакуумная камера имеет длину около 17 м и состоит из трех секций, каждая длиной около 5 м. Секции объединяются в единую камеру стальными участками соединения, необходимыми также для юстировки отдельных секций камеры. Материал участков соединения, в первую очередь стальные фланцы, составляющий основную часть бюджета материала в центральной области эксперимента, является основным источником вторичного излучения в трековой системе ЛНСб [5].

В области 1÷2.5 м для уменьшения фоновых нагрузок на детекторы эксперимента, расположенные вблизи точки встреч пучков ускорителя, предполагается использование секции вакуумной камеры с более широким углом раствора 25 мрад ( $\eta=4,4$ ). Широкая часть камеры с помощью алюминиевого окна сопряжения соединяется с вакуумным танком радиусом 50 см, в котором размещается вершинный детектор эксперимента ЛНСб. Минимальный радиус станций вершинного детектора составляет 1 см, что позволяет детектору перекрывать область быстрот до  $\eta=5$ .

В данной работе будет исследовано формирование поля вторичного излучения в передней ( $z < 12$  м) области эксперимента ЛНСб, в его центральной области, состоящей из вершинного детектора и центральной трековой системы<sup>1</sup>. Мюонный детектор эксперимента в работе рассмотрен не будет, поскольку расположение мюонных станций за калориметрами, внутри стальных мюонных фильтров, приводит к тому, что плотность потока заряженных частиц в мюонном детекторе в основном определяется электронами, рожденными вторичными  $\gamma$ -квантами от захвата нейтронов непосредственно в веществе детектора [6].

## 1. Детекторы центральной области

Формирование поля вторичного излучения в области вершинного детектора и центрального трекера эксперимента ЛНСб определяется как особенностями положения соответствующих детекторов в эксперименте, так и конструкцией вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента. Станции вершинного детектора эксперимента ЛНСб будут размещены в вакуумном танке радиусом 50 см, вокруг точки встреч, перпендикулярно оси пучка. Точка встреч эксперимента ЛНСб расположена не в центре экспериментального зала, а, в отличие от других проектируемых экспериментов на ЛНС, смещена в тоннель ускорителя, поэтому область вершинного детектора окружают бетонные стены тоннеля. Также в тоннеле ускорителя, вокруг первой секции вакуумной камеры ускорителя, перед<sup>2</sup> стальной пластиной, экранирующей поле магнита ЛНСб, будут размещены две первые трековые станции и первый (газ-аэрогель) черенковский детектор.

Третья трековая станция расположена уже за тоннелем ускорителя, собственно в экспериментальном зале, перед магнитом ЛНСб. В принятой на момент проведения исследования конструкции вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента ЛНСб

---

<sup>1</sup>Далее для краткости называемой центральным трекером.

<sup>2</sup>Считая от точки встреч.

именно перед третьей станцией располагается участок соединения широкой секции камеры с первой узкой секцией. Второй участок соединения секций вакуумной камеры расположен между трековыми станциями номер шесть и семь. Необходимо отметить, что станции с четвертой по шестую расположены внутри обмоток магнита ЛНСб, поле которого оказывает значительное влияние на распределение вторичного излучения в этой области эксперимента. Наконец, трековые станции с седьмой по десятую расположены перед вторым черенковским детектором, а станция одиннадцать, совмещенная с первой станцией мюонного детектора — перед электромагнитным калориметром.

Данная конфигурация детекторов эксперимента обуславливает наличие трех зон в эксперименте, характеризующихся различной радиационной обстановкой [7]. Вблизи точки встреч пучков ускорителя основной вклад в плотность потока частиц в диапазоне больших быстрых дают первичные частицы, рожденные непосредственно из точки протон-протонного взаимодействия, поскольку количество материала детекторов в данной области сравнительно невелико.

В средней части центрального трекера плотность потока частиц обусловлена взаимодействиями первичных частиц с материалом вакуумной камеры ускорителя, в основном с материалом участков соединения секций вакуумной камеры. Радиальное распределение плотности потока заряженных частиц в данной области определяется полем магнита ЛНСб, что приводит к разным значениям плотности потока заряженных частиц на одном и том же расстоянии от оси пучка в плоскостях  $X$  и  $Y$  эксперимента.

В области второго черенковского детектора вклад в общую плотность потока первичных частиц источника и вторичного излучения от вакуумной камеры перестает быть основным. В этой области начинает доминировать вторичное излучение от адронных каскадов и электрон-фотонных ливней в материале калориметров<sup>3</sup>, что приводит к восстановлению радиальной симметрии поля вторичного излучения.

## 2. Моделирование поля излучения

Основная часть расчетов плотностей потоков частиц и уровней поглощенной дозы, представленных в данной работе, была выполнена при значении  $10 \text{ МэВ}^4$  для порога транспорта по энергии для всех адронов, кроме нейтронов, и значении порога  $100 \text{ кэВ}$  для  $\gamma$ -квантов и электронов. Дополнительно был выполнен тестовый расчет со значением  $1 \text{ МэВ}$  для порога транспорта заряженных адронов, что, впрочем, не привело к существенному изменению плотности потока адронов. Для транспорта нейтронов в области вершинного детектора было задано значение  $10^{-3} \text{ эВ}$  для порога по энергии.

Для моделирования адронных каскадов и электрон-фотонных ливней была использована программа MARS [8], разработанная в ИФВЭ. В качестве программы моделирования источника первичных частиц в точке встреч пучков был использован генератор DPMJET II [9]. Генератор DPMJET II является одной из последних разработок в области генераторов частиц на основе программы DTUJET93 [10] и специально предназначен для моделирования адрон-адронных взаимодействий.

Необходимо отметить, что для физического анализа программный пакет SICb [26] коллаборации ЛНСб использует другой генератор частиц, RYTHIA 5.7 [11], а в последнее время — его новую версию [12], специально настроенную для генерации  $b\bar{b}$ -событий при

---

<sup>3</sup>И мюонных фильтров — если говорить о мюонном детекторе.

<sup>4</sup>Здесь и далее, если не оговорено особо, подразумевается кинетическая энергия.

энергии ускорителя LHC [13]. Выполненное в коллаборации CMS [14] сравнение различных генераторов показывает, что DTUJET и PYTHIA производят события со значительно отличающимися характеристиками. В частности, множественность вторичных частиц в PYTHIA 5.7 при энергии LHC и стандартных значениях начальных параметров может быть больше на 50% по сравнению с DTUJET93. Данная работа не ставит своей целью исследование моделирования адрон-адронных взаимодействий различными генераторами вторичных частиц. Тем не менее необходимо отметить, что уже разница на уровне генераторов первичных частиц из точки протон-протонного взаимодействия может приводить к заметной неопределенности в результатах моделирования.

При нормировке для перевода результатов в плотность потока частиц на  $\text{см}^2$  в секунду и величину уровня поглощенной дозы в Гр в год использовались следующие значения величин:

- 80 мбарн для величины сечения неупругого протон-протонного взаимодействия;
- значение  $2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для проектной и  $5 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  — для максимальной светимости в точке встреч пучков эксперимента LHCb;
- $10^7 \text{ с}$  для продолжительности работы ускорителя LHC в течение года.

В общем случае везде, где это не оговорено специально, представленные результаты расчетов плотностей потоков частиц и уровней поглощенной дозы нормированы на одно протон-протонное взаимодействие в точке встреч пучков. Используемая в отдельных случаях нормировка результатов на максимальную светимость в точке встреч равнозначна использованию значения 2.5 для коэффициента безопасности.

### 3. Вершинный детектор

Вершинный детектор эксперимента LHCb предназначен для прецизионного измерения координат треков вторичных частиц вблизи точки встреч пучков ускорителя. Полученные координаты затем используются для реконструкции вершин распада В-мезонов. Для обеспечения требуемой точности в конструкции вершинного детектора предполагается использовать дискообразные кремниевые детекторы, расположенные, в отличие от аналогичных детекторов экспериментов CMS [15] и ATLAS [16], перпендикулярно оси пучка ускорителя. В настоящее время похожую конструкцию вершинного детектора использует действующий эксперимент HERA-B (DESY) [17].

