

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

Анашин В.В., Аульченко В.М., Балдин Е.М., Барладян А.К., Барняков А.Ю.,  
Барняков М.Ю., Бару С.Е., Басок И.Ю., Бедный И.В., Белобородова О.Л.,  
Блинов А.Е., Блинов В.Е., Бобров А.В., Бобровников В.С., Бондарь А.Е.,  
Бузыкаев А.Р., Воробьёв А.И., Гулевич В.В., Днепровский Л.В., Жилич В.Н.,  
Жуланов В.В., Карпов Г.В., Карпов С.В., Кононов С.А., Котов К.Ю.,  
Кравченко Е.А., Кудрявцев В.Н., Кузьмин А.С., Куликов В.Ф., Купер Э.А.,  
Левичев Е.Б., Максимов Д.А., Малышев В.М., Масленников А.Л., Медведко А.С.,  
Мучной Н.Ю., Никитин С.А., Николаев И.Б., Онучин А.П., Орешкин С.Б.,  
Орлов И.О., Осипов А.А., Пелеганчук С.В., Пивоваров С.Г., Полуэктов А.О.,  
Поспелов Г.Э., Присекин В.Г., Рубан А.А., Родякин В.А., Савинов Г.А.,  
Сковпень Ю.А., Скринский А.Н., Смалюк В.В., Снопков Р.Г., Соколов А.В.,  
Сухарев А.М., Талышев А.А., Таюрский В.А., Тельнов В.И., Тихонов Ю.А.,  
Тодышев К.Ю., Усов Ю.В., Харламова Т.А., Шамов А.Г., Шварц Б.А.,  
Шехтман Л.И., Шушаро А.И., Юшков А.Н.

ДЕТЕКТОР КЕДР

ИЯФ 2010-40

# Детектор КЕДР

Анашин В.В., Аульченко В.М., Балдин Е.М., Барладян А.К., Барняков А.Ю.,  
Барняков М.Ю., Басок И.Ю., Бару С.Е., Бедный И.В., Белобородова О.Л.,  
Блинов А.Е., Блинов В.Е., Бобров А.В., Бобровников В.С., Бондарь А.Е.,  
Бузыкаев А.Р., Воробьёв А.И., Гулевич В.В., Днепровский Л.В., Жилич В.Н.,  
Жуланов В.В., Карпов Г.В., Карпов С.В., Кононов С.А., Котов К.Ю.,  
Кравченко Е.А., Кудрявцев В.Н., Кузьмин А.С., Куликов В.Ф., Купер Э.А.,  
Левичев Е.Б., Малышев В.М., Максимов Д.А., Масленников А.Л., Медведко А.С.,  
Мучной Н.Ю., Никитин С.А., Николаев И.Б., Онучин А.П., Орешкин С.Б.,  
Орлов И.О., Осипов А.А., Пелеганчук С.В., Пивоваров С.Г., Полуэктов А.О.,  
Поспелов Г.Э., Присекин В.Г., Рубан А.А., Родякин В.А., Савинов Г.А.,  
Сковпень Ю.А., Скринский А.Н., Смалюк В.В., Снопков Р.Г., Соколов А.В.,  
Сухарев А.М., Талышев А.А., Таюрский В.А., Тельнов В.И., Тихонов Ю.А.,  
Тодышев К.Ю., Усов Ю.В., Харламова Т.А., Шамов А.Г., Шварц Б.А.,  
Шехтман Л.И., Шушаро А.И., Юшков А.Н.

## Аннотация

КЕДР — универсальный магнитный детектор, предназначенный для проведения экспериментов по физике элементарных частиц на  $e^+e^-$ -коллайдере ВЭПП-4М в области энергий от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс. Детектор спроектирован для изучения  $c$ -,  $b$ -кварков и двухфотонной физики. Заряженные частицы регистрируются с помощью вершинного детектора на основе лавсановых пропорциональных трубочек и цилиндрической проволочной дрейфовой камеры. Для детектирования гамма-квантов предназначен расположенный внутри сверхпроводящей обмотки магнита электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона в цилиндрической части и кристаллов CsI в торцевой части детектора. Мюоны регистрируются с помощью нескольких слоёв камер на основе стримерных цилиндрических трубок, расположенных в пазах железного ядра детектора. Заряженные адроны идентифицируются по измерению ионизационных потерь в газе дрейфовой камеры, измерению времени пролёта по сцинтилляционным счётчикам и с помощью пороговых черенковских счётчиков на основе аэрогеля. Детектор оборудован системой регистрации рассеянных электронов и позитронов, расположенной по обе стороны от места встречи и предназначенной для изучения двухфотонных процессов  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X$ . Светимость измеряется по процессу однократного тормозного излучения и по событиям Баба-рассеяния на большие углы. Прецизионное измерение энергии пучка производится методом резонансной деполяризации. Непрерывное мониторирование энергии с несколько худшей точностью производится по измерению положения края комптоновского спектра обратно рассеянных монохроматических лазерных фотонов.

# Detector KEDR

V.V. Anashin, V.M. Aulchenko, E.M. Baldin, A.K. Barladyan, A.Yu. Barnyakov,  
M.Yu. Barnyakov, I.Yu. Basok, S.E. Baru, I.V. Bedny, O.L. Beloborodova,  
A.E. Blinov, V.E. Blinov, A.V. Bobrov, V.S. Bobrovnikov, A.E. Bondar,  
A.R. Buzykaev, V.V. Gulevich, L.V. Dneprovsky, G.V. Karpov, S.V. Karpov,  
T.A. Kharlamova, S.A. Kononov, K.Yu. Kotov, E.A. Kravchenko, V.N. Kudryavtsev,  
A.S. Kuzmin, V.F. Kulikov, E.A. Kuper, E.B. Levichev, D.A. Maksimov,  
V.M. Malyshev, A.L. Maslennikov, A.S. Medvedko, N.Yu. Muchnoi, S.A. Nikitin,  
I.B. Nikolaev, A.P. Onuchin, S.B. Oreshkin, I.O. Orlov, A.A. Osipov,  
S.V. Peleganchuk, S.G. Pivovarov, A.O. Poluektov, G.E. Pospelov, V.G. Prisekin,  
A.A. Ruban, V.A. Rodyakin, G.A. Savinov, A.G. Shamov, L.I. Shekhtman,  
A.I. Shusharo, B.A. Shwartz, Yu.I. Skovpen, A.N. Skrinsky, V.V. Smaluk,  
R.G. Snopkov, A.V. Sokolov, A.M. Sukharev, A.A. Talyshev, V.A. Tayursky,  
V.I. Telnov, Yu.A. Tikhonov, K.Yu. Todyshev, Yu.V. Usov, A.I. Vorobiov,  
A.N. Yushkov, V.N. Zhilich, V.V. Zhulanov

