

Siberian Branch of Russian Academy of Science  
BUDKER INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS

Э.В. Анашкин, А.А. Гребенюк, И.Г. Снопков,  
Г.В. Федотович, Ю.В. Юдин

# Z-камера детектора КМД-2

Budker INP 99-84

Novosibirsk  
1999

## **Z-камера детектора КМД-2**

Э.В. Анашкин, А.А. Гребенюк, И.Г. Снопков, Г.В. Федотович,  
Ю.В. Юдин

### **Аннотация**

Z-камера является одной из основных систем детектора КМД-2, эксперименты с которым ведутся с 1992 года. В препринте описана конструкция камеры и технология ее изготовления. Проанализированы факторы, влияющие на точность измерения z-координаты и временное разрешение камеры. Описано использование Z-камеры в системе запуска, реконструкции событий и калибровки трековой системы.

## **Z-chamber of the CMD-2 Detector**

E.V. Anashkin, G.V. Fedotovitch, A.A. Grebeniuk, I.G. Snopkov,  
Yu.V. Yudin

### **Abstract**

The Z-chamber is a basic part of the coordinate system of the CMD-2 detector which is running from 1992. In this paper the design of the chamber and the manufacturing process are described. Different factors affecting longitudinal coordinate resolution as well as time measurements are analysed. The usage of Z-chamber in the trigger system, event reconstruction and coordinate system calibration are described.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Детектор КМД-2</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Основные требования к Z-камере</b>	<b>4</b>
2.1	Конструкция камеры и ее основные параметры . . . . .	7
2.2	Технология изготовления цилиндрических катодов . . . . .	11
2.3	Проверка натяжения проволочек . . . . .	14
2.4	Рабочая газовая смесь . . . . .	15
2.5	Электроника . . . . .	16
2.6	Оцифровывающая электроника . . . . .	19
2.7	Калибровки . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Характеристики Z-камеры</b>	<b>21</b>
3.1	Временное разрешение . . . . .	21
3.2	Пространственное разрешение . . . . .	25
3.3	Систематические сдвиги . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Z-камера в триггере КМД-2</b>	<b>27</b>
4.1	Заряженный триггер . . . . .	27
4.2	Интерфейс первичного триггера Z-камеры . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Реконструкция продольной координаты</b>	<b>30</b>
5.1	Общие соображения . . . . .	30
5.2	Описание алгоритма . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Использование Z-камеры в обработке событий</b>	<b>34</b>
6.1	Привязка Z-камеры к остальным системам КМД-2 . . . . .	34
6.2	Определение полярного угла трека . . . . .	35
6.3	Калибровка Дрейфовой камеры с помощью Z-камеры . . . . .	35

# 1 Детектор КМД-2

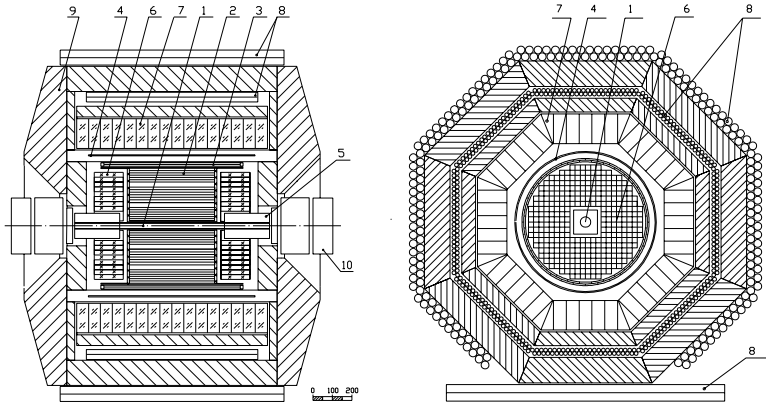


Рис. 1: Продольный и поперечный разрезы детектора КМД-2. 1 — вакуумная камера; 2 — дрейфовая камера; 3 — Z-камера; 4 — основной сверхпроводящий соленоид; 5 — компенсирующий соленоид; 6 — торцевой калориметр на основе BGO; 7 — цилиндрический калориметр на основе CsI; 8 — пробегная система; 9 — ярмо магнита; 10 — квадрупольные линзы.

Детектор КМД-2 [1, 2] спроектирован и построен в Институте ядерной физики СО РАН в 1985-1990 годах. Продольный и поперечный разрезы детектора схематически показаны на Рис. 1. Детектор состоит из цилиндрической Дрейфовой Камеры (ДК) (2) окружающей место встречи и цилиндрической пропорциональной Z-камеры (ZK) (3), помещенных внутрь тонкого ( $0.38 X_0$ ) сверхпроводящего соленоида (4) с полем 1 Тл. Цилиндрический CsI калориметр (7) и мюонная пробегная система (8) располагаются за соленоидом, вне магнитного поля. Торцевой BGO калориметр (6), также расположенный внутри соленоида, делает детектор практически герметичным для фотонов, вылетающих из места встречи. В препринте описана Z-камера детектора.

## 2 Основные требования к Z-камере

В большинстве детекторов, работающих на встречных пучках, для временной привязки события к моменту столкновения пучков и организации

запуска сбора данных используются специальные время-пролетные системы, основанные, как правило, на быстрых сцинтилляционных счетчиках.

Особенность детектора КМД-2 состоит в том, что в детекторе не используются сцинтилляционные счетчики, а их функции выполняет Z-камера, которая является не только координатным детектором, но и системой запуска (претриггером) и одной из основных частей первичного заряженного триггера. Измерение продольной координаты производится по зарядам, наведенным на полосковые катоды. Идея метода впервые предложена Шарпаком [4]. В связи с перечисленными функциями на камеру накладывается ряд требований, определяющих конструкцию камеры, режим работы и выбор газовой смеси. Рассмотрим их более подробно.

- **Привязка события к моменту столкновения пучков.** Для правильного восстановления треков в дрейфовой камере необходимо знать время, прошедшее от момента пролета частицы через детектор до момента ее регистрации. Момент столкновения пучков в ускорителе известен очень точно, но только внутри одного оборота. Выбор нужного оборота можно осуществить с помощью системы, у которой разброс временного интервала между моментом столкновения пучков и появлением сигнала с детектора не превышает время оборота. Сложность использования в качестве такого детектора пропорциональной камеры состоит в том, что кольцо ВЭПП-2М имеет периметр всего около 18 м, и период оборота пучков в нем равен 60 нс. Для получения такого маленького временного разброса необходимо иметь быструю газовую смесь и как можно меньшее расстояние между чувствительными проволочками. Технологические проблемы крепления проволочек ограничивают минимальное расстояние между ними на уровне 2–3 мм.
- **Высокая эффективность регистрации.** Использование Z-камеры в первичном триггере предъявляет повышенные требования к ее эффективности. Наличие у камеры двух независимых слоев позволяет не только обеспечить практически 100 % эффективность запуска, но и дает возможность продолжать работу в случае выхода из строя одного из слоев. Кроме того, измерение продольной координаты трека отдельно в каждом слое дает возможность контролировать пространственное разрешение камеры независимо от других систем детектора.
- **Пространственное разрешение.** Оптимизация пространствен-

ного разрешения камер с полосковыми катодами сводится, в основном, к правильному выбору отношения величины шага катодных полосок к расстоянию между анодной и катодной поверхностями. По соображениям, изложенным в разделе 5.1, это отношение должно быть в диапазоне 1–2. Для того, чтобы двухслойная камера поместилась в отведенном для нее в детекторе зазоре между Дрейфовой камерой и сверхпроводящим магнитом, расстояние анод–катод было выбрано равным 4 мм, соответственно, шаг катодных полосок был выбран 6.5 мм.

- **Сегментация камеры.** Количество независимых срабатывающих сегментов камеры всегда есть результат некоторого компромисса. С одной стороны, желательно уметь разделять несколько одновременно попавших в камеру частиц и использовать эту информацию в сочетании с остальными системами детектора. Такая привязка, в частности, входит в алгоритм работы первичного заряженного триггера. С другой стороны, стоимость электроники не должна выходить за разумные пределы. Для азимутального разбиения анодной части камеры достаточной выглядит сегментация, соответствующая сегментации дрейфовой камеры, т.е. 32 сектора в одном слое. При такой сегментации вероятность попадания двух частиц в один сектор Z-камеры порядка 3 % для двух треков и 10 % для трех треков. Сегментация катодной части камеры выбирается из следующих соображениями:

1. Сегментация вдоль оси Z определяется шагом катодных полосок. Этот шаг не может быть произвольным и определяется требованиями на оптимальное пространственное разрешение, изложенными в 5.1.
2. Поскольку катодные каналы не участвуют в триггере, особых требований на сегментацию по азимутальному углу нет, и разбиение катодных полосок на сектора (за исключением небольшого участка в центре камеры) определялось, в основном, конструкцией камеры и стоимостью электронного тракта.
3. В центральной части камеры желательно иметь большее число независимых каналов, так как частицы летят из места встречи пучков, и вероятность перепутывания коллинеарных треков в центре камеры значительно выше, чем на краях. Поэтому катодная область Z-камеры вблизи ее центра должна иметь большую азимутальную сегментацию. Размер этой области опре-

деляется длиной места встречи (для ВЭПП-2М  $\sigma_l \approx 2$  см) и должен быть порядка 10 см.

Для правильного измерения Z-координат двух треков желательно, чтобы они различались не менее, чем на 5–6 полосок. С учетом этого, сегментация катодной части приблизительно соответствует сегментации анодной части по вероятности разделения двухтрековых событий.

- **Малое количество вещества.** Поскольку Z-камера расположена внутри цилиндрического калориметра, необходимо, чтобы она содержала как можно меньше вещества. Характерный масштаб задается толщиной сверхпроводящего магнита, составляющего основную массу вещества перед калориметром ( $\sim 0.4$  рад. длины). Во избежание заметного ухудшения энергетического разрешения калориметра, Z-камера должна вносить вклад не более  $\sim 10\%$  от общего количества вещества, т.е. ее толщина не должна превышать 0.04 рад. длины.