Конструкция вершинного детектора эксперимента LHCb<sup>5</sup> состоит из 17 станций. Каждая станция детектора состоит из двух кремниевых дисков толщиной 150 мкм каждый. Станции вершинного детектора расположены во внутреннем вакуумном танке по обе стороны от точки встреч пучков, двенадцать станций со стороны эксперимента<sup>6</sup> и пять станций со стороны компенсационного магнита LHC. Общий вид вершинного детектора LHCb, вместе с внешним и внутренним вакуумными танками и вспомогательным оборудованием, приведен на рис. 2.

Вершинный детектор полностью перекрывает область быстрот  $\eta < 5$ : минимальный радиус чувствительной области отдельной станции составляет 1 см, а максимальный — 6 см. Номинальная светимость эксперимента LHCb предполагается относительно невысокой,  $2 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , однако размещение станций вблизи оси пучка приводит к высоким

<sup>5</sup>Описывается конфигурация Технического предложения эксперимента LHCb.

<sup>6</sup>Конфигурация станций детектора не симметрична относительно точки встреч.

значениям плотностей потоков заряженных частиц и уровней поглощенной дозы в станциях детектора. В то же время положение вершинного детектора ЛНСб внутри туннеля ЛНС приводит к радиационной обстановке в зоне детектора, отличной от вершинных детекторов других экспериментов ЛНС.

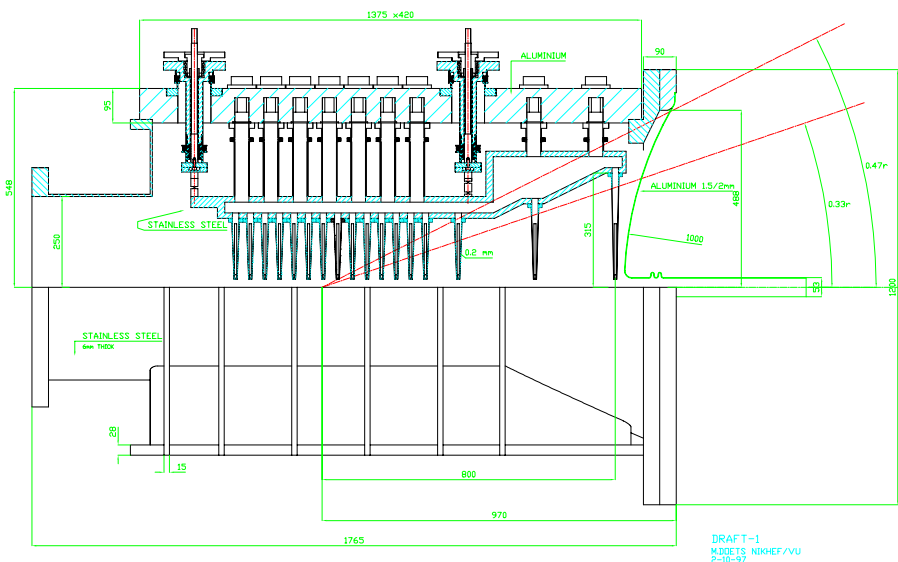


Рис. 2. Общий вид вершинного детектора ЛНСб (вид сбоку).

### 3.1. Геометрия вершинного детектора

При проведении расчетов значений плотностей потоков и уровней поглощенной дозы в чувствительном материале детектора описание станций было максимально приближено к модели, используемой при моделировании физических характеристик детектора [18]. Материал 17 станций вершинного детектора был разделен по радиусу на три части. Каждая станция от 1 см до 6 см по радиусу<sup>7</sup> имела вид кремниевого диска толщиной 300 мкм. За кремниевым диском следовала модель опоры и системы кабелей станции толщиной 900 мкм, состоявшая из бериллия до радиуса 12 см и смеси Cu/C в соотношении 1:1 по весу до радиуса 17,4 см первого, внутреннего, вакуумного танка. В дополнение каждая станция с обеих сторон была покрыта алюминиевой фольгой толщиной 100 мкм.

Характеристики материала обоих вакуумных танков и вспомогательного оборудования, расположенного вокруг станций вершинного детектора, были также включены в описание геометрии в программе моделирования в соответствии с инженерным чертежом, приведенным на рис. 2. Стальной внутренний вакуумный танк был соединен шестью ребрами жесткости со вторым внешним танком, имеющим радиус 50 см. Внешний танк имел алюминиевую крышку толщиной 9,5 см. Модель двух юстировочных моторов, расположенных на крышке внешнего танка, а также дополнительные инженерные детали конструкции вершинного детектора были также учтены в геометрии задачи.

Вокруг вершинного детектора были также размещены элементы ускорителя ЛНС. В их число входила вакуумная камера с внутренним радиусом 5 см и толщиной 1 мм

<sup>7</sup>Здесь и далее, если не оговорено особо, расстояние дается от оси пучка ускорителя.

в области от точки встреч до компенсационного диполя ЛНС<sup>8</sup>. Как точное положение диполя в тоннеле ускорителя, так и его конструкция на момент проведения расчетов не были определены. В расчетах была использована простая модель в виде железного параллелепипеда с поперечным сечением  $1 \times 0,77 \text{ м}^2$  и полостью  $0,6 \times 0,05 \text{ м}^2$  для вакуумной камеры, расположенного на расстоянии  $3,33 \text{ м}$  от точки встреч. Область вершинного детектора была окружена тоннелем ЛНС в соответствии с инженерными чертежами экспериментальной зоны ЛНС<sup>9</sup>, материалом стен тоннеля был задан тяжелый бетон с плотностью  $3,673 \text{ г/см}^3$ . Также в расчетах были заданы элементы детектора ЛНС, расположенные в экспериментальном зале до магнита ЛНС<sup>6</sup> включительно.

### 3.2. Обзор результатов моделирования

Расчитанные распределения плотностей потоков заряженных частиц<sup>10</sup>, нейтронов и уровней поглощенной дозы как функции расстояния от оси пучка ускорителя приведены на рис. 3 и 4. Плотности потоков частиц нормированы на 1 событие в точке встреч эксперимента ЛНС, а уровень поглощенной дозы приведен для максимальной светимости ЛНС  $5 \times 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и значения  $10^7 \text{ с}$  для продолжительности одного года работы ускорителя. Расчеты плотностей потоков частиц и уровней поглощенной дозы были выполнены при значении  $10 \text{ МэВ}$  для порога транспорта по энергии адронов, кроме нейтронов, и  $100 \text{ кэВ}$  для  $\gamma$ -квантов и электронов. Для исследования эффекта замедления нейтронов в тоннеле ускорителя моделирование переноса нейтронов было выполнено со значением  $10^{-3} \text{ эВ}$  для порога по энергии.

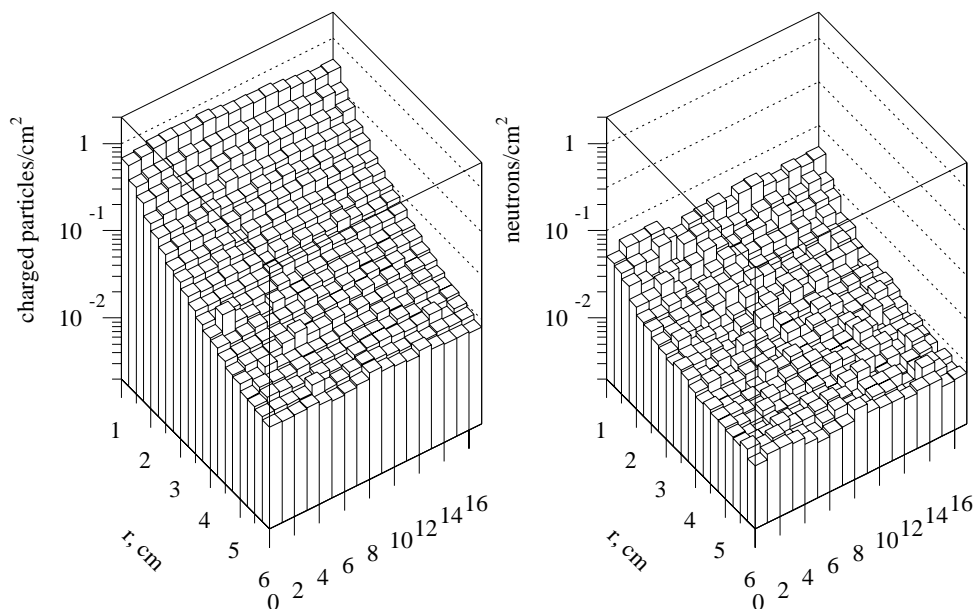


Рис. 3. Распределения плотностей потоков заряженных частиц и нейтронов в станциях вершинного детектора ЛНС в зависимости от радиуса и номера станции.