## Abstract

The KEDR is an universal magnetic detector built for experiments in the elementary particles physics at the  $e^+e^-$ -collider VEPP-4M in the energy region from 2 up to 11 GeV in the center of mass system. The detector was designed for a study c- and b-quarks and the two-photon physics. Charged particles are detected in the vertex detector made of mylar tubes operating in the proportional mode and the cylindrical wire drift chamber. The electromagnetic calorimeter based on a liquid krypton in the barrel part and CsI crystals in the end caps is used for detection of gamma quanta. Muons are detected by means of several layers of chambers based on the streamer cylindrical tubes, arranged inside of the iron yoke of the detector. Charged hadrons are identified by measurements of ionization in the drift chamber gas and time of flight in the scintillation counters, and by means of the aerogel threshold Cerenkov counters. For the study the two-photon processes  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X$ , the detector is equipped with the system of detection of scattered electrons and positrons, placed on both sides of the interaction point. The luminosity is measured by the process of single Bremsstrahlung and by the Bhabha scattering at large angles. The precise measurement of the beam energy is performed by the resonant depolarization method. Continuous monitoring of the beam energy, with a little worse accuracy, is carried out by measurement of location of the edge of Compton spectrum of the backscattered monochromatic photons from laser.

# 1 Введение

## 1.1 Физическая программа

КЕДР – универсальный магнитный детектор для исследования свойств  $\psi$ -,  $\Upsilon$ -мезонов и двухфотонной физики. Детектор работает на  $e^+e^-$ -коллайдере ВЭПП-4М с энергией в пучке  $E=1-5.5$  ГэВ. Светимость ВЭПП-4М на низкой энергии ( $E=1.5-3.0$  ГэВ) равна  $2.5 \cdot 10^{30}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>, на высокой энергии ( $E=4.5-5.0$  ГэВ) возрастает до  $8 \cdot 10^{31}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>.

В настоящее время в области низкой энергии работает детектор BESIII на  $e^+e^-$ -коллайдере BEPCII ( $E=1-2.1$  ГэВ) с проектной светимостью  $10^{33}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>. В 2008 г. завершил работу детектор CLEO-с на  $e^+e^-$ -коллайдере CESR-с со светимостью  $7.6 \cdot 10^{31}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>. Светимость ВЭПП-4М в 30 раз ниже светимости CESR и в 400 раз ниже светимости BEPCII. По своим параметрам детектор КЕДР сравним с детекторами BESIII и CLEO-с.

В области высокой энергии ( $\sqrt{s} = 2 \times 5.29$  ГэВ) продолжает работу детектор BELLE на  $B$ -фабрике в КЕК со светимостью около  $10^{34}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>, детектор BABAR на  $B$ -фабрике в SLAC в 2008 году закончил набор данных. Записанные интегралы светимости на этих детекторах составляют 500–1000 фбн<sup>-1</sup>.

Выстраивая физическую программу детектора КЕДР мы исходили прежде всего из ряда наших преимуществ в сравнении с другими машинами и детекторами:

- Уникальный для существующих  $e^+e^-$ -коллайдеров диапазон энергий ВЭПП-4М от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс, что позволяет работать как в области низких энергий, где расположено семейство  $\psi$ -мезонов и порог рождения  $\tau$ -лептона, так и в области высоких энергий, где рождаются  $\Upsilon$ -мезоны.
- Наличие двух взаимодополняющих методик прецизионного измерения и мониторинга энергии пучка: метод резонансной деполяризации с относительной точностью  $10^{-6}$ , и метод мониторинга энергии с относительной точностью  $3 \cdot 10^{-5}$ , основанный на измерении энергетического спектра комптоновских гамма-квантов, образующихся при рассеянии монохроматического лазерного излучения на электронном пучке.
- Наличие в детекторе электромагнитного калориметра на основе жидкого криптона, обладающего высоким энергетическим разрешением и возможностью измерения координаты точки конверсии гамма-кванта с точностью  $\sim 1$  мм.
- Наличие в детекторе системы пороговых аэрогелевых черенковских счетчиков, позволяющих разделять  $\pi$  и  $K$ -мезоны в диапазоне импульсов от 600 до 1500 МэВ/с.
- Наличие в детекторе уникальной системы регистрации рассеянных электронов и позитронов (СРРЭ) для изучения двухфотонных процессов  $e^+e^- \rightarrow \gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X$ . Система позволяет определять инвариантную массу рождённого состояния  $X$  с относительной точностью  $(5 \div 10) \cdot 10^{-3}$  при энергии 1 ГэВ. Вследствие этого эффективность регистрации двухфотонных процессов возрастает в десятки раз в сравнении с детекторами, не оснащёнными подобной системой.

Исходя из существующей ситуации и с учётом наших возможностей в общих чертах программа экспериментов выглядит следующим образом.

Наиболее очевидной первоочередной задачей для детектора КЕДР является прецизионное измерение масс элементарных частиц, для которого важную роль играет

прецизионное измерение энергии накопителя. В области низкой энергии — это массы  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi(3770)$ ,  $D^0$ ,  $D^\pm$ -мезонов и  $\tau$ -лептона. К настоящему времени эта программа в значительной мере выполнена. В области высокой энергии могут быть уточнены значения масс  $\Upsilon(1s)$ – $\Upsilon(4s)$ -мезонов и, возможно, измерены массы некоторых других состояний.

Другой важной задачей является измерение величины сечения  $e^+e^- \rightarrow hadrons$  (величины  $R$ ) в области энергий  $2E = 2 - 11$  ГэВ в одном эксперименте с одним детектором, что до настоящего времени не делалось. Наибольший интерес при измерении  $R$  представляет область от 5 до 7 ГэВ. Ранее она изучалась в двух экспериментах: MARK-I и Crystal Ball. Однако, результаты MARK-I значительно отличаются от более поздних измерений и в настоящее время считаются ошибочными, а результат Crystal Ball не был опубликован в реферируемых журналах. Таким образом, в определённом смысле, эта область энергий остаётся неизученной.