Конструкция Z-камеры, соответствующая вышеизложенным требованиям, описана в следующем разделе.

## 2.1 Конструкция камеры и ее основные параметры

Z-камера детектора состоит из цилиндрических катодов, посадочных колец, анодных проволочек и монтажных колец. Катодные цилиндры имеют длину 800 мм, толщину 1 мм и диаметры 611.8, 629.5, и 647.7 мм. Каждый цилиндр склеен из четырех листов фольгированного медью стеклотекстолита (СТЭФ) толщиной 0.5 мм. Полное количество вещества соответствует 3% радиационной длины. Технология изготовления цилиндрических катодов подробно описана в разделе 2.2.

Три цилиндра образуют два слоя Z-камеры (Рис. 2). Средний (центральный) цилиндр является общим для обоих слоев и имеет две сплошные фольгированные поверхности. У внешнего и внутреннего цилиндров фольгированные поверхности, обращенные к центральному катоду, разделены на кольцевые полоски шириной 6 мм и зазором между полосками — 0.5 мм. Каждое кольцо, в свою очередь, разделено на угловые сегменты по следующей схеме: 16 ближайших к центру колец - на 4 равные части, по 10 колец с каждого края камеры оставлены сплошными, все остальные кольца разделены пополам (Рис. 3). Полукольца получаются как результат технологии изготовления, по которой катодная поверхность образуется из двух отдельных листов.

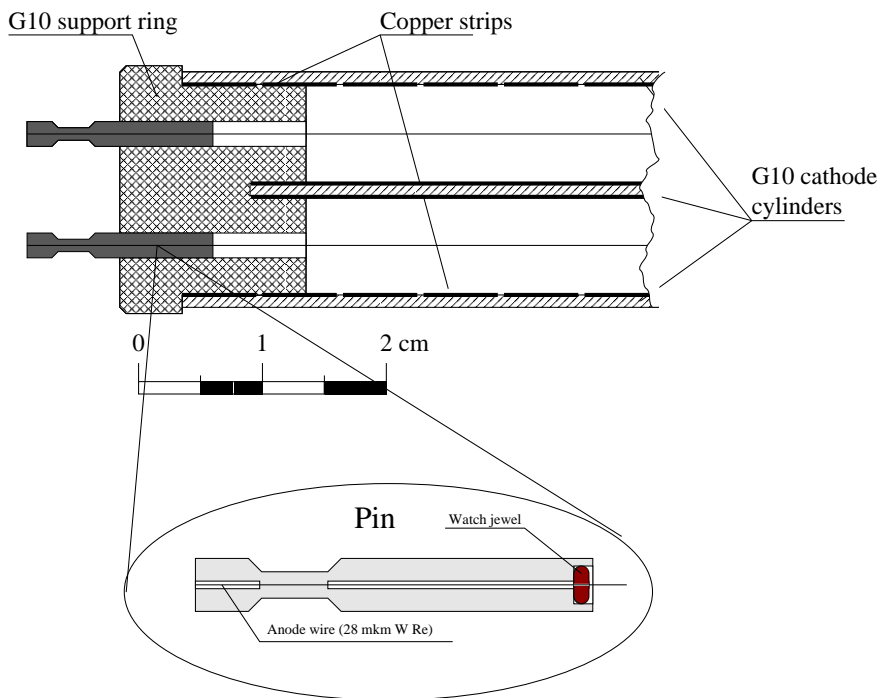


Рис. 2: Сечение Z-камеры. На врезке показан пин с часовым камнем и зажатой проволочкой.

Всего в каждом слое камеры 256 катодных полосок с независимым съемом сигналов.

Все три цилиндра закрепляются в торцах в специальных посадочных кольцах, изготовленных из мелкозернистого СТЭФа. В каждом посадочном кольце имеются два слоя по 704 отверстия диаметром 1.6 мм. Отверстия расположены на окружностях диаметром 620.7 и 638.7 мм. Точность изготовления отверстий на станке с ЧПУ  $\pm 20$  мкм. В отверстия вставлены пины, в которых зажаты анодные проволоочки диаметром 28 мкм, изготовленные из золоченого вольфрам-рениевого сплава. В каждом слое камеры имеются 704 чувствительные проволоочки, образующие цилиндрические анодные поверхности внутреннего и внешнего слоя. Для обеспечения возможности сборки и разборки камеры одно из посадочных колец сделано разборным и состоит из трех отдельных элементов.



1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
⋮	...			
50				
51				
52				
53				
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				

Рис. 3: Развертка одного из катодных цилиндров. Показана половина цилиндра, соответствующая положительным значениям  $Z$  координаты. Нумерация катодных колец начинается от начала координат (места встречи пучков). Кольца с 1 по 8 разбиты на 4 сегмента, с 9 по 51 — на 2 сегмента, с 52 по 61 — цельные. Направление оси  $Z$  - сверху вниз.

В посадочных кольцах предусмотрены отверстия для продувки камеры газовой смесью. С каждого торца камеры имеются по 3 отверстия, расположенных в вершинах равностороннего треугольника, вписанного в окружность, соответствующую центральному катоду. Отверстия на одном торце сдвинуты относительно отверстий другого торца на  $60^\circ$  по азимутальному углу. В отверстия вставлены капролоновые оливки, к которым подсоединяются трубочки. Газовая смесь вдувается с одного торца камеры и выдувается с противоположного. Для обеспечения герметичности места соединений катодных цилиндров с посадочными кольцами,

а также пины залиты кремнийорганическим лаком. Кроме того, торцы камеры залиты герметиком, что не только повышает герметичность камеры, но и защищает от высоковольтных пробоев при повышенной влажности воздуха.

К посадочным кольцам крепятся монтажные кольца, по одному с каждого торца. Монтажные кольца изготовлены из СТЭФа и служат для распайки сигнальных кабелей, крепления разделительных высоковольтных емкостей, а также для разводки высокого напряжения. С одного торца на анодные проволоочки подается высокое напряжение ( $\sim 3.2$  кВ), с другого — осуществляется съем анодных сигналов через разделительные емкости.

Для уменьшения необходимой электроники анодные проволоочки объединены в сектора по 22 проволоочки, всего 32 сектора в каждом слое. Сигнал снимается целиком со всего сектора. Количество секторов выбрано таким, чтобы обеспечить приемлемую эффективность разделения двух и более треков и соответствует количеству секторов во втором и третьем суперслоях ДК. Сектора внешнего слоя сдвинуты в  $R - \phi$  плоскости относительно внутреннего слоя на  $1/2$  сектора.

Пины для крепления анодных проволоочек делались из отожженной медной трубки, внутрь которой вставлялись часовые камни с отверстием диаметром 90 мкм (Рис. 2). Во избежание окисления, пины гальваническим методом покрывались тонким слоем олова.

Анодные проволоочки натягивались по следующей технологии: Z-камера устанавливалась вертикально на ножках, закрепленных в одном из торцов. В верхний торец вставлялся пин, через него на необходимую длину пропускалась проволоочка, и пин обжимался специальными щипцами, отрегулированными таким образом, что минимальный зазор щипцов приводил к плотному обжатию проволоочки, но не допускал ее перекусывания. Далее проволоочка пропускалась через отверстие в нижнем торце и второй пин, который затем фиксировался в отверстии. К выступающему из нижнего пина концу проволоочки крепился груз массой 80 грамм, и натянутая таким образом проволоочка зажималась в пине.

Сила натяжения проволоочек  $\sim 0.8$  Н была выбрана примерно посередине между минимальным натяжением (0.35 Н), необходимым для устойчивости проволоочек в электрическом поле (см. 2.3) и пределом упругих деформаций (1.2 Н). Такое усилие растягивает проволоочку примерно на 1.5 мм, что обеспечивает ее устойчивость независимо от изменения температуры, прогиба посадочных колец, сжатия катодных цилиндров и т.д.

Катодные сигналы снимаются с помощью 512 коаксиальных кабелей РК75-1, укрепленных на монтажных кольцах по 256 с каждого торца и распаянных на печатный монтаж на поверхностях катодных цилиндров.

Размеры различных частей камеры и ее радиационные толщины сведены в Табл. 1.

Таблица 1: Основные параметры Z-камеры.

Длина камеры	800 мм	
Толщина катодных цилиндров	1.0 мм	
Толщина медного покрытия	35 мкм	
Диаметр проволочек	28 мкм	
Ширина катодных полосок	6.0 мм	
Шаг катодных полосок	6.5 мм	
	Внутр. слой	Внешний слой
Диаметры катодных поверхностей	612.8 мм	630.5 мм
	628.5 мм	646.7 мм
Диаметры анодных поверхностей	620.7 мм	638.7 мм
Шаг анодных проволочек	2.77 мм	2.85 мм
	Радиационные толщины	
	г/см <sup>2</sup>	X <sub>0</sub>
Катодный цилиндр	0.23	0.01
Проволочки одного слоя	4.2 · 10 <sup>-4</sup>	6.3 · 10 <sup>-5</sup>
Вся камера	0.69	0.03

## 2.2 Технология изготовления цилиндрических катодов

Все катоды склеивались из четырех листов СТЭФа, расположенных в два слоя из двух листов каждый. Стыки между листами в разных слоях сдвинуты друг относительно друга на 90° по азимутальному углу, для обеспечения более правильной цилиндрической формы катода (Рис. 4).

Центральный катод состоит из четырех одинаковых листов, фольгированных только с одной стороны. Клей наносился на нефольгированные стороны листов. В результате, после склейки получился цилиндр с фольгированными внутренней и внешней поверхностями.