<sup>8</sup>Компенсирующего поле дипольного магнита эксперимента ЛНС.

<sup>9</sup>Предоставленными группой EST/LEA, ЦЕРН.

<sup>10</sup>Здесь и далее: сумма плотностей потоков заряженных адронов и электронов.



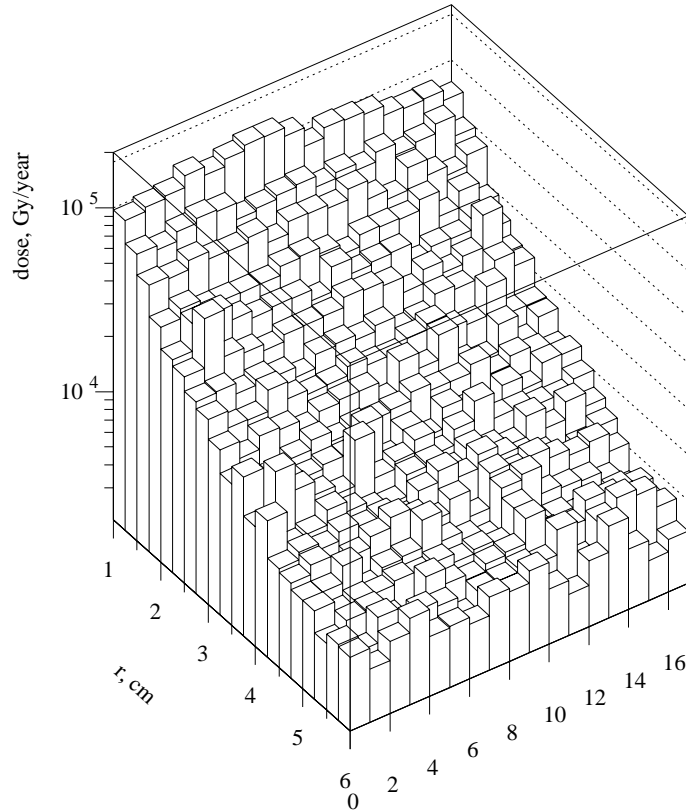


Рис. 4. Распределение уровней поглощенной дозы в станциях вершинного детектора LHCb в зависимости от радиуса и номера станции.

На рис. 5 приведено радиальное распределение плотности потока заряженных частиц для станции номер 06, расположенной ближе других станций, на расстоянии 2 см, от точки встреч пучков. Для сравнения на том же рисунке точками дано распределение плотности потока первичных частиц из точки протон-протонного взаимодействия, рассчитанное DPMJET II. Спектры протонов, пионов и нейтронов для станций 06 и 17 (последняя расположена дальше других станций от точки встреч, на расстоянии 78 см) на расстоянии 1 см от оси пучка приведены на рис. 6. В таблице 1 приведены рассчитанные значения плотности эквивалентного потока нейтронов энергии 1 МэВ<sup>11</sup> в зависимости от расстояния до оси пучка.

Таблица 1. Плотность эквивалентного потока нейтронов для станций номер 06 и 17 вершинного детектора

Плотность эквив. потока нейтронов/см <sup>2</sup> × 10 <sup>-1</sup>					
радиус	1 см	2 см	3 см	4 см	5 см
станция 06	5,233	1,524	0,735	0,456	0,308
станция 17	4,120	1,320	0,668	0,382	0,272

<sup>11</sup>Далее для краткости — “эквивалентный поток нейтронов” [19].

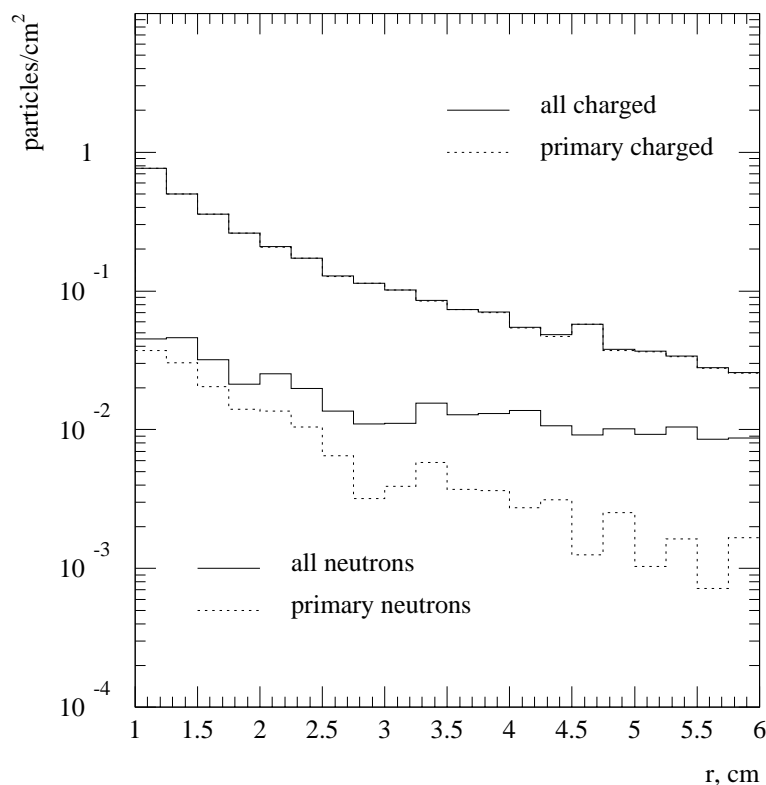


Рис. 5. Полная плотность потока заряженных адронов и нейтронов (сплошные линии) и соответствующие плотности потоков первичных, из точки протон-протонного взаимодействия, частиц (точки) в области станции 06 вершинного детектора.

### 3.3. Плотность потока заряженных частиц

Как видно из рис. 3, радиальное распределение плотности потока заряженных частиц оказывается достаточно независимым от положения конкретной станции вершинного детектора относительно точки встреч эксперимента. Максимальное среднее значение плотности потока заряженных частиц в вершинном детекторе составляет  $0,8$  частиц/см<sup>2</sup> на радиусе  $1$  см на одно взаимодействие в точке встреч. Радиальное распределение плотности потока заряженных частиц с хорошей точностью может быть аппроксимировано формулой  $a(z)/r^2$ , где коэффициент  $a(z)$  оказывается практически постоянным вдоль оси пучка<sup>12</sup>. Для максимальной светимости в точке встреч эксперимента ЛНСб это соответствует плотности потока  $3,2 \times 10^7$  частиц/см<sup>2</sup> в секунду.

Как можно видеть из рис. 5, разница между плотностью потока первичных заряженных частиц из точки взаимодействия и полной плотностью потока заряженных частиц<sup>13</sup> в области вершинного детектора невелика. Это объясняется тем, что количество материала детектора, расположенного вблизи оси пучка, составляет примерно  $0,6\%$  радиационной длины на одну станцию, чего, очевидно, недостаточно для инициализации существенного числа адронных каскадов. Поэтому в принятой конфигурации детектора доля вторичного излучения в области детектора составляет в максимуме около процента от суммарной плотности потока заряженных частиц. В то же время очевидным является требование размещения на как можно больших радиусах, в области малых значений плотностей потоков частиц, вспомогательного оборудования станций детектора, увеличивающего количество материала вершинного детектора. Все сказанное выше верно лишь

<sup>12</sup>С учетом протяженности точки встреч вдоль продольной оси эксперимента.

<sup>13</sup>Т.е. включая вторичные заряженные частицы.

для плотности потока заряженных частиц. Распределение плотности потока нейтронов в области вершинного детектора существенно отличается от распределения плотности потока заряженных частиц и будет обсуждаться отдельно ниже.