Хорошие параметры LКг калориметра и черенковских счётчиков детектора КЕДР позволяют выполнить ряд экспериментов по измерению вероятностей распадов частиц  $\psi$ - и  $\Upsilon$ -семейств, в которых могут быть получены значимые физические результаты.

Жидкокриптоновый электромагнитный калориметр позволяет измерить вероятности радиационных переходов в системах  $\psi$ - и  $\Upsilon$ -мезонов и другие нейтральные процессы с вероятностями выше  $10^{-4}$ , для которых на доступной нам статистике в  $10^7$  распадов  $\psi$ - и  $\Upsilon$ -мезонов точность определяется систематической ошибкой.

Система пороговых черенковских аэрогелевых счётчиков имеет хорошее разделение для  $\pi$ - и  $K$ -мезонов ( $P = 600 \div 1500$  МэВ/с) и позволит получить хорошую точность измерения вероятностей распадов  $J/\psi$  и  $\psi'$  в конечные состояния, содержащие такие частицы.

Наличие в детекторе системы регистрации рассеянных электронов делает КЕДР уникальным местом для проведения измерения сечения  $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$  и исследования двухфотонных процессов. Эти эксперименты планируется проводить в основном при высокой энергии. Несмотря на то, что доступный нам интеграл светимости более чем в 5000 раз меньше интеграла светимости, набранного на  $B$ -фабриках, а наличие СРРЭ даёт выигрыш в эффективности регистрации двухфотонных процессов только в 50-100 раз, по нашему мнению, мы сможем провести измерения сечений двухфотонных процессов со сравнимой или даже лучшей точностью. Точность измерения многих двухфотонных процессов ограничивается систематической ошибкой, а не статистической. Наличие в детекторе КЕДР высокоэффективной системы регистрации рассеянных электронов должно привести к уменьшению величины систематической ошибки в наших измерениях в сравнении с результатами, полученными на детекторах, не оснащённых подобной системой.

Кроме вышеперечисленного, возможно удастся поднять энергию ВЭПП-4М выше  $\Upsilon(4s)$ -мезона и провести измерения в этой области. До настоящего времени в ней работал только детектор CLEO, и набранный им интеграл светимости не столь значителен.

## 1.2 Схема детектора

Детектор КЕДР – универсальный магнитный детектор, предназначенный для проведения экспериментов по физике элементарных частиц в области энергий  $2E=2-11$  ГэВ. Схема центральной части детектора показана на рис. 1. В настоящее время детектор работает с полем 0.6 Тл.

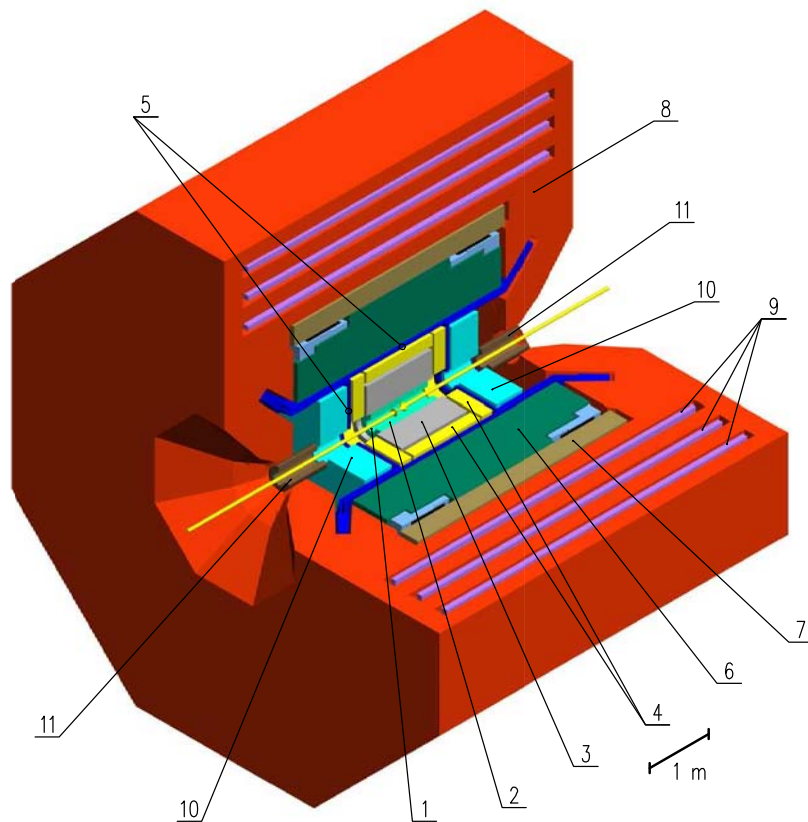


Рис. 1: Центральная часть детектора КЕДР. 1 - вакуумная труба ускорителя, 2 - вершинный детектор, 3 - дрейфовая камера, 4 - аэрогелевые пороговые счетчики, 5 - времяпролётные счетчики, 6 - баррельный жидкокриптоновый калориметр, 7 - сверхпроводящая катушка, 8 - ярмо, 9 - мюонные камеры, 10 - торцевой CsI калориметр, 11 - компенсирующая катушка.

Детектор КЕДР состоит из следующих систем: вершинный детектор, дрейфовая камера, аэрогелевые черенковские счётчики, времяпролётные сцинтилляционные счётчики, баррельный электромагнитный калориметр на основе жидкого криптона, торцевой электромагнитный калориметр на основе кристаллов CsI, сверхпроводящая магнитная катушка, мюонная система, система регистрации рассеянных электронов и монитор светимости.

Далее в работе описаны коллайдер ВЭПП-4М и методики измерения энергии пучка, приведено подробное описание систем регистрации детектора КЕДР.

## 2 Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М

Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М (рис. 2) предназначен для экспериментов по физике высоких энергий, фотоядерных исследований и экспериментов с синхротронным излучением [1, 2]. ВЭПП-4М является модернизацией коллайдера ВЭПП-4 с энергией в пучке от 1 до 5.5 ГэВ. Установка работает в режиме  $2 \times 2$  сгустка.