У остальных катодов листы одного слоя были полностью фольгированы, и фольги разделены на полоски одинаковым образом с обеих сторон. Каждая полоска на одной стороне электрически соединена с соответствующей полоской на другой стороне в двух местах с помощью никелевых трубчатых заклепок диаметром 1.2 мм, наполненных серебряной краской.

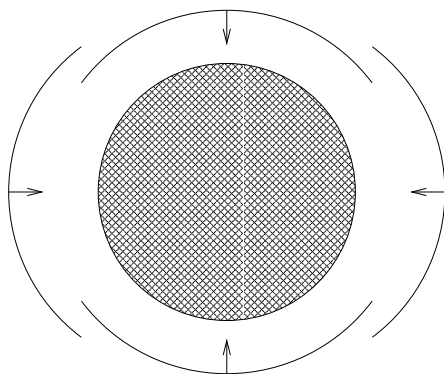


Рис. 4: Сборка цилиндрического катода из четырех листов СТЭФа. Листы, показанные на рисунке сверху и снизу, закрепляются на оправке, образуя цилиндр, поверх которого прижимаются оставшиеся два листа с нанесенным на них слоем эпоксидного клея.

Листы с полосками образуют рабочую поверхность катода, обращенную внутрь камеры. Два других листа каждого цилиндра с одной стороны имеют печатный монтаж для съема сигналов с катодных колец и вывода их в торцы камеры, а другой (нефольгированой) стороной клеятся на цилиндр с катодными кольцами. В печатном монтаже имеются соответствующим образом расположенные отверстия, через которые печатный монтаж припаивается к катодным полоскам (Рис. 5).

Для разделения катодной поверхности на полоски обе стороны листа покрывались краской и запекались. После этого в нужных местах краска снималась тонкими параллельными полосками с шагом 6.5 мм с помощью резца на специально изготовленном столе, обеспечивающем высокую точность и параллельность проводимых линий. Затем листы травились в хлорном железе.

Склейка производилась эпоксидным клеем на алюминиевых цилиндрических оправках соответствующих размеров. Диаметры оправок были выдержаны с точностью  $\pm 100$  мкм. Вначале на оправке выгибался и закреплялся первый цилиндрический слой, затем на листы второго слоя наносилась эпоксидная композиция (тонким слоем  $\sim 30$  мкм), и второй слой закреплялся на оправке поверх первого.

Изготовленный таким образом цилиндр обматывался резиновым жгутом, и сверху на него одевался герметичный резиновый мешок. Воздух

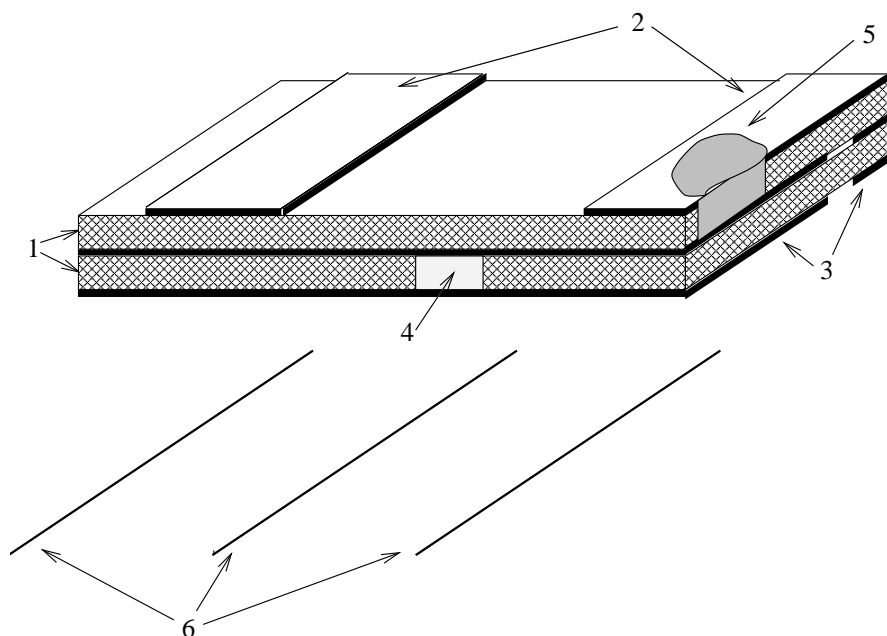


Рис. 5: Устройство катодных цилиндров. 1-листы стеклотекстолита, 2-печатный монтаж для съема сигналов, 3-катодные полоски, 4-никелевая заклепка с серебряной краской, 5-пайка.

из-под мешка откачивался форвакуумным насосом, а резиновый жгут обеспечивал равномерную откачку под всей поверхностью мешка. После откачки воздуха атмосферное давление прижимало цилиндр к оправке и обеспечивало необходимое усилие для однородного и прочного склеивания. После склеивания оправка охлаждалась до температуры ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , и, за счет разности коэффициентов теплового расширения алюминия и СТЭФа, цилиндр легко снимался с оправки ( $\delta T \sim 40^{\circ}\text{C}$  дает разность диаметров цилиндра и оправки  $\delta D \sim 0.3\text{ мм}$ ).

Точность изготовления цилиндров по нашим измерениям оказалась не хуже  $\pm 200\text{ мкм}$ . Такая неточность в величине зазора анод – катод приводит к эффективному разбросу рабочего напряжения в разных участках камеры в пределах 250–300 В, что заметно меньше ширины плато (около 600 В, как показали измерения на макете) для выбранной рабочей газовой смеси.

## 2.3 Проверка натяжения проволочек

При изготовлении многопроволочных камер одной из очень важных задач является обеспечение постоянства натяжения проволочек. При ослаблении натяжения ниже порога устойчивости проволочка выгибается под действием электрического поля, что приводит к невозможности поднять высокое напряжение до рабочей величины либо к замыканию проволочки на катод и полной неработоспособности камеры. Критическое натяжение определяется по формуле [5]:

$$T \geq T_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{lCV_0}{s} \right)^2,$$

где  $C$  — емкость на единицу длины проволочки,  $l$  — длина проволочки,  $s$  — расстояние между проволочками. В приближении  $s \leq d$ :

$$T_c \approx \left[ \frac{V}{590 \left( \frac{d}{l} + \frac{s}{\pi l} \ln \left( \frac{s}{\pi a} \right) \right)} \right]^2,$$

где  $d$  — зазор анод–катод,  $a$  — диаметр проволочки,  $V$  — потенциал проволочки относительно катода в кВ,  $T_c$  — критическое натяжение в ньютонах. Для параметров Z-камеры  $d = 4$  мм,  $s = 3$  мм,  $a = 28$  мкм,  $l = 800$  мм,  $V = 3.2$  кВ:

$$T_c \approx 0.35 \text{ Н.}$$

При описанной конструкции камеры одна прогибающаяся или отсутствующая проволочка нарушает цилиндрическую симметрию и делает невозможной нормальную работу всего слоя, так как вызывает неустойчивость и прогиб соседних проволочек.

Для контроля натяжения проволочек был применен резонансный метод. Принцип измерения показан на Рис. 6. Проволочка механическим образом (с помощью звукового генератора и динамика, расположенного на корпусе камеры) раскачивается в магнитном поле, и по зависимости амплитуды э.д.с. индукции от частоты генератора определяется резонансная частота. Резонансная частота связана с натяжением проволочки простым соотношением:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}},$$

где  $f$  - резонансная частота колебаний в герцах,  $l$  - длина проволочки,  $\mu$  - ее линейная плотность,  $T$  - сила натяжения. В нашем случае  $f \approx 160$  Гц.

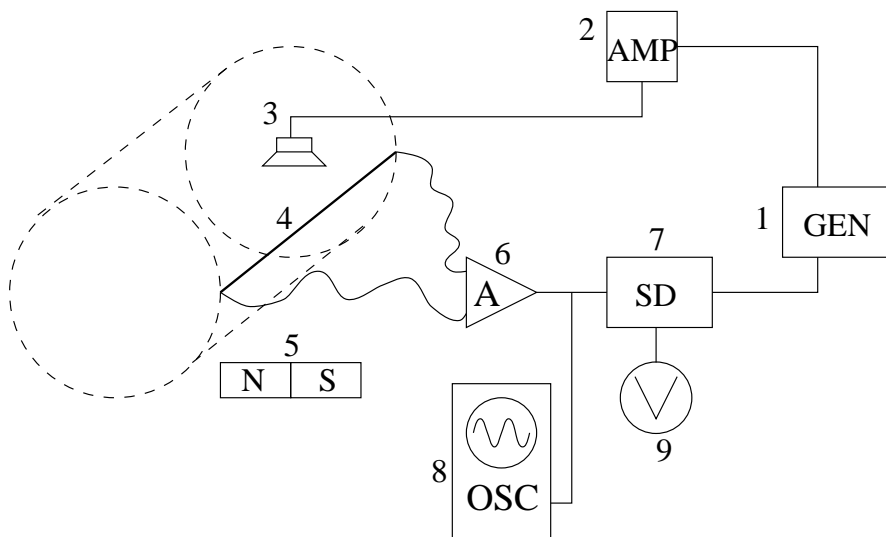


Рис. 6: Схема метода проверки натяжения проволочек в Z-камере. 1-генератор звуковой частоты, 2-усилитель, 3-динамик, 4-анодная проволочка, 5-постоянный магнит, 6-дифференциальный усилитель, 7-синхронный детектор, 8-осциллограф, 9-вольтметр.