Рис. 6 показывает изменение спектров адронов в области вершинного детектора при удалении от точки встреч. Как видно, в потоке адронов доминируют пионы, составляющие 90% всех адронов, и, таким образом, отвечающие за радиационное повреждение кремниевых элементов детектора. Поток всех остальных адронов составляет по сути лишь небольшую добавку к потоку пионов.

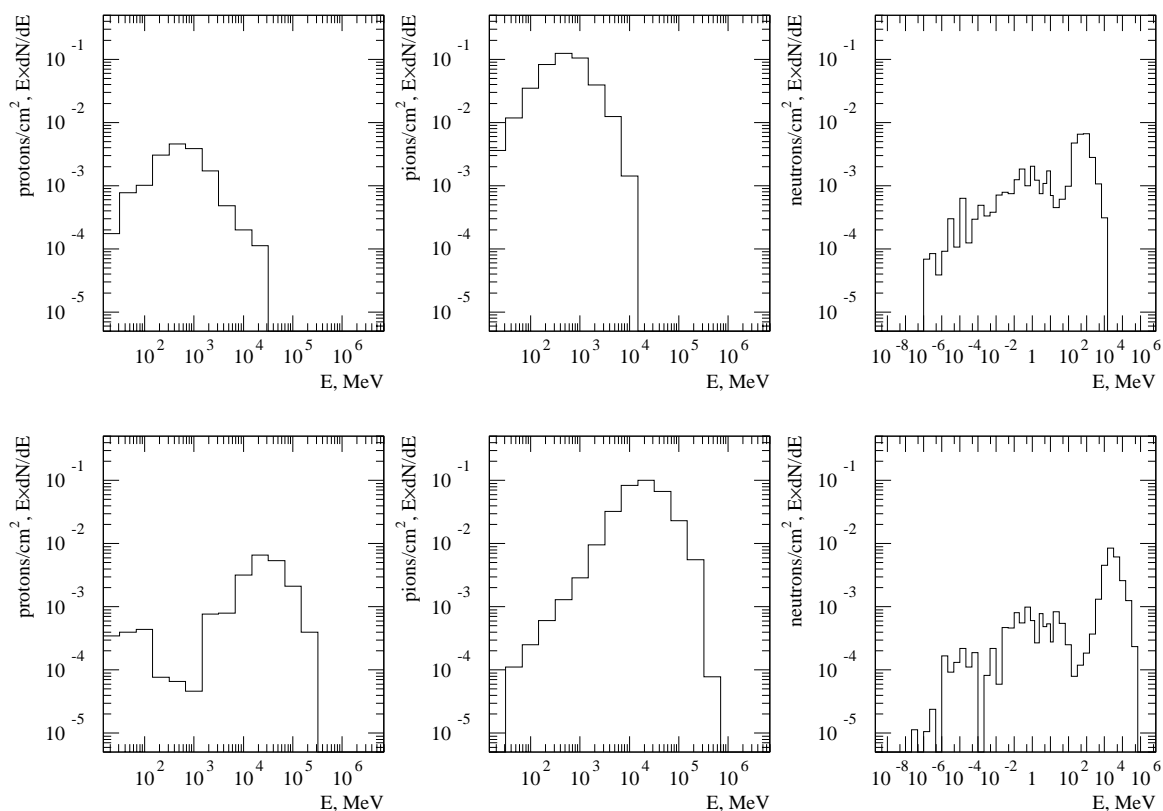


Рис. 6. Спектры протонов, пионов и нейтронов для станций вершинного детектора номер 06 (вверху) и 17 (внизу).

Следует отметить, что вклад электронов в плотность потока заряженных частиц в области вершинного детектора оказывается незначительным. В первую очередь, это обусловлено отсутствием “прямых” электронов из точки протон-протонного взаимодействия [27]. Кроме того, количество материала в области детектора мало для образования значительного числа электрон-фотонных ливней от первичных частиц или от  $\gamma$ -квантов, образующихся при захвате тепловых нейтронов. Тем не менее, этот вклад также был принят во внимание, хотя такой учет и не привел к изменению результата для плотности потока заряженных частиц.

Приведенные на рис. 4 уровни поглощенной дозы в чувствительном материале вершинного детектора даны для  $4 \times 10^7$  взаимодействий в секунду в точке встреч и одного года работы ускорителя продолжительностью  $10^7$  с. При этих условиях максимальное

значение уровня поглощенной дозы в кремнии станций вершинного детектора составляет  $10^5$  Гр/год<sup>14</sup> на радиусе 1 см и 2 кГр/год на максимальном радиусе 6 см, т.е. в области планируемого расположения электроники детектора.

### 3.4. Плотность потока нейтронов

Величина плотности потока нейтронов в области вершинного детектора обусловлена его особенным расположением в эксперименте. Поскольку точка встреч эксперимента ЛНСб расположена внутри туннеля ЛНС, вершинный детектор окружен стенами туннеля ускорителя, которые являются источником вторичных частиц вообще и выступают в качестве замедлителя нейтронов в частности. Это отличает вершинный детектор ЛНСб как от детекторов центральной области других экспериментов ЛНС, которые расположены в открытой области экспериментальной зоны, так и от других детекторов ЛНСб.

Как видно из рис. 5, если величина плотности потока заряженных частиц быстро падает с увеличением радиуса станции, то плотность потока нейтронов остается почти постоянной в области детектора. Это происходит потому, что туннель ЛНС работает как “нейтронород” для нейтронов, образующихся в области вершинного детектора, в вакуумной камере ускорителя, расположенной за вершинным детектором, и на лицевой поверхности компенсационного диполя ЛНС. Заполняя туннель, вторичные нейтроны доминируют в потоке частиц на больших расстояниях от оси пучка и определяют радиационную обстановку в этих областях. Так, уже на расстоянии 7 см от оси пучка, в месте расположения электроники вершинного детектора, поток нейтронов составляет почти половину всего потока адронов.

Это означает, что, как в области вершинного детектора, так и других детекторов эксперимента ЛНСб, которые должны быть расположены внутри туннеля ЛНС<sup>15</sup>, значение плотности потока нейтронов составит около 0,01 нейтронов/см<sup>2</sup> на одно взаимодействие в точке встреч. Причем эта величина будет слабо зависеть от расстояния от оси пучка и положения соответствующего детектора вдоль оси эксперимента. Значение плотности потока нейтронов, однако, может быть уменьшено путем покрытия стен туннеля материалом, способным эффективно замедлять и поглощать нейтроны.

### 3.5. Эквивалентный поток нейтронов

Прогнозируемая величина плотности эквивалентного потока нейтронов в области вершинного детектора была получена путем свертки рассчитанных спектров адронов с соответствующими переходными коэффициентами [20]. Исходными данными для свертки служили представленные на рис. 6 рассчитанные спектры адронов. Как уже отмечалось в п. 3.3, в области вершинного детектора в потоке адронов доминируют пионы с энергией в области  $10 \div 100$  ГэВ. Мюоны, как прямые, так и образующиеся в исследуемой области в результате распадов пионов и каонов, не были учтены при переходе к эквивалентному потоку нейтронов, но их вкладом в радиационное повреждение кремниевых элементов детектора можно пренебречь из-за незначительной величины плотности их потока по сравнению с плотностью потока заряженных адронов<sup>16</sup>.

<sup>14</sup>1 Гр=100 рад.

<sup>15</sup>Две первые трековые станции и первый черенковский детектор.

<sup>16</sup>То же верно и для электронов.

Радиальное распределение плотности эквивалентного потока нейтронов для станций номер 06 и 17 вершинного детектора приведено в таблице 1. Разница в абсолютных значениях отражает разницу в исходных спектрах адронов в области соответствующих станций. В то время, как абсолютные значения полной плотности потока адронов для этих двух станций близки друг к другу, спектры адронов всех трех представленных типов для станции 17 существенно жестче. Как известно [21], для пионов максимум коэффициента радиационного повреждения расположен в области  $0.1 \div 1$  ГэВ, в то время как для протонов соответствующий коэффициент увеличивается с уменьшением энергии [22]. Это обуславливает максимальную разницу в 20% в полученных значениях для станций 06 и 17. Как видно из приведенных в таблице величин, на радиусе 1 см от оси пучка значение плотности эквивалентного потока нейтронов составляет около  $0,5$  нейтронов/см<sup>2</sup> на одно взаимодействие в точке встреч, или  $2 \times 10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup> в год для максимальной светимости эксперимента LHCb<sup>17</sup>.