Магнитная структура ВЭПП-4М является зеркально-симметричной относительно оси, проходящей через центры экспериментального и технического промежутков.

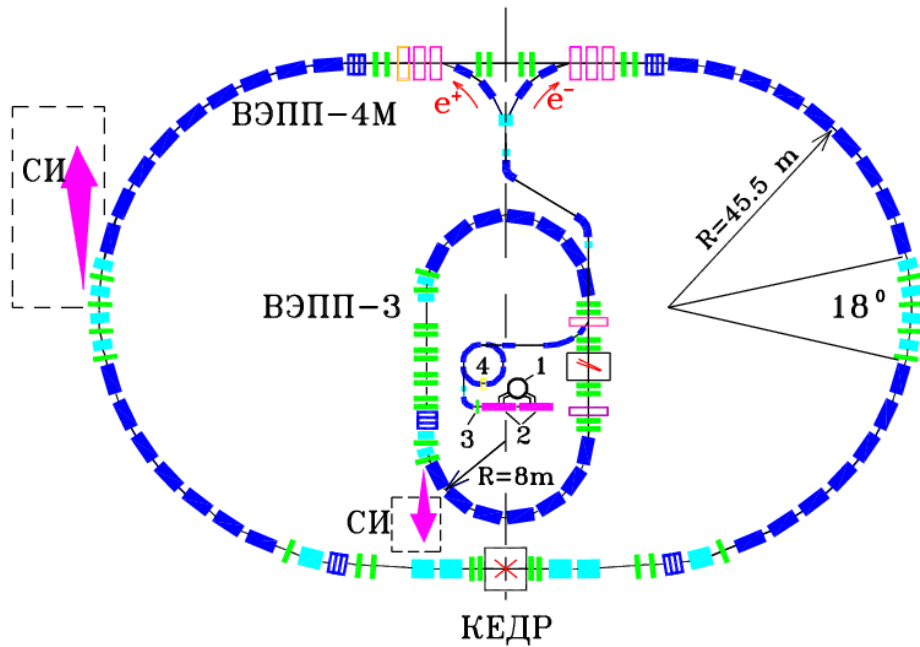


Рис. 2: Схема ВЭПП-4М. Инжектор: 1 – гирокон (430 МГц); 2 – линейный ускоритель (50 МэВ); 3 – электрон-позитронный конвертор; 4 – синхротрон Б-4 (350 МэВ).

Для работы в режиме  $2 \times 2$  ступка в полукольцах сделаны N и S вставки, в которых установлены системы электростатического разведения пучков. Две пары дипольных магнитов, расположенных в экспериментальном промежутке, и квадрупольные линзы финального фокуса, установленные вблизи места встречи электронного и позитронного пучков, представляют собой жёсткофокусирующий спектрометр для системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР. На концах экспериментального промежутка симметрично установлены два дипольных вигглера для управления размерами пучка. В техническом промежутке, в местах с нулевой дисперсией, находятся два градиентных вигглера для управления декрементами затухания.

Основные параметры ВЭПП-4М представлены в таблице 1.

## 2.1 Измерение энергии пучка

На коллайдере ВЭПП-4М реализовано два метода измерения энергии пучка. Для прецизионного измерения энергии с точностью  $10^{-6}$  используется метод резонансной деполяризации (РД), который был предложен и впервые реализован в ИЯФ в 1970-х годах [3, 4]. С тех пор метод широко используется в ИЯФ и в других лабораториях мира. Для непрерывного мониторингования энергии и энергетического разброса в процессе набора статистики применён метод, основанный на обратном комптоновском рассеянии [5, 4]. Точность измерения энергии в этой методике составляет  $3 \cdot 10^{-5}$ , а энергетического разброса – около 10%.

### 2.1.1 Метод резонансной деполяризации

Метод резонансной деполяризации является наиболее точным методом абсолютной калибровки энергии в  $e^+e^-$  накопителе. В его основе лежит прецизионное измерение частоты прецессии спина  $\Omega$ . В накопителе с плоской орбитой средняя частота прецес-

Таблица 1: Параметры ВЭПП-4М.

Параметр	Значение
Периметр	366.075 м
Радиус поворота	34.5 м
Максимальная энергия	5.5 ГэВ
Коэффициент пространственного уплотнения орбит	0.0168
Число сгустков	$2e^- \times 2e^+$
Бетатронные частоты, горизонтальная/вертикальная	8.54/7.58
Естественный хроматизм, горизонтальный/вертикальный	-14.5/-20.3
Частота ВЧ	181.10165 МГц
Гармоника ВЧ	222
Количество резонаторов	5
Максимальная амплитуда напряжения на резонаторе	1000 кВ
Структурные функции в месте встречи:	
вертикальная бета-функция	0.05 м
горизонтальная бета-функция	0.75 м
горизонтальная дисперсия	0.80 м

сии спина вокруг направления ведущего магнитного поля даётся выражением

$$\Omega = \omega_0 \left( 1 + \gamma \frac{\mu'}{\mu_0} \right), \quad (1)$$

где  $\omega_0$  — циклическая частота обращения;

$\mu'/\mu_0$  — отношение аномальной части магнитного момента электрона к нормальной;

$\gamma$  — релятивистский фактор.

Деполяризация происходит при введении внешнего электромагнитного поля с частотой  $\Omega_d$ , удовлетворяющей условию внешнего спинового резонанса

$$\Omega \pm \Omega_d = n\omega_0$$

при любом целом  $n$ . Факт деполяризации можно установить, регистрируя подходящий поляризационно-чувствительный процесс. Вводя нормализованную спиновую частоту

$$\nu = \frac{\Omega}{\omega_0} - 1 = \gamma \frac{\mu'}{\mu_0},$$

получаем выражение для энергии пучка  $E$ :

$$E [\text{МэВ}] = \nu \frac{mc^2}{(\mu'/\mu_0)} = (440.648428 \pm 1.1 \cdot 10^{-5}) \cdot \nu.$$

Входящие в это выражение константы известны с высокой точностью [6]:

$$\mu'/\mu_0 = 1.15965218073 \cdot 10^{-3} \pm 2.8 \cdot 10^{-13} \text{ и } mc^2 = (0.510998910 \pm 1.3 \cdot 10^{-8}) \text{ МэВ},$$

что даёт принципиальную возможность найти энергию частицы по измеренной частоте спиновой прецессии с предельной относительной точностью  $2.5 \cdot 10^{-8}$ . Важно



отметить: требуется точно измерять не абсолютное значение частоты прецессии, а только её отношение к частоте обращения ( $\nu$ ).