## 2.4 Рабочая газовая смесь

Традиционной для пропорциональных камер является газовая смесь аргона и углекислого газа в различных пропорциях. Будучи достаточно дешевой и удобной в эксплуатации, эта смесь обладает рядом недостатков, наиболее существенные из которых это:

1. Недостаточно высокая скорость дрейфа. Хотя аргон относится к так называемым “быстрым” газам, скорость дрейфа электронов в нем, как правило, не превышает  $5\text{--}6 \text{ см/мкс}$ . При шаге анодных проволочек  $3 \text{ мм}$  время дрейфа должно быть порядка  $30 \text{ нс}$ , в действительности же оно может быть заметно больше, так как между проволочками существуют области с очень маленькой напряженностью электрического поля, в которых скорость дрейфа значительно меньше  $5 \text{ см/мкс}$ . Таким образом, смесь на основе аргона является недостаточно быстрой для получения временного разброса анодных сигналов  $< 60 \text{ нс}$ .

2. Ультрафиолетовое излучение. При столкновении дрейфующих электронов с атомами аргона, последние переходят в возбужденное состояние, после чего излучают фотоны в ультрафиолетовом спектре. Фотоэмиссия новых электронов с металлических электродов камеры приводит к неконтролируемому расширению лавины. Это преодолевается введением в газовую смесь органических добавок, поглощающих фотоны. Добавки улучшают локализацию лавины, хотя и не избавляют полностью от этой проблемы. Более того, ультрафиолетовое излучение разваливает молекулы органических добавок на радикалы, оседающие на проволочках и приводящие к старению камеры.

Перечисленные недостатки аргоновых смесей стимулировали поиск новых, более подходящих для нашего случая газов. Идеальным был бы газ, сочетающий достоинства аргоновых смесей с более высокой скоростью дрейфа и отсутствием ультрафиолетового излучения. Таким газом оказался фреон-14 ( $CF_4$ ). Фреон-14 практически не взаимодействует с обычными конструкционными материалами, негорюч и удобен в эксплуатации. Скорость дрейфа электронов в  $CF_4$  достигает  $12 - 15 \text{ см/мкс}$  т.е. в 2 – 2.5 раза больше, чем в аргоне. В отличие от других фреонов, электроотрицательность фреона-14 очень слабая и не приводит к заметному поглощению электронов на длине дрейфового пути порядка 1.5 мм.

Основным недостатком  $CF_4$  следует считать его плохие гасящие свойства. Чистый фреон-14, как и чистый аргон, практически непригоден в качестве рабочего газа. Для улучшения гасящих свойств необходимо добавлять в смесь органические газы. Были опробованы смеси  $CF_4 + \text{н-пентан}$  и  $CF_4 + \text{изобутан}$ . Обе смеси продемонстрировали работоспособность, но окончательный выбор был сделан в пользу изобутана в связи с тем, что н-пентан при нормальных условиях является жидкостью и его труднее смешивать с фреоном в контролируемых пропорциях.

Схематическое устройство газовой системы Z-камеры показано на Рис. 7. Камера продувается смесью  $CF_4 - iC_4H_{10}$  в соотношении 80:20. Скорость продувки составляет примерно один объем камеры ( $0.025 \text{ м}^3$ ) в сутки.

## 2.5 Электроника

Электроника Z-камеры состоит из двух независимых трактов - анодного и катодного. Блок-схемы обоих трактов показаны на Рис. 8.



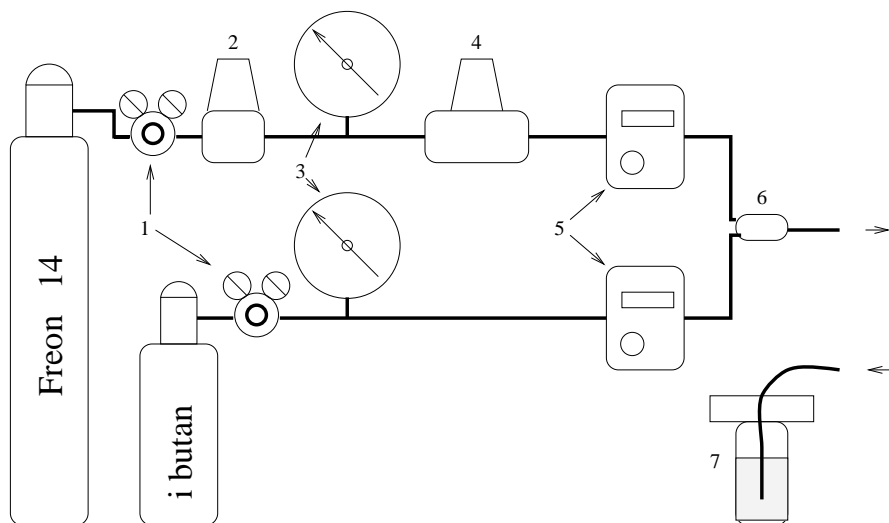


Рис. 7: Схема продувки Z-камеры. 1 – редукторы, 2 — стабилизатор давления газа, 3 — манометры, 4 — стабилизатор расхода газа, 5 — блоки регулировки и контроля продувки, 6 — смеситель на входе в камеру, 7 — масляный затвор на выходе из камеры.

Сигнал с анодного сектора через разделительную высоковольтную емкость попадает на вход предусилителя. Усиленный парафазный сигнал по витой паре передается в плату Т2А, где оцифровывается его амплитуда и время, прошедшее между приходом сигнала и “общим стопом”. Наличие сигнала на входе Т2А определяется по срабатыванию дискриминатора. Порог дискриминаторов задается от ЭВМ с помощью ЦАПа. Кроме того, возможна индивидуальная регулировка каждого дискриминатора с помощью подстроечных сопротивлений на платах.

Сигнал с катодной полоски усиливается с помощью зарядочувствительного усилителя, после чего также по витой паре попадает на вход платы А32, где происходит оцифровка амплитуды. Вся оцифровывающая электроника выполнена в стандарте “КЛЮКВА” [6]. Основные параметры предусилителей приведены ниже.

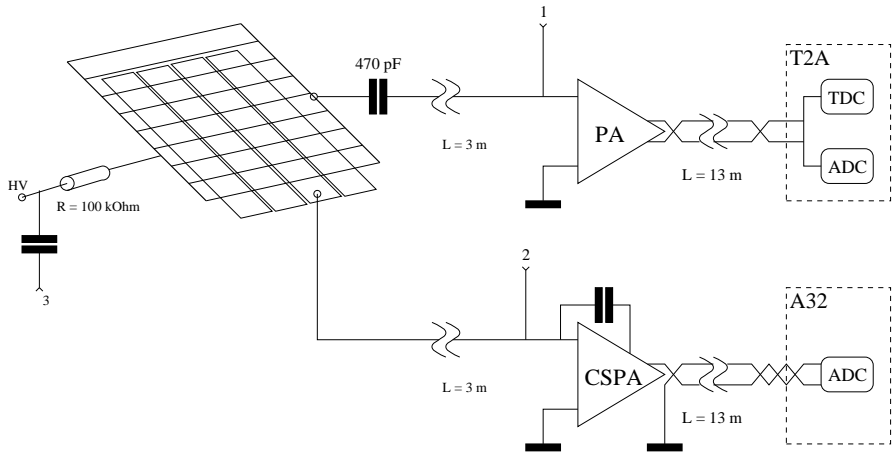


Рис. 8: Электронный тракт Z-камеры. 1 — вход калибровки электронного тракта анодных каналов, 2 — вход калибровки электронного тракта катодных каналов, 3 — вход калибровки камеры через разводку высоковольтного напряжения.

- Анодные ПУ:

Коэффициент усиления	40
Время нарастания фронта (нс)	10
Напряжение питания (В)	+12,-12
Потребляемая мощность (Вт)	0.15

- Катодные ЗЧУ:

Динамическая входная емкость (нФ)	3
Эквивалентный шум ( $e$ )	$400 + 5 \frac{1}{\pi f}$
Время формирования сигнала (мкс)	4.5
Напряжение питания (В)	+12, -12
Потребляемая мощность (Вт)	0.2

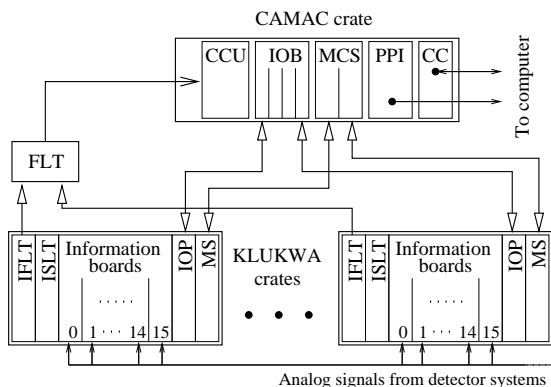


Рис. 9: Оцифровывающая электроника стандарта “КЛЮКВА”. Обозначения на рисунке: CCU — центральная система управления (ЦСУ), IOB — блоки обмена (БО), MCS — размножитель сигналов КАМАК (РСК), PPI — последовательно-параллельный интерфейс ППИ-К, CC — КАМАК-контроллер K0607A, FLT — первичный триггер (ПТ), IFLT — интерфейс первичного триггера (ИПТ), ISLT — интерфейс вторичного триггера (ИВТ), IOP — процессор вывода (ПВ), MS — размножитель служебных сигналов (РСС).

## 2.6 Оцифровывающая электроника

Оцифровывающая электроника детектора КМД-2 выполнена в стандарте КЛЮКВА [6], разработанном в Институте ядерной физики СО РАН. Данный стандарт позволяет создавать автоматизированную систему оцифровки аналоговых сигналов и подготовки данных для считывания в компьютер с учетом синхронизации работы запускающей, оцифровывающей и считывающей электроники.