#### 4. Центральный трекер LHCb

Задачей трековой системы эксперимента LHCb является реконструкция треков заряженных частиц с целью измерения их импульса. Трековая система эксперимента состоит из одиннадцати станций, расположенных вдоль вакуумной камеры ускорителя, между вакуумным танком вершинного детектора и электромагнитным калориметром. Выбор геометрии детекторов и технологии их конструкции определяется уровнем радиационной нагрузки в области детекторов системы. На момент проведения данного исследования предполагалось, что трековая система эксперимента LHCb состоит из внешнего и внутреннего (или центрального) трекеров.

Центральный трекер должен перекрывать область быстрот  $\eta < 5.3$  вокруг вакуумной камеры ускорителя, где нагрузки на детекторы слишком велики для использования стандартных дрейфовых камер. Предполагается, что все станции центрального трекера будут иметь фиксированный внешний размер  $60 \times 40$  см<sup>18</sup>. Внутренний размер станций центрального трекера определяется диаметром конической вакуумной камеры и в зависимости от позиции конкретной станции меняется от 3 до 13 см. Поскольку станции внутреннего трекера располагаются на минимальном расстоянии от оси пучка, можно прогнозировать высокие уровни плотности потока заряженных частиц и поглощенной дозы в чувствительных элементах детекторов.

Технология станций центрального трекера должна обеспечивать функционирование детекторов в условиях высокой плотности потока заряженных частиц. В качестве базовых рассматриваются две технологии детекторов: газовые камеры MSGC/GEM и кремниевые детекторы. Главной проблемой камер MSGC/GEM является высокая вероятность пробоя при больших значениях плотности потока адронов [23]. Кремниевые детекторы, хотя и имеют большую стоимость<sup>19</sup>, способны выдерживать значительные радиационные нагрузки и не предполагают использования газа в детекторе.

<sup>17</sup>При использовании генератора РУТНА 5.7 со стандартными начальными параметрами для расчета первичных частиц из точки протон-протонного взаимодействия полученные значения, как было уже указано, будут на 50% выше.

<sup>18</sup>Внешний размер станций центрального трекера определяется максимальным уровнем радиационной нагрузки, допустимым для станций внешнего трекера.

<sup>19</sup>В то же время все источники отмечают, что основную часть стоимости центрального детектора будет составлять цена электроники сбора данных.

Приведенные ниже результаты были получены для случая использования кремниевых детекторов в центральном трекаре [28]. Принимая во внимание то, что количество материала в центральном трекаре должно быть минимизировано вне зависимости от выбора технологии детекторов, а основным источником вторичного излучения является материал вакуумной камеры ускорителя, полученные результаты применимы для любого из вариантов технологии детекторов.

#### 4.1. История вопроса

Вопрос о величине плотности потока частиц вообще и заряженных частиц в частности в центральном трекаре ЛНСб является одним из актуальных вопросов проектирования эксперимента, поскольку диктует выбор в пользу той или иной технологии детекторов в этой области эксперимента. Первая оценка величины плотности потока заряженных частиц в области центрального трекара была выполнена для “Письма о намерениях эксперимента ЛНСб” [1]. Эта оценка показала, что на расстоянии 5 см от оси пучка плотность потока заряженных частиц в центральном трекаре составит 0,12 частиц/см<sup>2</sup> на одно протон-протонное взаимодействие в точке встреч. Более детальное исследование, выполненное для “Технического предложения эксперимента ЛНСб” [2], дало величину 0,15 частиц/см<sup>2</sup> на одно взаимодействие, в максимуме на расстоянии 3,05 м от точки встреч [24].

Эти исследования были проведены до апреля 1999 года, поэтому использовали идеальную модель вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента. Известно, что вакуумная камера ускорителя является основным источником вторичного излучения в центральной области трековой системы эксперимента ЛНСб [4]. Первая реалистичная конструкция вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента ЛНСб появилась лишь в 1999 году [25], и выполненное новое исследование показало общее увеличение потока частиц в данной области в 1,5÷4 раза [5].

Однако как количество материала в области центрального трекара ЛНСб, так и собственно конструкция и размещение станций центрального трекара на момент проведения вышеупомянутых исследований определены не были. Настоящая работа представляет первую оценку плотности потока частиц и уровней поглощенной дозы в центральном трекаре эксперимента ЛНСб с использованием реальной модели как вакуумной камеры ускорителя, так и станций центрального трекара.

#### 4.2. Модель центрального трекара

Как уже упоминалось выше, в данной работе исследуется модель центрального трекара ЛНСб, использующая кремниевые детекторы. Рассмотренная конструкция станции центрального трекара показана на рис. 7 (модель ИФВЭ, Лозанна). В этой модели каждая станция центрального трекара состоит из двух симметричных половин, верхней и нижней, размером 60×20 см<sup>2</sup> каждая. Размер прямоугольного отверстия в центре станции (см. рис. 7) определяется диаметром конической вакуумной камеры в месте расположения конкретной станции. Положение станций центрального трекара вдоль продольной оси эксперимента и размер отверстия для вакуумной камеры соответствовали заданным в программе моделирования SICb версии 223 [26] (см. табл. 2).

Таблица 2. Среднее положение вдоль продольной оси эксперимента,  $Z_{mean}$ , и размер  $(x, y)_{min}$  отверстия для вакуумной камеры для станций центрального трекера (размеры в см)

станция	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$Z_{mean}$	100	217	330	480	620	700	790	840	890	940	1160
$(x, y)_{min}$	3.1	2.8	3.9	5.6	7.1	7.8	8.7	9.2	9.8	10.3	12.6

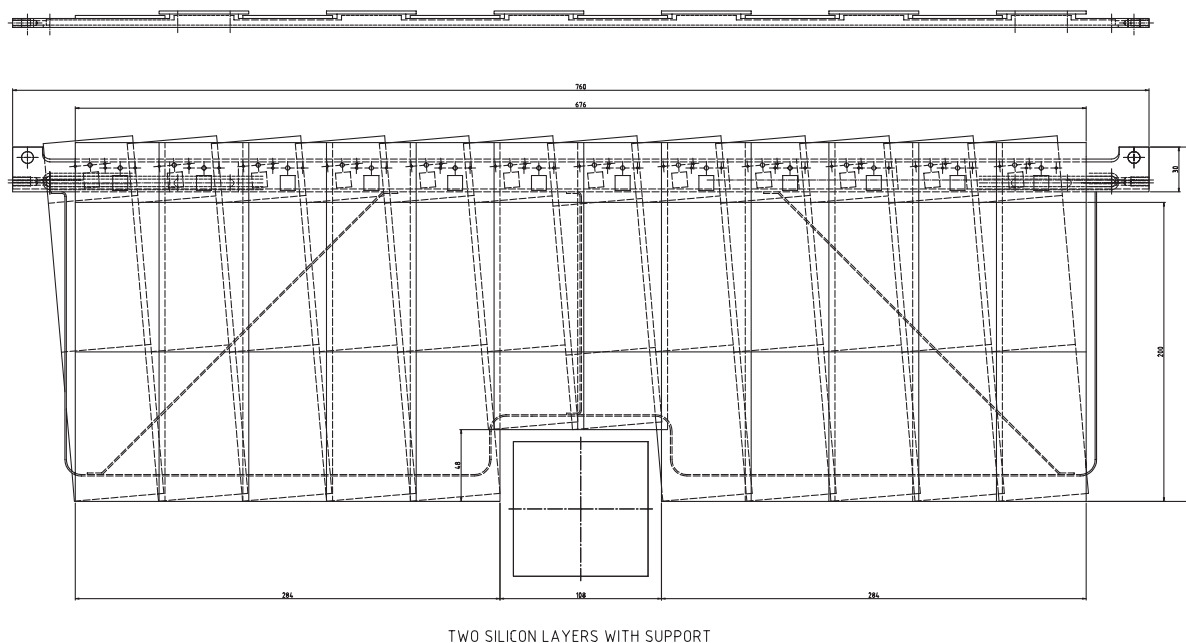


Рис. 7. Половина станции центрального трекера ЛНСб.