Поляризованные электрон-позитронные пучки на комплексе ВЭПП-4 получают благодаря известному эффекту Соколова-Тернова. При движении частицы ее магнитный момент прецессирует вокруг направления вектора магнитного поля и составляющая магнитного момента, ортогональная полю, уменьшается за счёт магнитодипольного излучения. В результате, за характерное время излучения спин ориентируется вдоль магнитного поля [7]. Время поляризации в приближении круговой орбиты радиуса  $R$  в однородном магнитном поле равно

$$\tau_{pol}[\text{сек}] = \frac{R^3}{\gamma^5 \lambda_e c r_0} = \frac{2.8 \cdot 10^{18} R^3[\text{м}]}{\gamma^5}, \quad (2)$$

где  $\lambda_e = 3.86 \cdot 10^{-11}$  см — комптоновская длина волны;

$r_0 = 2.82 \cdot 10^{-13}$  см — классический радиус электрона.

В кольце коллайдера ВЭПП-4М на энергии 1.8 ГэВ время поляризации неприемлемо велико:  $\tau_{pol} \approx 100$  часов. Однако наличие бустерного накопителя ВЭПП-3 с существенно меньшим радиусом орбиты  $R$  и временем поляризации порядка одного часа (около получаса на 1.8 ГэВ) позволяет получать поляризованные пучки, перепускаемые и используемые затем в ВЭПП-4М.

На ВЭПП-4М в области энергий до 2 ГэВ для регистрации факта деполяризации пучка используется эффект внутрисгусткового рассеяния частиц (эффект Тушека) [8]. Скорость счёта рассеянных частиц, зависящая от спина, измеряется тремя парами сцинтилляционных счётчиков, вместе образующих распределенную систему регистрации [4]. Две пары установлены по краям экспериментального промежутка, а одна — в техническом промежутке. Счётчики каждой пары вводятся внутрь апертуры в горизонтальной плоскости с обеих сторон и регистрируют Тушек-электроны, рассеянные по периметру кольца. В акте рассеяния два электрона получают одинаковые по величине, но разные по знаку приращения импульса, и в результате начинают двигаться по траекториям, симметрично отклоненным в медианной плоскости от замкнутой орбиты.

Скорость счёта рассеянных частиц приближенно равна [9]:

$$W = \frac{\sqrt{\pi} r_0^2 c N^2}{\gamma^5 V_b (c \sigma_{p\perp} / E)^3} (a + b \cdot \zeta^2), \quad (3)$$

где  $N$  — число частиц в сгустке;

$V_b$  — объем сгустка;

$c \sigma_{p\perp} / E$  — относительный разброс радиального импульса в сгустке;

$\zeta$  — степень поляризации;

$a, b = a, b(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ ;

$\varepsilon_{1,2} = [\Delta p_{1,2} / (\gamma \sigma_{p\perp})]^2$ ;

$\Delta p_1 = \Delta p_1(A)$  и  $\Delta p_2 = \Delta p_2(A_\Gamma)$  — нижний и верхний пределы на возмущение полного

импульса регистрируемых частиц, соответственно;

$A$  — расстояние от счётчика до орбиты;

$A_\Gamma$  — геометрическая апертура накопителя по радиусу.

В рассматриваемых условиях внутрисгустковое рассеяние доминирует над процессами рассеяния на остаточном газе в вакуумной камере ВЭПП-4М. Загрузка счётчиков более чем на 60% состоит из тушековских частиц. Поэтому, во-первых, нет особой

необходимости подавлять некоррелированный фон, и, во-вторых, для уменьшения статистической ошибки используется суммарная загрузка счётчиков, которая в случае двух пар в экспериментальном промежутке достигает 2 МГц при токе в банче 1 мА.

В результате деполяризации происходит относительное увеличение скорости счёта рассеянных электронов на величину  $|b \cdot \zeta^2 / a|$  (в поляризованном сгустке электрическое отталкивание электронов при рассеянии ослабляется их магнитным взаимодействием, что уменьшает интенсивность выхода тушековских частиц в фиксированном интервале конечных импульсов). Поляризационный вклад в скорость счёта пропорционален квадрату степени поляризации. Он падает с увеличением энергии пучка, а также его вертикального размера [10, 11, 9]. На ВЭПП-4М изменение скорости счёта составляет в различных случаях 1 – 3%. Для уменьшения влияния нестабильностей положения пучка, его размеров и времени жизни, измеряется отношение скоростей счёта рассеянных электронов от поляризованного ( $W_1$ ) и неполяризованного ( $W_2$ ) сгустков, разделенных во времени на пол-периода обращения:

$$\delta = 1 - W_2/W_1.$$

Деполяризация пучка осуществляется с помощью пары согласованных проводящих пластин, разнесенных по вертикали внутри вакуумной камеры. Создаётся бегущая ТЕМ-волна, распространяющаяся навстречу пучку, который нужно деполяризовать. Частота волны линейно перестраивается в диапазоне, включающем ожидаемое значение частоты внешнего спинового резонанса.

В другом варианте подключения пластин к ВЧ генератору, деполяризатор действует одновременно на электроны и позитроны переменным поперечным магнитным полем, создаваемым протекающим по пластинам током.

Синусоидальный сигнал деполяризатора генерируется разработанным в ИЯФ прецизионным синтезатором [12], с которым достигнуто разрешение по шагу перестройки частоты  $10^{-4}$  Гц. Опорным генератором для синтезатора и одновременно для ВЧ системы ВЭПП-4М служит рубидиевый стандарт частоты Ч1-69, имеющий точность  $10^{-10}$ . Это обеспечивает стабильность частоты обращения  $\Delta\omega_0/\omega_0 \sim 10^{-10}$  и связанную с ней стабильность энергии пучка в периоды между калибровками методом РД

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} \sim 6 \cdot 10^{-9},$$

где  $\alpha = 0.017$  — коэффициент уплотнения орбит.