Общая схема организации оцифровывающей аппаратуры изображена на Рис. 9. Регистрирующая аппаратура размещается в специальных крейтах с циклом магистрали 100 нс. В крейте размещены до 16 информационных плат (производящих собственно оцифровку данных) и 4 служебных платы. Служебными платами являются:

- процессор вывода (ПВ), производящий чтение, обработку и запоминание информации, зафиксированной в информационных платах;
- размножитель служебных сигналов (РСС), осуществляющий обмен

управляющими сигналами с центральной системой управления;

- интерфейс первичного триггера (ИПТ), поставляющий информацию для первичного триггера;
- интерфейс вторичного триггера (ИВТ), не использующийся на КМД-2.

ПВ и РСС являются обязательными для работы крейта, ИПТ и ИВТ не являются обязательными. Для хранения считанной информации в ПВ имеется два ОЗУ данных емкостью по 1К 14-разрядных слов. Использование ОЗУ данных позволяет осуществлять разравнивание потока данных перед считыванием в ЭВМ.

Основные параметры используемой оцифровывающей электроники приведены ниже. Более подробно платы Т2А и А32 описаны в [7].

- Плата Т2А:

Число входов	4
Входное сопротивление (Ом)	130
Максимальная амплитуда входного сигнала (В)	$\pm 0.5$
Порог срабатывания (мВ)	0.1
Дискрет измерения времени (нс)	2
Цена амплитудного канала (Кл/канал)	$9 \cdot 10^{-13}$
Время интегрирования сигнала (нс)	300
Интегральная нелинейность, не более (%)	0.3
Дифференциальная нелинейность, не более (%)	5

- Плата А32:

Число входов	32
Входное сопротивление (Ом)	130
Максимальная амплитуда входного сигнала (В)	2
Цена амплитудного канала (Кл/канал)	$9 \cdot 10^{-13}$
Время оцифровки (мкс)	100
Интегральная нелинейность, не более (канал)	3
Дифференциальная нелинейность, не более (%)	40
Температурный дрейф, не более (канал/градус)	0.3

## 2.7 Калибровки

Для проверки электронного тракта и выявления неполадок самой Z-камеры была предусмотрена система калибровок. Имеются 3 независимые калибровки (Рис. 8):

1. **Проверка электронного тракта анодных каналов.** Сигнал от генератора подается непосредственно на входы анодных предусилителей.
2. **Проверка электронного тракта катодных каналов.** Сигнал от генератора подается непосредственно на входы катодных зарядочувствительных усилителей.
3. **Проверка прохождения анодных и катодных сигналов от камеры до усилителей.** Сигнал от генератора подается на высоковольтные входы внутреннего и внешнего слоя камеры независимо. Сигнал отрицательной полярности позволяет проверить работоспособность анодных каналов, положительной полярности — катодных. Во втором случае прохождение сигнала обеспечивается взаимной емкостью анодных секторов и катодных полосок, составляющей порядка 1000 пФ на одно полное катодное кольцо.

Наличие взаимной емкости между анодом и катодом позволяет диагностировать неисправности (обрывы и закоротки) в кабелях, идущих от камеры к предусилителям. Емкость значительно выше нормальной соответствует замыканию центральной жилы кабеля на землю, емкость значительно меньше нормальной означает обрыв кабеля. Зная погонные емкость и сопротивление кабеля ( $69 \text{ пФ/м}$  и  $\sim 2 \text{ Ом/м}$ ), можно достаточно точно локализовать место обрыва или замыкания. Это может быть использовано в том случае, когда неисправность кабеля оказалась снаружи детектора и ее можно устранить без разборки КМД-2.

## 3 Характеристики Z-камеры

### 3.1 Временное разрешение

Временное разрешение Z-камеры зависит от многих факторов: средней скорости дрейфа электронов, расстояния между анодными проволочками, средней амплитуды сигнала (коэффициента газового усиления), величины порога дискриминатора оцифровывающей электроники (опреде-

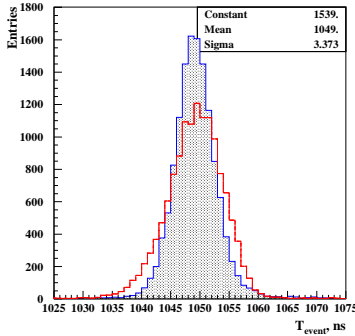
ляемой уровнем шумов и наводок), полосы частот предусилителей, расщепления фронта сигнала в кабельных трассах.

Все перечисленные факторы естественным образом разделяются на две группы: первая связана непосредственно с процессами в камере, вторая — с электронным трактом. Как будет видно далее, обе дают примерно одинаковый вклад в разрешение. Уменьшить влияние факторов, связанных с камерой можно подбором быстрой газовой смеси и уменьшением расстояния между проволочками. С этой целью была выбрана смесь на основе фреона-14, как одного из наиболее быстрых известных газов, и расстояние между проволочками было сделано около 3 мм, т.е. практически минимально возможным для такой конструкции камеры.

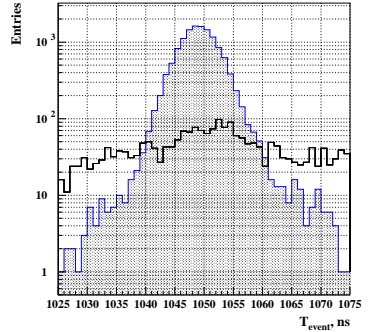
Средняя скорость дрейфа электронов  $V_{dr}$  в рабочей газовой смеси 80 %  $CF_4$  + 20 %  $iC_4H_{10}$  равна примерно 8 см/мкс. При расстоянии между проволочками  $d = 3$  мм временное разрешение для одного срабатывания должно быть порядка  $\sigma_1 = \frac{d}{2\sqrt{12}V_{dr}} \approx 5.5$  нс. Так как камера состоит из двух слоев, то обычно в событии происходит несколько независимых срабатываний (как правило, по 2 на каждый трек). Временное разрешение для события может определяться по среднему времени всех сработавших секторов и, соответственно, должно быть значительно лучше, примерно  $\sigma_{ev} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{2N_{tr}}}$ , где  $N_{tr}$  — количество треков в событии. В дальнейшем под временем события мы будем понимать именно такое среднее по всем ассоциированным с треками срабатываниям.

Поскольку все пучковые события привязаны по времени к моменту столкновения пучков, а космические частицы пролетают через детектор в случайный момент времени, то временное разрешение Z-камеры может быть использовано для отделения пучковых событий от космического фона. С точки зрения трековой системы пролет через детектор космической частицы выглядит как двухтрековое коллинеарное событие. Согласно приведенной оценке, временное разрешение для такого события должно быть на уровне  $\sim 3$  нс. При времени оборота пучков в ВЭПП-2М около 60 нс это должно позволить подавить фон космических частиц примерно в 3 раза на уровне  $\pm 3$  стандартных отклонений.

На Рис. 10(а) показано временное разрешение Z-камеры для пучковых коллинеарных событий, регистрируемых в эксперименте. Временное разрешение имеет среднеквадратичную ширину порядка 4.7 нс, т.е. примерно в 1.5 раза хуже, чем следует из оценки времени дрейфа. Это ухудшение связано с электронным трактом и происходит, в основном, из-за зависимости времени срабатывания дискриминатора в канале платы Т2А от амплитуды сигнала с анодных проволочек и разброса временных



(а) Среднее время для двухтрековых пучковых событий. Пустая гистограмма — без поправок, заштрихованная гистограмма — с поправками. Параметры приведены для заштрихованной гистограммы.



(б) Заштрихованная гистограмма — распределение по времени для пучковых событий, пустая гистограмма — для космических частиц.

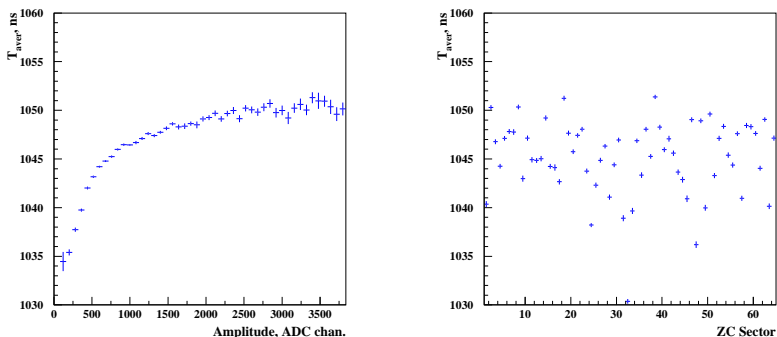
Рис. 10:

задержек в кабелях и электронных блоках.

Средняя амплитуда анодных сигналов в каналах T2A находится примерно в диапазоне 750 – 1000, а пороги дискриминаторов в тех же единицах — в районе 100 – 150, что определяется, в основном, фоновыми условиями ВЭПП-2М. Из гистограммы на Рис. 11(а) видно, что для малых амплитуд время срабатывания имеет систематическую задержку, достигающую до 15–20 нс.

Еще один фактор, ухудшающий временное разрешение, — это разная временная задержка в разных анодных каналах. На Рис. 11(б) показано среднее время срабатывания для всех 64 секторов Z-камеры. Разница средних времен отдельных секторов достигает  $\sim 15$  нс.

Влияние электронного тракта на время срабатывания Z-камеры может быть учтено с помощью соответствующих поправок. Для этого по пучковым событиям набираются гистограммы время-амплитудной зависимости для каждого канала, подгоняются гладкими функциями и используются для поправки времен.



(а) Зависимость среднего времени прихода сигнала от его амплитуды.

(б) Среднее время прихода сигнала в зависимости от номера сектора  $Z$ -камеры.

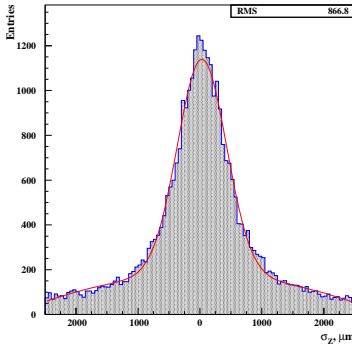
Рис. 11: Влияние амплитуды сигнала и задержек в электронном тракте на среднее время прихода сигнала с анодных секторов  $Z$ -камеры.