Конструкция каждой станции включала в себя четыре слоя кремниевых детекторов толщиной 300 мкм, состоявших из полос шириной 6 см, расположенных под углом  $\pm 5^\circ$  к вертикали. Каждая из полос детекторов крепилась к фиброглассовой опоре толщиной 2,4 мм для обеспечения требуемой жесткости. Длина полосы детектора составляла 20 см, за ней следовала полоса алюминия длиной 5 см той же толщины, предназначенная для размещения электроники детектора.

Фиброглассовые опоры были закреплены по обе стороны продольной алюминиевой опоры, образуя два слоя, или одну гребенку детекторов. Внутри опоры была расположена трубка системы охлаждения. Каждые две гребенки крепились на общей пластиковой опоре, образуя одну половину станции детектора. Необходимую жесткость на противоположном конце детекторов обеспечивала дополнительная лента, соединявшая по периметру все фиброглассовые полосы. Вся конструкция станции была помещена внутрь оболочки, заполненной азотом.

Необходимо отметить, что при проведении расчетов не были приняты во внимание как необходимые опоры для фиксации вдоль оси пучка станции детектора как единого целого, так и неизбежные элементы интеграции центрального трекера со станциями внешнего трекера. Предполагается, что каждая станция центрального трекера фиксируется на станции внешнего трекера, модель крепежа которых на данный момент не разработана.

### 4.3. Представление результатов

Двумерные  $(x, y)$  распределения значений плотностей потоков заряженных адронов, нейтронов и электронов, а также уровней поглощенной дозы были рассчитаны для кремниевых детекторов всех одиннадцати станций центрального трекера с использованием сетки  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . Полученные значения были затем усреднены по четырем слоям детекторов каждой станции.

Двумерные распределения, в свою очередь, были усреднены по станции детектора вдоль сторон квадрата отверстия для вакуумной камеры. Приведенные ниже значения плотностей потоков частиц и уровней поглощенной дозы взяты из полученных одномерных распределений. Данная процедура позволяет получить численные значения, пригодные для практического использования, но приводит к несколько заниженным значениям величин. Связано это с тем, что точки, соответствующие углам квадрата отверстия для вакуумной камеры, расположены дальше от оси пучка, чем точки, расположенные в серединах сторон этого квадрата. Как результат, процедура усреднения дает значения плотностей потоков частиц и уровней дозы в среднем на 30% ниже, чем максимальные значения.

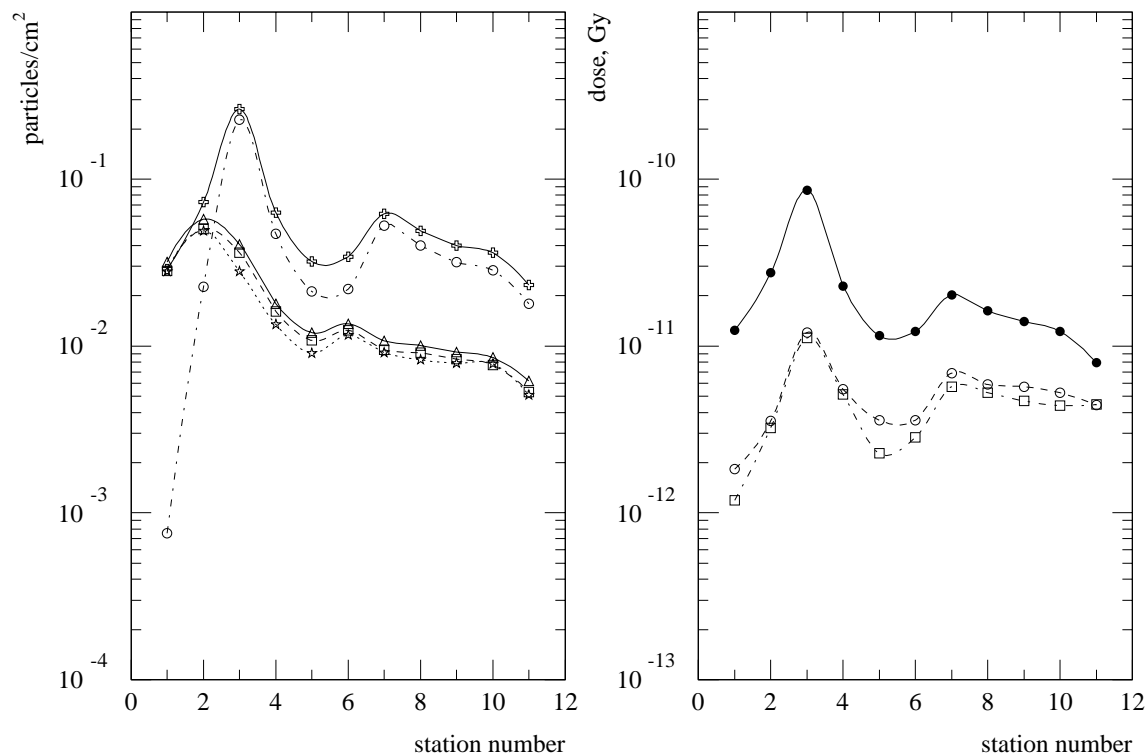


Рис. 8. Величины максимальных плотностей потоков частиц и уровней поглощенной дозы в центральном трекере LCHb.

Значения максимальных плотностей потоков частиц и уровней поглощенной дозы в центральном трекере LCHb приведены на рис. 8. На рисунке слева приведены значения плотностей потока заряженных адронов (квадраты), электронов (окружности), суммы заряженных адронов и электронов (кресты), всех адронов (треугольники) и первичных заряженных адронов (звезды) в зависимости от номера станции центрального трекера.



Справа на рисунке даны значения максимального (круги) и среднего (окружности) уровня поглощенной дозы, а также уровень дозы на расстоянии 20 см по горизонтали от оси пучка (квадраты). На рис. 9 приведены спектры адронов, усредненные по поверхности станции, для станции 02 центрального трекера.

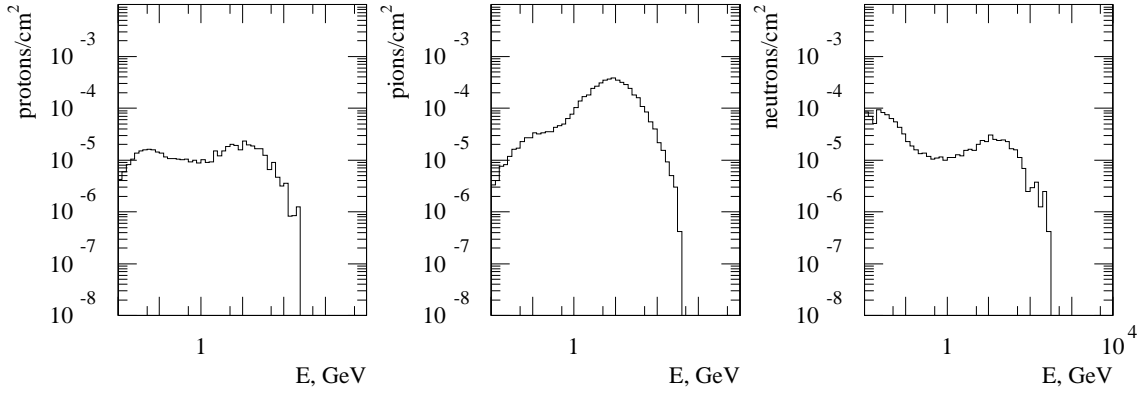


Рис. 9. Спектры протонов, пионов и нейтронов для станции 02.