Кроме того, привязка частот деполяризатора и частоты обращения в процессе калибровки к единому стандарту исключает разнонаправленный дрейф этих частот и появление соответствующей ошибки в определении энергии.

Вследствие разброса энергии частиц в пучке возникает так называемый мгновенный разброс спиновых частот ( $\sigma_\nu$ ), составляющий в относительных единицах  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  (около 1 МэВ в единицах энергии). Другая характеристика распределения спиновых частот в пучке — собственная ширина спиновой линии ( $\varepsilon_\nu$ ) — отвечает усреднению спинового движения по синхротронным и бетатронным колебаниям и может быть заметно отлична от нуля из-за квадратичной нелинейности ведущего поля.

Процесс вынужденной резонансной деполяризации занимает много времени по сравнению с периодами орбитального движения. Это объясняет, почему ошибка измерения значения средней спиновой частоты  $\langle\nu\rangle$  много меньше величины мгновенного разброса  $\sigma_\nu$ , и ошибка измерения соответствующей средней энергии частиц  $\langle E\rangle$  много меньше энергетического разброса пучка  $\sigma_E$ .

Предельная точность абсолютной калибровки энергии пучка методом РД обусловлена шириной спиновой линии. С учётом секступольной коррекции ведущего поля на ВЭПП-4М величина  $\varepsilon_\nu \sim 5 \cdot 10^{-7}$ , что соответствует предельной точности калибровки энергии пучка около 1 кэВ [14, 15].

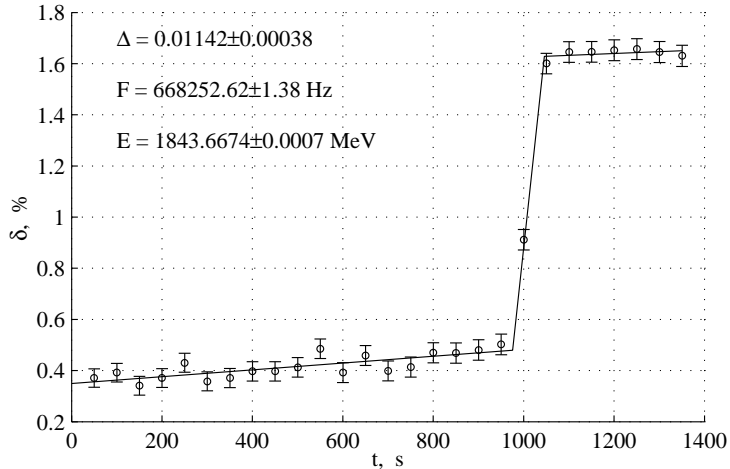


Рис. 3: Резонансная деполяризация. Точность определения энергии составляет  $\sim 10^{-6}$ .

На рис. 3 показана типичная временная диаграмма относительной скорости счёта тушековских электронов при сканировании частоты деполяризатора. Скорость сканирования в единицах энергии 0.3 кэВ/сек. Амплитуда сигнала на пластинах — несколько десятков вольт. Расчётное время деполяризации  $\sim 1$  сек. Точность определения средней энергии в одном измерении из фитирования деполяризационного скачка составляет  $\sim 10^{-6}$  (около 2 кэВ), что существенно лучше относительного разброса энергии в пучке  $\sigma_E/E \sim 5 \cdot 10^{-4}$ . Так как калибровки проводятся между заходами по набору данных, интерполяция приводит к ошибке 7–30 кэВ в приписываемой экспериментальному заходу средней энергии пучка.

### 2.1.2 Комптоновский монитор энергии и энергетического разброса

В дополнение к методу резонансной деполяризации на коллайдере ВЭПП-4М реализована система непрерывного мониторинга средней энергии и энергетического разброса электронного пучка. Принцип её действия основан на измерении энергетического спектра комптоновских гамма-квантов, образующихся при рассеянии монохроматического лазерного излучения на электронном пучке. При рассеянии лазерных фотонов с энергией  $\omega_0$  на встречном электронном пучке с энергией  $\varepsilon$ , рассеянные обратно гамма-кванты формируют энергетический спектр, форма которого проиллюстрирована на рис. 4 (узкие пики в спектре связаны с облучением детектора изотопами для калибровки энергетической шкалы). Как видно из рис. 4, рассеянные фотоны с максимальной энергией ( $\omega_{max}$ ) образуют резкий край в энергетическом спектре. Энергия электронного пучка связана с значением  $\omega_{max}$  простым соотношением (см. также (12)):

$$\varepsilon = \frac{\omega_{max}}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{m^2}{\omega_0 \omega_{max}}} \right), \quad (4)$$

где  $m$  — масса электрона. Видимая ширина края измеренного спектра определяется, в основном, двумя факторами: энергетическим разрешением детектора и энергетическим разбросом электронов в пучке. Таким образом, измерив энергетический спектр

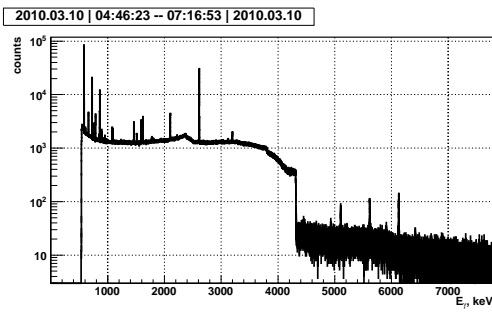


Рис. 4: Спектр комptonовских гамма-квантов, измеренный HPGe-детектором на ВЭПП-4М в 2010 году. Энергия электронного пучка 1553.5 МэВ. Время набора спектра – 2.5 часа.

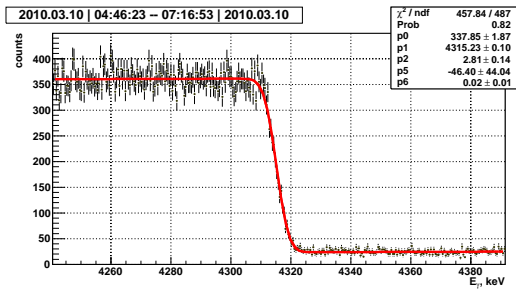


Рис. 5: Фрагмент измеренного энергетического спектра (вблизи  $\omega_{max}$ ), линия и таблица параметров – результаты подгонки. Измеренная энергия пучка равна  $1553.466 \pm 0.018$  МэВ. Энергетический разброс –  $505 \pm 25$  кэВ.