Кроме того, ко времени срабатывания каждого канала добавляется своя константа так, чтобы среднее время срабатывания во всех каналах было одним и тем же. Внесение поправок улучшает временное разрешение для двухтрековых событий до  $\pm 3.5$  нс, что уже достаточно близко к ожидаемым 3 нс. Временное разрешение для коллинеарных пучковых событий показано на Рис. 10(а) заштрихованной гистограммой. Приблизительно 99 % событий лежит внутри интервала  $\pm 10$  нс. На Рис. 10(б) приведены два распределения по времени, соответствующие пучковым событиям (заштрихованная гистограмма) и космическим частицам (пустая гистограмма). Космические события распределены по времени неравномерно, что связано с падением эффективности реконструкции треков в ДК для событий, заметно отстоящих по времени от момента столкновения пучков. Тем не менее, приблизительно половина космического фона может быть отброшена при отборе событий внутри интервала  $\pm 10$  нс от среднего времени пучковых событий.

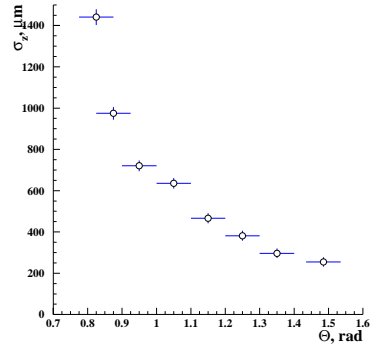


### 3.2 Пространственное разрешение

Пространственное разрешение  $Z$ -камеры сильно зависит от полярного угла трека, что вообще является характерной особенностью полосковых камер. Два слоя  $Z$ -камеры позволяют определить ее пространственное разрешение по коллинеарным событиям, используя Дрейфовую Камеру только для отбора событий с двумя коллинеарными треками. Соответствующие четыре измерения  $Z$  координаты должны находиться на одной прямой в плоскости  $l-z$ , где  $l$  — длина трека с учетом его кривизны в магнитном поле. Отклонения измеренных координат от оптимальной прямой позволяют определить разрешение камеры. Наилучшее разрешение соответствует трекам, лежащим в плоскости, перпендикулярной оси пучков, и составляет приблизительно 200 мкм (Рис. 12(б)). Среднее разрешение по коллинеарным событиям — порядка  $700 \div 900$  мкм (Рис. 12(а)).



(а) Пространственное разрешение  $Z$ -камеры.



(б) Зависимость пространственного разрешения от полярного угла трека.

Рис. 12: Пространственное разрешение  $Z$ -камеры и его зависимость от полярного угла трека.

### 3.3 Систематические сдвиги

Для точного определения телесного угла детектора важно не только хорошее координатное разрешение Z-камеры. Измеряемая Z-координата не должна иметь систематических сдвигов, которые приводили бы к существенному изменению определяемого телесного угла. Измерения адронных сечений на КМД-2 ориентируются на предельную точность порядка 0.5%. Поскольку сечения нормируются на сечение  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ , имеющее очень сильную зависимость от полярного угла, точность измерения полярного угла треков (и телесного угла детектора) должна быть такой, чтобы точность определения сечения Баба-рассеяния была не хуже 0.5%.

Для телесного угла детектора от 1 до  $\pi-1$  радиана эта точность соответствует измерению полярного угла с точностью не хуже  $1 \cdot 10^{-3}$  радиана. Это означает, что при длине трека порядка 50 см систематические сдвиги не должны превышать  $500 \cdot 10^{-3} / \sin(1) \sim 600$  мкм. Отметим, что на определение телесного угла влияют только такие систематические сдвиги, которые не зависят от конкретного события и их эффекты не компенсируются при усреднении по большому числу событий. С этой точки зрения рассмотрим возможные источники систематических сдвигов в измерении Z-координаты:

- **Сдвиг, связанный с положением центра лавины относительно границ полосок.** Как правило, это основной источник систематического сдвига в полосковых камерах при измерении координаты по центру тяжести наведенного заряда (см. также раздел 5.1). Его величина зависит от количества используемых в измерении полосок и асимметрии наведенных на них зарядов и в нашем случае может достигать 1.5 мм. Знание теоретической формы наведенного на катоды заряда [8] позволяет рассчитать этот сдвиг и поправить измеренную координату. Однако, даже если эта поправка не вносится или несколько отличается от реального сдвига (например, для наклонных треков лавина уже не может рассматриваться как точечный заряд), эффекты сдвига компенсируются при статистическом усреднении по нескольким причинам:

1. Сдвиги для четного и нечетного числа используемых полосок различаются по знаку.
2. Два слоя Z-камеры дают два независимых измерения координаты, при этом количество полосок в кластере на каждом слое

не зависит друг от друга. Более того, в силу симметрии камеры, сдвиги на разных слоях, связанные с процессами образования лавины в камере, должны иметь противоположные знаки и в первом приближении компенсироваться.

3. Точка входа трека в Z-камеру для фиксированного полярного угла зависит от точки взаимодействия пучков и имеет среднеквадратичный разброс  $\sim 2$  см, что значительно больше шага катодных полосок.

- **Снос лавины в магнитном поле.** Вблизи краев камеры магнитное поле КМД-2 имеет заметную радиальную составляющую, что приводит к дрейфу лавины в скрещенных полях вдоль проволочки. Легко видеть, что этот эффект компенсируется при усреднении по углу вокруг проволочки.
- **Неопределенность положения лавины для наклонных треков.** Из-за флуктуаций коэффициента газового усиления для разных кластеров и стохастической природы образования первичных электронных кластеров вдоль заряженного трека измеренная координата лавины отличается от точки пересечения трека с анодной плоскостью. Этим эффектом обусловлено значительное ухудшение разрешения с уменьшением угла между треком и осью пучков. Стохастический характер флуктуаций и симметрия относительно анодной плоскости приводит к статистической компенсации и этого сдвига.

Таким образом, некомпенсируемые систематические сдвиги могут быть связаны только с неопределенностью геометрического положения полосок. Точность изготовления полосок (т.е. положение полоски относительно торца катодного цилиндра) была проверена с помощью специального измерительного устройства и оказалась порядка 50 мкм, что соответствует относительной точности определения телесного угла порядка  $10^{-4}$ .

## 4 Z-камера в триггере КМД-2

### 4.1 Заряженный триггер

Первичный триггер начинает работать по приходу анодных сигналов с Z-камеры. Они задерживаются на 450 нс (максимальное время дрейфа в первых двух слоях ДК), после чего запускается специальный трековый процессор (ТП) [9]. Если ТП находит хотя бы один трек, то он выдает

сигнал “общий стоп”. ТП обрабатывает сигналы с 64 секторов ЗК и 48 ячеек первых двух слоев ДК. С целью увеличения телесного угла третий слой ДК не участвует в триггере. Принцип работы ТП проиллюстрирован на Рис. 13.

ТП работает в последовательно-параллельном режиме. R-φ сечение координатной системы разбито по углу на 16 одинаковых областей. За один такт ТП обрабатывает две противоположные области, завершая работу за 8 тактов. Каждая область состоит из 4 секторов ЗК и 22 ячеек ДК. Для большей гибкости триггера каждая ячейка разделена на две полуячейки. Все проволочки в полуячейке объединены на “или” для обеспечения высокой эффективности срабатывания. С этой же целью соседние области сделаны перекрывающимися, и ячейки ДК одновременно входят в несколько областей.

Каждая область разделена на 12 лунок. Каждая лунка состоит из 12 полуячеек и представлена в ТП одним  $4К \times 1$  бит кристаллом памяти. Любая комбинация сработавших в лунке полуячеек образует 12-разрядный адрес для соответствующего кристалла памяти. При загрузке ТП ячейки памяти, соответствующие разрешенным комбинациям сработавших полуячеек, прописываются “1”, остальные - “0”. Если ТП нашел хотя бы одну разрешенную комбинацию полуячеек, то выдается сигнал “Трек найден”.

После обработки всех 16 областей, при наличии хотя бы одного найденного трека, ТП подает на оцифровывающую электронику сигнал “общий стоп”. Если “общий стоп” не появился в течении 1 мкс, оцифрованная информация автоматически сбрасывается и входы цифровой электроники разблокируются. Полное время работы ТП составляет 8 циклов по 40 нс, т.е. 320 нс.

## 4.2 Интерфейс первичного триггера Z-камеры

Интерфейс первичного триггера Z-камеры (ИПТЗ) выполнен в стандарте “КЛЮКВА” [6] и физически расположен в одном спецкрейте с оцифровывающей электроникой (платами Т2А) анодной части Z-камеры. Сигналы дискриминаторов Т2А представляют собой информацию о срабатывании секторов Z-камеры и являются входными сигналами для ИПТЗ. Порог дискриминаторов соответствует примерно  $8 \cdot 10^{-14}$  Кл.