Для оценки нижнего уровня значений плотностей потоков частиц был проведен тестовый расчет без материала вакуумной камеры ускорителя и станций центрального трекера. Полученные значения соответствуют плотности потока первичных частиц, приходящих в область центрального трекера непосредственно из точки встреч. Необходимо отметить, что полученная оценка плотности потока первичных частиц зависит только от параметров точки встреч эксперимента LHCb и не зависит от конструкции вакуумной камеры ускорителя и собственно центрального трекера. Таким образом, эта величина не может быть уменьшена путем внесения изменений в конструкцию данных систем эксперимента.

Дополнительный расчет был проведен также без материала центрального трекера, но с учетом материала вакуумной камеры. Было определено, что в первом приближении влияние материала станций центрального трекера на формирование поля вторичных частиц в исследуемой области мало по сравнению с вкладом от материала вакуумной камеры. Строго говоря, это верно лишь для центрального трекера, поскольку вопрос о влиянии материала центрального трекера на формирование поля вторичного излучения в области внешнего трекера LHCb оставлен за рамками данной работы.

#### 4.4. Плотность потока заряженных частиц

Поток первичных заряженных частиц — частиц, приходящих в область центрального трекера непосредственно из точки встреч пучков эксперимента, — складывается только из потока адронов, поскольку в потоке частиц из точки протон-протонного взаимодействия практически отсутствуют электроны [27]. Значение плотности потока первичных частиц дает минимальное прогнозируемое значение плотности потока частиц в исследуемой области, поскольку не зависит от конструкции элементов эксперимента LHCb. Как видно из рис. 8, максимальное значение плотности потока первичных частиц в центральном трекере, в станции 02, составляет  $5 \times 10^{-2}$  частиц/см<sup>2</sup>. Для максимальной светимости  $5 \times 10^{32}$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> это соответствует плотности потока  $2 \times 10^6$  частиц/см<sup>2</sup> в секунду.

Переходя к плотности полного потока заряженных частиц, как можно видеть из рис. 8, влияние материала вакуумной камеры на величину плотности потока заряженных адронов сравнительно невелико. Относительная разница между плотностью полного потока и плотностью потока первичных частиц для заряженных адронов составляет около 10 процентов. В то же время в полном расчете с учетом количества материала можно наблюдать значительное увеличение плотности потока электронов, составляющих от 60 до 90% от плотности полного потока частиц.

Такое увеличение потока электронов при учете в исследуемой задаче материала вакуумной камеры обусловлено значительным числом  $\pi^0$ , составляющим до 25% первичных частиц из точки протон-протонного взаимодействия [27]. Образующиеся в результате распада  $\pi^0$  вторичные  $\gamma$ -кванты конвертируют в электроны на материале вакуумной камеры, которые и определяют плотность потока заряженных частиц в центральном трекаре. В абсолютном максимуме, в области станции 03 центрального трекара, плотность полного потока заряженных частиц составляет 0,3 частиц/см<sup>2</sup>, что для максимальной светимости эксперимента LHCb составляет  $1,2 \times 10^7$  частиц/см<sup>2</sup> в секунду.

Как показали результаты расчетов, максимальное интегральное значение числа частиц, достигаемое в станции 03, составляет около 10 заряженных адронов и около 100 заряженных частиц на одно взаимодействие. Функционирование кремниевых детекторов центрального трекара не зависит от этой величины, но при использовании газовых камер приведенные значения существенны для оценки вероятности пробоя.

#### 4.5. Уровень поглощенной дозы

Сравнение результатов, приведенных на рис. 8, показывает, что максимальный уровень поглощенной дозы наблюдается в тех же станциях центрального трекара, что и максимальное значение плотности потока заряженных частиц. В абсолютном максимуме, для станции 03, уровень поглощенной дозы в кремниевом детекторе составляет  $10^{-10}$  Гр на одно взаимодействие в точке встреч и  $2 \times 10^{-11}$  Гр во втором максимуме, для станции 07. Для стандартного года работы эксперимента при максимальной светимости это соответствует уровню 40 кГр в год, т.е. величине лишь в 2–3 раза меньшей, чем для области вершинного детектора LHCb [29].

Как видно из рис. 8, уровень поглощенной дозы резко падает при увеличении расстояния от оси пучка. На расстоянии 10 см его среднее значение в 2–10 раз меньше максимального значения уровня поглощенной дозы в чувствительном материале станции. На рис. 8 также приведен уровень дозы на расстоянии 20 см от оси пучка, где планируется размещение электроники центрального трекара. Максимальный уровень поглощенной дозы в данной области составляет 4 кГр в год, что приводит к необходимости использования радиационно стойких компонент для этой части электроники детектора.

#### 4.6. Эквивалентный поток нейтронов

Спектры адронов, использованные ниже для оценки эквивалентного потока нейтронов для станции 02 центрального трекара, приведены на рис. 9. Поскольку спектры адронов слабо зависят от положения станции вдоль оси пучка [28], можно определить единый

коэффициент перехода от плотности потока адронов к плотности эквивалентного потока нейтронов для всей области центрального трекера<sup>20</sup>.

Коэффициент перехода рассчитывается из средних величин плотностей потоков адронов, приведенных в таблице 3. В первой строке таблицы приведены средние значения плотности потока адронов разного типа, вторая строка дает результат свертки спектра с соответствующими переходными коэффициентами [20].

**Таблица 3.** Плотность потока адронов и соответствующая плотность эквивалентного потока нейтронов для станции 02 центрального трекера

<b>Средняя плотность потока, частиц/см<sup>2</sup> × 10<sup>-3</sup></b>				
	протоны	нейтроны	пионы	сумма
плотность потока	0.50536	1.13916	4.97660	6.62112
нейтр. экв.	0.47548	1.45573	2.28917	4.22038

Коэффициент перехода определяется отношением сумм плотностей потоков в последней колонке таблицы и равен 0,64 или 64 процентам. Применение этого коэффициента к максимальному потоку всех адронов в области центрального трекера, приведенному на рис. 8, дает величину плотности эквивалентного потока нейтронов  $3,2 \times 10^{-2}$  нейтронов/см<sup>2</sup> на одно взаимодействие в точке встреч эксперимента LHCb, что в 15 раз меньше, чем соответствующее значение для области вершинного детектора LHCb [29].

### Заключение

В данной работе представлено исследование формирования поля вторичного излучения и оценка радиационных нагрузок в детекторах центральной области проектируемого в ЦЕРН эксперимента LHCb. Как показало исследование, уровень радиационной нагрузки на детекторы центральной области эксперимента LHCb определяется как особенностями положения соответствующих детекторов в эксперименте, так и конструкцией вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента.

Расположение станций вершинного детектора LHCb на расстоянии 1 см от оси пучка ускорителя приводит к высоким значениям плотности потока частиц и уровней поглощенной дозы в кремниевых элементах станций. На радиусе 1 см в области вершинного детектора величина плотности потока заряженных частиц составляет 0,8 частиц/см<sup>2</sup> на одно взаимодействие в точке встреч, или  $3,2 \times 10^7$  частиц/см<sup>2</sup> в секунду для максимальной светимости эксперимента LHCb.

Прогнозируемое для области вершинного детектора значение эквивалентного потока нейтронов,  $2 \times 10^{14}$  нейтронов/см<sup>2</sup> за год, сравнимо с соответствующими значениями для области центрального трекера CMS или внутреннего детектора ATLAS. Одновременно, как показано в работе, из-за расположения вершинного детектора LHCb внутри туннеля ускорителя, величина плотности потока нейтронов в области детектора, начиная с радиуса 3 см, будет практически постоянной и составит 0,01 нейтронов/см<sup>2</sup>, или  $4 \times 10^5$  нейтронов/см<sup>2</sup> в секунду при максимальной светимости эксперимента. Таким образом, в конструкции детекторов передней части эксперимента LHCb должен быть учтен

<sup>20</sup>С другой стороны, приведены спектры, усредненные для всей поверхности станции центрального трекера. Можно предположить, что для чувствительного материала станции, расположенного непосредственно вокруг вакуумной камеры, спектр адронов будет отличаться от приведенного (будет жестче), что приведет к изменению значения коэффициента перехода.

тот факт, что нейтроны будут доминировать в потоке адронов на больших радиусах как в области вершинного детектора, так и первых двух трековых станций и первого черенковского детектора.