и определив положение края, можно получить энергию электронного пучка. Энергетический разброс пучка определяется по измеренной ширине края спектра и величине энергетического разрешения детектора.

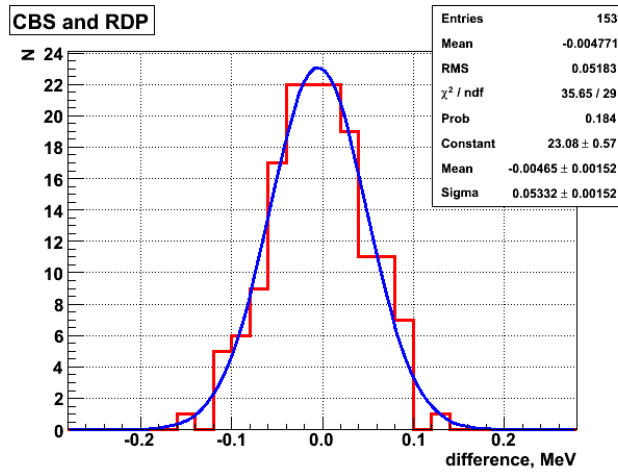


Рис. 6: Гистограмма разности значений энергии, измеренных методом комptonовского рассеяния и резонансной деполяризации при энергии пучка 1.7–1.9 ГэВ.  $\sigma = 53.3 \pm 1.5$  кэВ.

В качестве источника монохроматического излучения был выбран инфракрасный  $\text{CO}_2$  лазер *COHERENT GEM Select 50* с энергией фотона  $\omega_0 = 0.117065223$  эВ. При изменении энергии электронного пучка от 1.5 ГэВ до 2 ГэВ величина  $\omega_{max}$  лежит в диапазоне 4–7 МэВ. Энергетический спектр рассеянных фотонов (см. рис. 5) измеряется коаксиальным детектором из сверх-чистого германия с активным объёмом  $120 \text{ cm}^3$  и эффективностью полного поглощения около 5% для гамма-квантов с энергией 6 МэВ. За одно измерение статистическая точность измерения энергии электронного пучка составляет  $\delta\varepsilon/\varepsilon \simeq 3 \cdot 10^{-5}$ , а точность определения энергетического разброса – около 12%. Для абсолютной калибровки энергетической шкалы германиевого детектора и его энергетического разрешения одновременно с набором комptonовского спектра ведётся набор эталонных линий излучения гамма-активных изотопов с энергией от 0.6 до 6.13 МэВ. Оценка систематической погрешности метода проводилась путём

сравнения результатов измерений с энергией пучка, измеренной методом резонансной деполяризации. В течение эксперимента по измерению массы тау-лептона было сделано 153 одновременных измерения энергии двумя методами, гистограмма разности измеренных значений показана на рис. 6. Превышение ширины распределения на рис. 6 (50 кэВ) над средней статистической ошибкой измерения (30 кэВ) позволяет сделать оценку систематической погрешности метода на уровне 40 кэВ, или  $2.5 \cdot 10^{-5}$  от энергии электронного пучка. Основным источником систематической погрешности, вероятнее всего, является нестабильность положения орбиты электронного пучка в зоне взаимодействия с лазерным излучением.

### 3 Магнитная система

Проектирование и производство комплектующих элементов сверхпроводящей (СП) магнитной системы детектора КЕДР было выполнено с участием ОАО КРИОГЕН-МАШ из г. Балашиха Московской области [17]. Магнитная система состоит из основного и двух одинаковых компенсирующих соленоидов (см. таблицу 2), расположенных внутри железного ярма [18].

Таблица 2: Параметры сверхпроводящих соленоидов детектора КЕДР.

Параметр	Центральный соленоид	Компенсирующий соленоид
Магнитное поле (рабочее)	0.6 Тл	2.2 Тл
Магнитное поле (проект)	1.83 Тл	6.55 Тл
Соотношение $I/I_c$	0.56	0.45—0.46
Ток (проект)	8 кА	292 А
Запасённая энергия (проект)	39 МДж	124 кДж
Количество слоёв обмотки	1+1(обратные витки)	17
Количество витков	568 + 8(обратных)	7726
Индуктивность	1.22 Гн	2.9 Гн
Толщина обмотки	4.5 мм	15.7 мм
Длина обмотки	2.84 м	0.433 м
Длина криостата	3.16 м	0.560 м
Наружный диаметр криостата	3.57 м	0.246 м
Внутренний диаметр криостата	3.12 м	0.120 м
Внутренний диаметр СП обмотки	3.24 м	0.146 м
Полная масса катушки с криостатом	12000 кг	90 кг
Масса гелиевого сосуда с обмоткой	7000 кг	-
Радиационная толщина катушки	0.95 $X_0$	-
Е/М (проект)	7.8 МДж/кг	-
Индуктивность обратных витков	$0.28 \cdot 10^{-3}$ Гн	-
Сопротивление шунтирования витков	$6 \cdot 10^{-6}$ Ом	-

#### 3.1 Основной соленоид

Постоянное однородное магнитное поле величиной 0.6 Тл вдоль траектории пучков в детекторе создаёт основной СП соленоид длиной 2.84 м, внутренним диаметром 3.24 м

и толщиной 4.5 мм (14 мм — с учётом бандажа).