Временной разброс моментов срабатывания дискриминаторов меньше периода обращения пучков в накопителе, что позволяет привязать работу первичного триггера к моменту конкретного столкновения пучков, при котором произошло событие. Для временной привязки исполь-

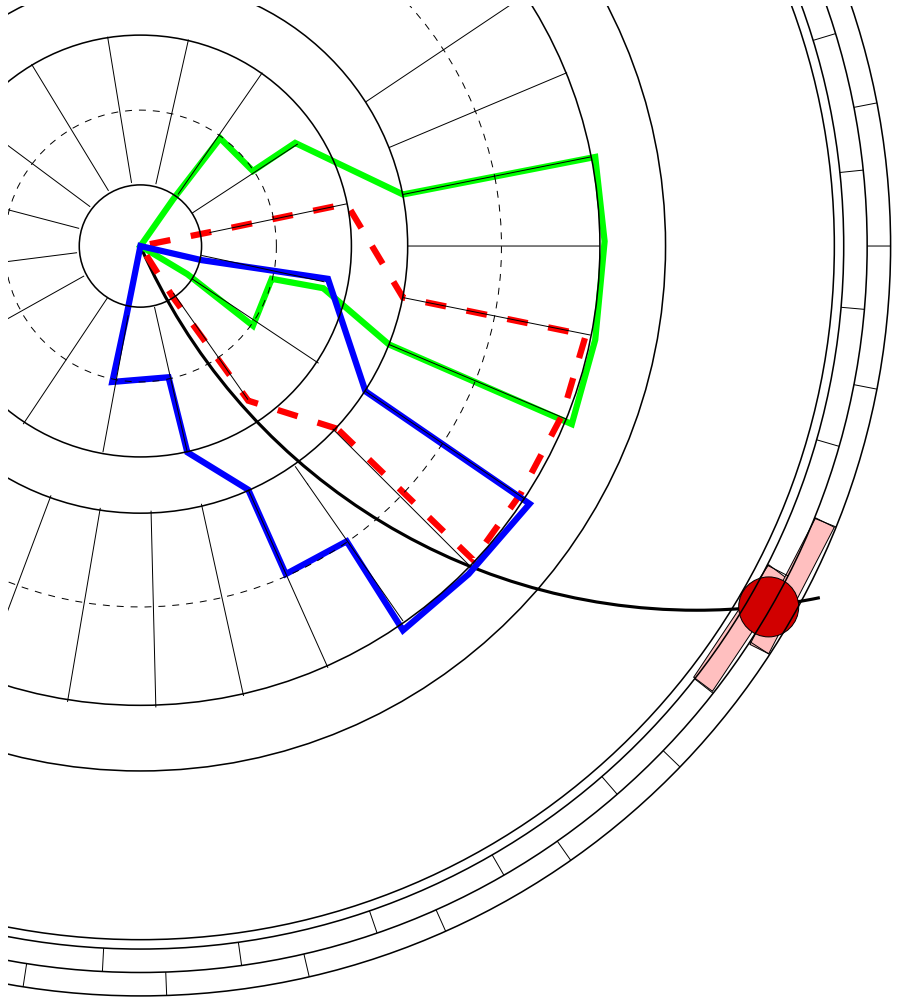


Рис. 13: Информация, используемая в работе ТП: полулунки первого и второго слоя ДК и анодные сектора Z-камеры. Показаны контуры “лунок” из 12 полулунк каждой, для опорной точки, являющейся пересечением секторов Z-камеры и изображенной на рисунке кружком.

зуется сигнал “Фазы” пучков, формируемый электроникой накопителя и синхронизированный с оборотом пучков в ВЭПП-2М.

64 сигнала дискриминаторов поступают в Интерфейс Первичного Триггера Z-камеры. В этот же блок поступает сигнал "Фаза". При отсутствии срабатываний ZK ИПТЗ начинает отсчет времени заново по каждому фронту "Фазы". При появлении первого сигнала дискриминатора отсчет разрешающего времени, начатый от ближайшей "Фазы", продолжается. ИПТЗ производит сбор сигналов, относящихся к этому же столкновению пучков, после чего прием сигналов прекращается. Набранная информация проверяется на наличие пар сигналов от перекрывающихся секторов. Если их нет, ИПТЗ быстро самосбрасывается, после чего ожидает новых входных сигналов. Если же имеется одна или больше пар сработавших перекрывающихся секторов, то ИПТЗ выдает сигнал "Старт", привязанный по времени к моменту столкновения пучков.

Информация о сработавших секторах ZK поступает в Формирователь Опорных Точек, где простой логикой преобразуется в сигналы "Опорных Точек". Эти сигналы далее не изменяются до окончания цикла работы первичного триггера.

Сигнал "Старт" задерживается линией задержки на 420 нс (общая задержка от момента события получается около 520 нс, что немного больше наибольшего времени дрейфа в ДК) и поступает на ТП. По этому сигналу ТП фиксирует информацию, присутствующую на его информационных входах. Таким образом, к моменту начала работы ТП на его информационных входах присутствует информация о сработавших Опорных Точках и о сработавших проволочках ДК.

## 5 Реконструкция продольной координаты

### 5.1 Общие соображения

Как правило, наведенные на катодных полосках заряды выглядят как показано на Рис. 14. Существует множество алгоритмов восстановления Z-координаты лавины по известным наведенным зарядам. Простейшим является так называемый метод центра тяжести, в котором координата, приписываемая лавине, определяется по формуле:

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i z_i}{\sum_{i=1}^n Q_i},$$

где  $z_i$  - координата центра i-той полоски,  $Q_i$  - наведенный на ней заряд, n - количество полосок, по которым вычислялась координата.

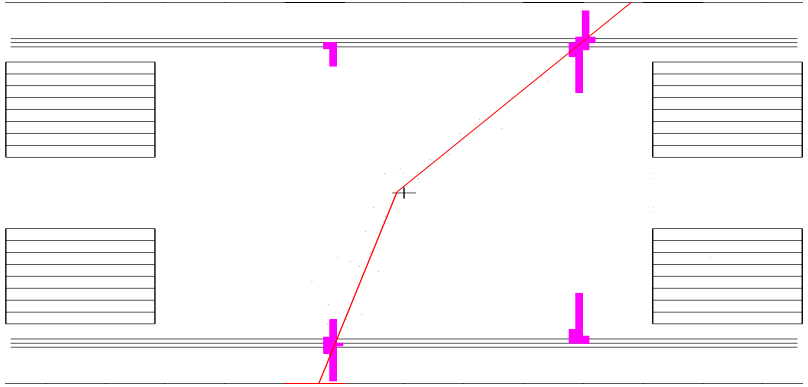


Рис. 14: Катодные кластеры в Z-камере так, как они выглядят в программе визуализации экспериментальных событий. Приведено типичное событие  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ . Длины столбиков пропорциональны величине наведенного на соответствующей полоске заряда. Симметричные отражения являются особенностью визуализации данных из-за неопределенности положения кластера по азимутальному углу. Для удобства изображение вытянуто вдоль горизонтальной оси.

Координата, определяемая по методу центра тяжести, как правило систематически сдвинута относительно истинного положения лавины. Это происходит вследствие того, что:

1. Полоски имеют конечную ширину, и центр тяжести заряда на полоске не совпадает с ее геометрическим центром.
2. Координата восстанавливается только по нескольким ближайшим к лавине полоскам, а заряды, наведенные на остальных полосках, отбрасываются и это, как правило, несимметрично относительно лавины.

Какое количество полосок необходимо использовать для восстановления координаты лавины? Поскольку лавина характеризуется двумя параметрами - полным зарядом  $Q_0$  и местоположением  $z_0$ , то теоретически достаточно измерить заряды на двух полосках, вообще говоря произвольных. Реально, поскольку наведенный заряд всегда искажен шумами, необходимо использовать полоски с максимальным наведенным зарядом, т.е. две ближайшие к лавине. Улучшит ли точность восстановления увели-

чение количества используемых полосок? Ответ зависит от нескольких факторов.

Координатное разрешение при использовании метода центра тяжести может быть оценено по формуле

$$\sigma_z = \frac{a \cdot n \sigma_{noise} \sqrt{n}}{\sqrt{12} Q_{tot}} = \frac{a}{2\sqrt{3}} \frac{\sigma_{noise}}{Q_{tot}} n^{\frac{3}{2}},$$

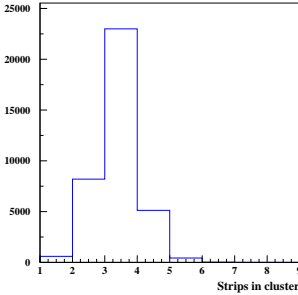


Рис. 15: Распределение по количеству полосок в кластере для типичных условий работы Z-камеры.

Это не только заметно увеличивает  $Q_{tot}$ , но и, что более существенно, сильно уменьшает упоминавшийся выше систематический сдвиг. Распределение по количеству полосок, на которых наводится заряд выше порогового значения в типичных экспериментальных условиях показано на Рис. 15.

Величину систематического сдвига можно вычислить, зная теоретическую форму распределения наведенного заряда. Все методы восстановления координаты так или иначе используют это распределение либо в явном виде, либо в виде поправок. Поскольку распределение заряда зависит от геометрии камеры и обычно описывается приближенным выражением, имеет смысл включать в обработку две или три полоски таким образом, чтобы минимизировать величину систематического сдвига. Видно, что выбранная геометрия камеры вполне позволяет ограничиться двумя или тремя полосками при восстановлении Z-координаты кластера.

Подведем итоги вышеизложенного:



1. Геометрия камеры должна быть такой, чтобы основная часть заряда наводилась в среднем на трех полосках (это обеспечивается, если соотношение между шагом полосок и зазором анод – катод лежит в диапазоне 1–2).
2. Для восстановления координаты следует использовать две или три полоски в зависимости от расположения лавины, использование большего числа полосок не приводит к улучшению разрешения.
3. Метод центра тяжести характеризуется наличием систематического сдвига восстановленной координаты, который может быть убран (или, по крайней мере, значительно уменьшен) внесением поправок, вычисляемых по предполагаемой форме распределения заряда.

## 5.2 Описание алгоритма

Восстановление  $Z$ -координаты условно состоит из следующих этапов:

1. По адресам электронных каналов определяются сработавшие катодные полоски;
2. Измеренные на полосках заряды поправляются с учетом разных коэффициентов усиления ЗЧУ;
3. Отбрасываются полоски с амплитудой ниже порога-1;
4. Группы соседних полосок объединяются в кластеры;
5. Кластеры с суммарной амплитудой меньше порога-2 отбрасываются;
6. Для оставшихся кластеров вычисляются координаты центров тяжести наведенного заряда для двух и трех (если сработало больше двух) ближайших к центру полосок. Выбирается координата, соответствующая минимальному систематическому сдвигу (т.е. по двум полоскам, если центр вблизи края полоски и по трем — вблизи середины полоски);
7. Вносятся поправки на систематические сдвиги и на сдвиг слоев  $Z$ -камеры друг относительно друга.