Рассчитанное для области вершинного детектора LHCb максимальное значение уровня поглощенной  $10^5$  Гр/год близко к предельно допустимому для кремниевых детекторов и является главным ограничением на значение верхней границы диапазона быстрот, перекрываемого вершинным детектором. Уже при текущем значении минимального радиуса станций вершинного детектора представляется необходимой замена внутреннего материала станций раз в год, для чего представляется целесообразным деление по радиусу кремниевых дисков вершинного детектора на несколько частей, которые могли бы быть заменяемы независимо.

Для центрального трекера эксперимента LHCb формирование поля вторичного излучения определяется конструкцией вакуумной камеры ускорителя в области эксперимента и расположением вокруг центра трековой системы дипольного магнита. Как показано в работе, максимальное значение плотности потока заряженных адронов в области центрального трекера составляет  $5 \times 10^{-2}$  адронов/см<sup>2</sup>, или  $2 \times 10^6$  частиц/см<sup>2</sup> в секунду при максимальной светимости эксперимента LHCb. Величина плотности потока заряженных адронов слабо зависит от конструкции вакуумной камеры эксперимента и по сути определяет нижнюю границу величины плотности потока заряженных частиц, на который должны быть рассчитаны детекторы центрального трекера.

Максимальное значение плотности потока заряженных частиц в области центрального трекера составляет 0,3 частиц/см<sup>2</sup> на одно взаимодействие в точке встреч, или  $1,2 \times 10^7$  частиц/см<sup>2</sup> в секунду при максимальной светимости эксперимента LHCb. Максимальное значение уровня поглощенной дозы в центральном трекере составляет  $10^{-10}$  Гр, или 40 кГр в год для номинальной светимости эксперимента LHCb, величину лишь в 2–3 раза меньшую, чем для области вершинного детектора. Это приводит к необходимости замены детекторов центрального трекера в течение работы эксперимента, в связи с чем так же, как и для станций вершинного детектора, представляется целесообразным деление на несколько частей по длине кремниевых элементов станций.

Полная плотность потока заряженных частиц в центральном трекере определяется величиной плотности потока электронов, составляющих в потоке заряженных частиц от 60 до 90%. В отличие от плотности потока адронов, плотность потока электронов в центральном трекере сильно зависит от конструкции вакуумной камеры, а распределение максимального значения плотности потока электронов в зависимости от номера станции центрального трекера фактически повторяет распределение количества материала вакуумной камеры ускорителя по длине камеры. Это позволяет сделать вывод, что оптимизация конструкции вакуумной камеры (смещение вдоль оси пучка участков, содержащих наибольшее количество материала, замена материалов на более легкие<sup>21</sup> и т.д.) позволит снизить радиационные нагрузки на детекторы центрального трекера.

В заключение необходимо отметить, что уровень поглощенной дозы в предполагаемом расположении электроники детекторов составит 2 кГр/год для области вершинного детектора и 4 кГр/год для центрального трекера, что приводит к необходимости использования радиационно стойких компонент для электроники детекторов в исследуемой области.

---

<sup>21</sup>В предположении, что такая оптимизация возможна технически, например, что возможно изготовить алюминиевые фланцы для участков соединения секции вакуумной камеры вместо стальных.

## Благодарности

Автор хотел бы выразить свою искреннюю признательность Р.И. Джелядину и В.П. Крючкову за прочтение рукописи данной работы и многочисленные полезные замечания.

## Список литературы

- [1] The LHCb Collaboration. Letter of Intent. CERN/LHCC 95-5 LHCC/I8, CERN, 1995.
- [2] The LHCb Collaboration. Technical Proposal. CERN/LHCC 98-4 LHCC/P4, CERN, 1998.
- [3] The LHC Study Group. The Large Hadron Collider: Conceptual Design. CERN/AC/95-05 (LHC) (1995).
- [4] Holtey, G. von and Talanov V. Background study for LHCb detector, part II. CERN LHCb 97-010, CERN, 1997.
- [5] V. Talanov, G. von Holtey. Flux evaluation for the first realistic LHCb vacuum chamber. LHCb 2000-014, CERN, 2000.
- [6] R. le Gac, V. Talanov and A. Tsaregorodtsev. Particle fluxes in the LHCb muon system — comparison of GCALOR and MARS calculations. LHCb 99-036, CERN, 1999.
- [7] V. Talanov. Absorbed dose levels estimation for LHCb detector electronics locations. LHCb 2000-015, CERN, 2000.
- [8] Ажгирей И.Л., Курочкин И.А., Таланов В.В. Развитие комплекса программ MARS для решения радиационных проблем ядерно-технических установок. В кн.: Труды 15-го рабочего совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 22-24 октября 1996 г.
- [9] J. Ranft. DPMJET-II, a Dual Parton Model event generator for hadron-hadron, hadron-nucleus and nucleus-nucleus collisions. In: Proc. of SARE2 Workshop, CERN, October 9-11, 1995; CERN/TIS-RP/97-05.
- [10] P. Aurenche *et al.* // Computer Physics Commun. **83** (1994) 3236.
- [11] H.U. Bengtsson and T. Sjöstrand. // Computer Physics Commun. **46** (1986) 43; T. Sjöstrand, CERN-TH.7112/93.
- [12] T. Sjöstrand. Recent progress in Pythia. In: QCD and Weak Boson Physics Workshop. Fermilab, USA, March 4-6, 1999.  
<http://www.thep.lu.se/~torbjorn/Pythia.html>.
- [13] P. Bartalini *et al.* Tuning of multiple interactions generated by PYTHIA. LHCb 99-028, CERN, 2000.
- [14] M. Huhtinen and C. Seez. Uncertainties in fluences and doses at the CMS inner tracker. CMS/TN 95-133, CERN, 1995.

- [15] The CMS Collaboration. The Tracker Project Technical Design Report. CERN/LHCC 98-6 CMS TDR 5, CERN, 1998.
- [16] The ATLAS Collaboration. Inner Detector Technical Design Report. CERN/LHCC 97-16, ATLAS TDR 4, CERN, 1997.
- [17] M. Schmelling. Design issues of vertex detectors for B-physics at proton storage rings, the case of the HERA-B vertex detector. LHCb 97-025, CERN, 1997.
- [18] D. Steele. The R- $\phi$  silicon vertex detector simulation as implemented in SICB. CERN LHCb 98-004, CERN, 1998.
- [19] G. Lindstroöm *et al.* // NIM A **426** (1999) 1.
- [20] A. Vasilescu. Fluence normalization based on the NIEL scaling hypothesis. 3rd ROSE Workshop on Radiation Hardening of Silicon Detectors. DESY, Hamburg, 12-14 February 1998, DESY-PROCEEDINGS-1998-02.
- [21] M. Huhtinen and P.A. Aarnio. // NIM A **335** (1993) 580.
- [22] G.P. Summers *et al.* // IEEE NS **40** (1993) 1372.
- [23] J.P. Perroud and F. Ronga. Inner Tracker PSI run report of the micromegas detector March 28 — April 13 1999. LHCb 99-020, CERN, 1999.
- [24] N. Saguidova *et al.* Study of particle fluxes in the LHCb detector. LHCb 97-009, CERN, 1997.
- [25] J. Knaster-Rrefolio and G. Foffano. CERN drawing LHCVC8\_\_001.F.
- [26] SICb: GEANT3-based simulation package for the LHCb experiment.  
<http://lhcb.cern.ch/computing/sicb/html/sicbug.html>.
- [27] G. von Holtey and V. Talanov. Background study for LHCb detector, part I. LHCb 97-003, CERN, 1997.
- [28] V. Talanov. Radiation environment at the LHCb inner tracker area. LHCb 2000-013, CERN, 2000.
- [29] V. Talanov. Radiation environment at the LHCb vertex detector area. LHCb 98-019, CERN, 1998.

*Рукопись поступила 14 ноября 2000 г.*

В.В. Таланов

Исследование формирования поля вторичного излучения и оценка радиационных нагрузок в детекторах центральной области эксперимента LHCb на LHC.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Редактор Л.Ф.Васильева.

Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 28.11.2000. Формат 60 × 84/8. Офсетная печать.  
Печ.л. 2,5. Уч.-изд.л. 2. Тираж 130. Заказ 239. Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