Алгоритм также определяет форму каждого кластера и помечает кластеры, имеющие больше одного максимума, как потенциальные двухтрековые. Поиск кластеров ведется независимо для каждого слоя камеры. В качестве выходных параметров каждый кластер имеет  $Z$ -координату, ее ошибку, суммарный заряд кластера в каналах АЦП, полное число сработавших полосок и число полосок, по которым определялась  $Z$ -координата. Ошибка  $Z$ -координаты оценивается исходя из количества использованных при измерении полосок и уровня шумов и реально является оценкой снизу, поскольку не учитывает зависимость разрешения от угла наклона трека. Правильную оценку ошибки измерения можно получить только с использованием информации о треке из ДК с учетом зависимости, показанной на Рис. 12(б).

## 6 Использование $Z$ -камеры в обработке событий

### 6.1 Привязка $Z$ -камеры к остальным системам КМД-2

$Z$ -камера является частью трековой системы КМД-2, и при реконструкции события необходимо сшить информацию о треке, полученную из  $Z$ -камеры с информацией из других систем. Алгоритм пришивки реализован в процедуре глобальной реконструкции, являющейся частью программы обработки данных КМД-2 [10].

Основой для пришивки является информация о треках из Дрейфовой камеры. По параметрам трека определяется место его предполагаемого пересечения со слоями  $Z$ -камеры. Сработавшие сектора пришиваются к треку если трек их пересекает, либо проходит не далее 8 мм от границы сектора. При 100 % эффективности камеры к треку пришиваются как правило по одному сектору из каждого слоя. В тех случаях, когда трек прошел по границе двух секторов в слое и произошло срабатывание обоих, к треку будут пришиты оба сектора.

Пришивка катодных кластеров происходит при выполнении следующих условий:

1. По углу  $\phi$  трек совпадает с положением кластера (угловой размер кластеров определяется минимальным размером входящих в него полосок и составляет, как правило,  $1/2$  или  $1/4$  окружности) с точностью до  $1/30$  радиана.

2.  $Z$ -координата кластера отстоит от места предполагаемого пересечения не более, чем на 3 см, что должно перекрывать неточность вычисления  $Z$ -координаты трека в Дрейфовой камере.

Кластеры внутреннего и внешнего слоя, совпадающие по  $Z$  в пределах  $\pm 4$  мм, перед пришивкой объединяются.

Калибровка производится по двухтрековым коллинеарным событиям в которых в  $Z$ -камере найдено не менее 3 принадлежащих трекам кластеров. По этим кластерам проводится прямая линия и определяются отклонения точек в ДК от проведенной прямой. По большой статистике калибровочные параметры ДК (по 3 на каждую проволочку) подгоняются таким образом, чтобы минимизировать эти отклонения. Подробно процесс калибровки описан в [13]. После проведения калибровок систематическая ошибка в определении полярного угла становится не более  $3 \cdot 10^{-4}$  радиан.

## 6.2 Определение полярного угла трека

Для определения полярного угла трека используются  $Z$ -координаты точек пересечения трека со слоями Дрейфовой и  $Z$  камер. Эти точки расположены на поверхности воображаемого цилиндра с радиусом кривизны трека в магнитном поле и должны ложиться на прямую в плоскости  $l-z$ , где  $l(z)$  — длина трека в зависимости от продольной координаты. Количество точек в ДК соответствует числу сработавших вдоль трека проволочек и может достигать 19. Однако, точность измерения  $Z$ -координаты в ДК в среднем порядка 5 мм на точку, поэтому даже при наличии всех 19 точек,  $Z$ -камера может существенно улучшить точность измерения полярного угла, фактически фиксируя один конец трека. Вместе с калибровкой ДК (см. раздел 6.3) это позволяет заметно улучшить импульсное разрешение трековой системы КМД-2 [12].

## 6.3 Калибровка Дрейфовой камеры с помощью $Z$ -камеры

Для измерения  $Z$ -координаты в ДК используется метод деления заряда. Неточность знания параметров электронного тракта и неоднородность удельного сопротивления проволочек приводит в этом методе к значительным систематическим сдвигам. Систематическая ошибка в определении полярного угла треков дает систематическую ошибку в отборе в фиксированный телесный угол. Как обсуждалось ранее, для достижения

заявленной точности измерения сечений 0.5 %, систематическая ошибка в определении полярного угла не должна превышать  $1 \cdot 10^{-3}$  радиан. Калибровка Дрейфовой камеры по измерениям в Z-камере, позволяет значительно уменьшить эту ошибку. Влияние калибровки ДК и использования Z-камеры в определении полярного угла трека на угловое разрешение продемонстрировано на Рис. 16.

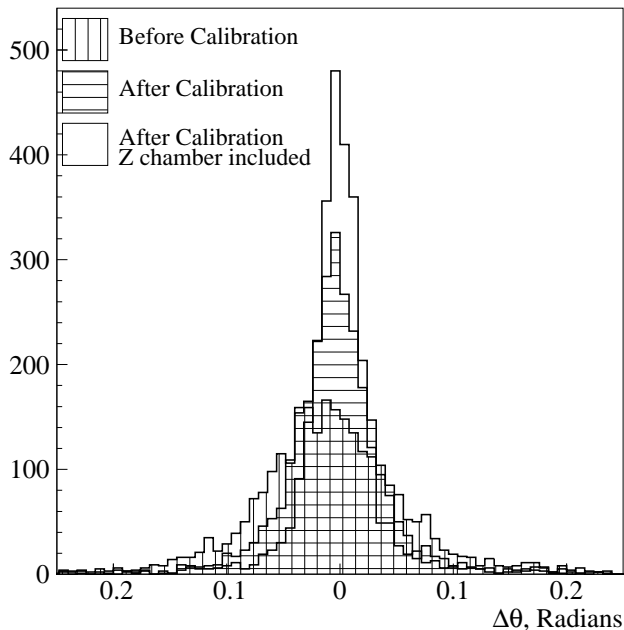


Рис. 16: Распределения по углу расколлинеарности Баба-событий. Вертикальная штриховка — до калибровок параметров ДК, горизонтальная — после калибровок, нештрихованная гистограмма — после включения в проведение трека координаты из Z-камеры.

## Благодарности

Авторы благодарны С.Г. Пивоварову и Э.Э. Мархелю за помощь в проектировании и изготовлении Z-камеры, М.Н. Захваткину и В.Е. Федоренко за разработку и изготовление электроники, В.И. Свердлову и Д.В. Петровичу за постоянную поддержку работоспособности преусилителей и оцифровывающей электроники.

Мы также признательны В.С. Охупкину за помощь в изготовлении пиннов, Е. Тарасову, А.В. Клименкову и И.Б. Логашенко за большой вклад в программное обеспечение, Е.П. Солодову и Б.И. Хазину за многочисленные полезные обсуждения и ценные советы.

## Список литературы

- [1] Г.А. Аксенов, В.М. Аульченко, Л.М. Барков *и др.*, Проект детектора КМД-2., Препринт ИЯФ **85-118**, Новосибирск, 1985.
- [2] E.V. Anashkin, V.M. Aulchenko, S.E. Baru *et al.*, General Purpose Cryogenic Magnetic Detector CMD-2 for Experiments at The VEPP-2M Collider., ICFA Instrumentation Bulletin, **5**, 1988, p. 18.
- [3] E.V. Anashkin, V.M. Aulchenko, V.E. Fedorenko *et al.*, Z chamber and the trigger of the CMD-2 detector., Nucl.Instrum. and Meth., **A323**, 1992, p. 178.
- [4] A. Breskin, G. Charpak *et al.*, Nucl. Instr. and Meth., **176**, 1977, p. 29.
- [5] Caso *et al.*, Review of Particle Physics., The European Physical Journal, **C3**, 1998, NN 1-4.
- [6] V.M. Aulchenko, S.E. Baru, G.A. Savinov *et al.*, Electronics of new detectors of the INP for colliding beam experiments., Proceedings of the International Symposium on Position Detectors in High Energy Physics, Dubna, 1988, p. 371
- [7] В.М. Аульченко, Б.О. Байбусинов, В.М. Титов, Информационные платы ТП,  $\Delta T$  и T2A системы сбора данных КЛЮКВА., Препринт ИЯФ **88-22**, Новосибирск, 1988.
- [8] E. Mathieson, J.S. Gordon, Cathode charge distributions in multiwire chambers., Nucl.Instr. and Meth., **A227**, 1984, pp. 267-282.
- [9] В.М. Аульченко, Г.С. Пискунов, Е.П. Солодов *и др.*, Трековый процессор для КМД-2., Препринт ИЯФ **88-43**, Новосибирск, 1988.
- [10] Н.М. Рыскулов, Привязка к треку систем в КМД-2., Меморандум КМД-2 **Offline-2**, Новосибирск, 1996.
- [11] Б.И. Хазин, Д.В. Черняк, Восстановление Z-координаты в дрейфовой камере., Меморандум КМД-2 **ДС-11**, Новосибирск, 1995.
- [12] E.V. Anashkin D.V. Chernyak, G.V. Fedotovitch *et al.*, Calibration of CMD-2 drift chamber., Nucl. Instr. and Meth. **A379**, 1996, pp. 432-433.
- [13] Ф.В. Игнатов, П.А. Лукин, А.С. Попов *и др.*, Дрейфовая камера детектора КМД-2., Препринт ИЯФ **99-64**, Новосибирск, 1999.