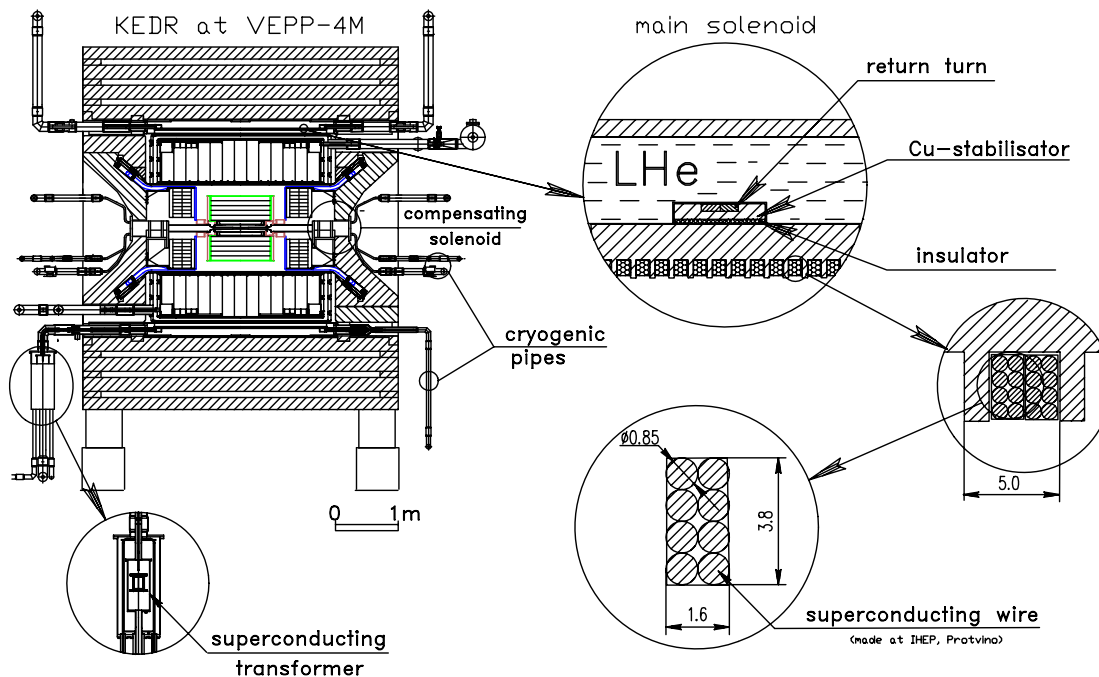


Рис. 7: Конструкция сверхпроводящего соленоида.

СП обмотка основного соленоида (рис. 7) состоит из 568 витков СП кабеля прямоугольного сечения (1.6 мм×3.8 мм). Он сформован из восьми свитых и спаянных по всей длине (в конфигурации 2 × 4) проводов NbTi/Cu диаметром 0.85 мм с соотношением сверхпроводник:медь 2:3, содержащих по 2970 NbTi жил. Витки попарно уложены в спиральную канавку размером 3.5 мм×4.5 мм, проточенную с шагом 5 мм снаружи внутренней стенки кольцеобразного гелиевого сосуда из нержавеющей стали, и пропаяны припоем ПОС-61.

Металлический корпус гелиевого сосуда является бандажом для обмотки и, в то же время, обеспечивает распределённое электрическое шунтирование каждого её витка, защищая при нарушении сверхпроводимости от разрушения запасённой энергией магнитного поля, которая выделяется в виде тепла.

Обратные витки основного СП соленоида впаяны в массивную медную шину, закреплённую на изоляторах внутри гелиевого сосуда. Эти витки охлаждаются непосредственно жидким гелием, тогда как витки основной обмотки — через 10-мм стенку гелиевого сосуда из нержавеющей стали.

Гелиевый сосуд имеет экранно-вакуумную теплоизоляцию и теплозащитный экран из алюминиевой фольги с припаянной к ней медной трубкой для циркуляции жидкого азота.

### 3.2 Источник питания основного соленоида

Источник питания основного СП соленоида состоит из СП трансформатора и двух СП термоуправляемых ключей, образующих двухполупериодный СП выпрямитель, управляемый от ЭВМ. Преимущество такой конструкции — компактность, невысокая стоимость, способность обеспечивать ввод, вывод и стабилизацию магнитного поля с относительной точностью  $10^{-4}$ .

Первоначальная конструкция СП ключей была переделана на основе СП провода с лучшим значением критического тока. Это устранило конструктивное ограничение на установление в детекторе магнитного поля выше стабильного рабочего значения 0.6 Тл (максимально достигнутое поле — 0.7 Тл). До трёх суток сократилось общее время подъёма поля до указанного рабочего значения.

По завершении текущего этапа физической программы планируется увеличение рабочего значения магнитного поля в детекторе КЕДР до 1 Тл, что позволит без потерь в эффективности перейти к экспериментам на более высокой энергии пучков ускорителя ВЭПП-4М.

### 3.3 Компенсирующие соленоиды

Назначение компенсирующих соленоидов — зануление интеграла магнитного поля вдоль траектории движения пучков в детекторе.

Магниты расположены в центрах полюсов ярма. Вакуумные теплоизолирующие полости их криостатов сообщаются с вакуумной камерой ВЭПП-4М, обеспечивая её дополнительную криосорбционную откачку на части поверхности гелиевых сосудов.

Обмотка компенсирующего соленоида состоит из двух одинаковых многослойных катушек, соединённых последовательно. Для намотки катушек использованы NbTi/Cu провода диаметром 1.0 мм (внутренние слои) и 0.7 мм (внешние слои).

Ввод постоянного тока осуществляется через охлаждаемые парами гелия резистивные токовводы трубчатой конструкции, рассчитанные на ток до 300 А. (Аналогичные токовводы используются и для питания основного СП магнита.)

Компенсирующие соленоиды успешно испытаны до проектного значения 6.55 Тл. В настоящее время они эксплуатируются с рабочим током 98 А, что соответствует полю основного соленоида 0.6 Тл.

### 3.4 Ярмо

Железное ярмо весом 700 тонн замыкает магнитный поток основного соленоида, обеспечивая однородность магнитного поля внутри детектора.

Ярмо состоит из восьми секций, окружающих детектор в форме правильной восьмигранной призмы, а также двух цилиндрических полюсов. Секция представляет собою набор параллельных железных плит с воздушными промежутками между ними, предназначенными для размещения мюонных камер.

Таким образом, ярмо служит поддерживающим каркасом для всех компонент детектора и выполняет функцию поглощающего вещества для мюонных камер.

### 3.5 Контроль магнитного поля

Измерение магнитного поля в детекторе с точностью  $10^{-5}$  осуществляется двумя датчиками ЯМР, расположенными справа и слева от места встречи, вблизи вакуумной камеры ВЭПП-4М (рис. 8).

Показания этих датчиков используются для стабилизации магнитного поля в детекторе при проведении эксперимента.

Для измерения магнитного поля в области дрейфовой камеры детектора, вблизи неё расположены 12 датчиков Холла, которые измеряют радиальную и продольную компоненты поля с точностью  $5 \cdot 10^{-4}$  (рис. 8).

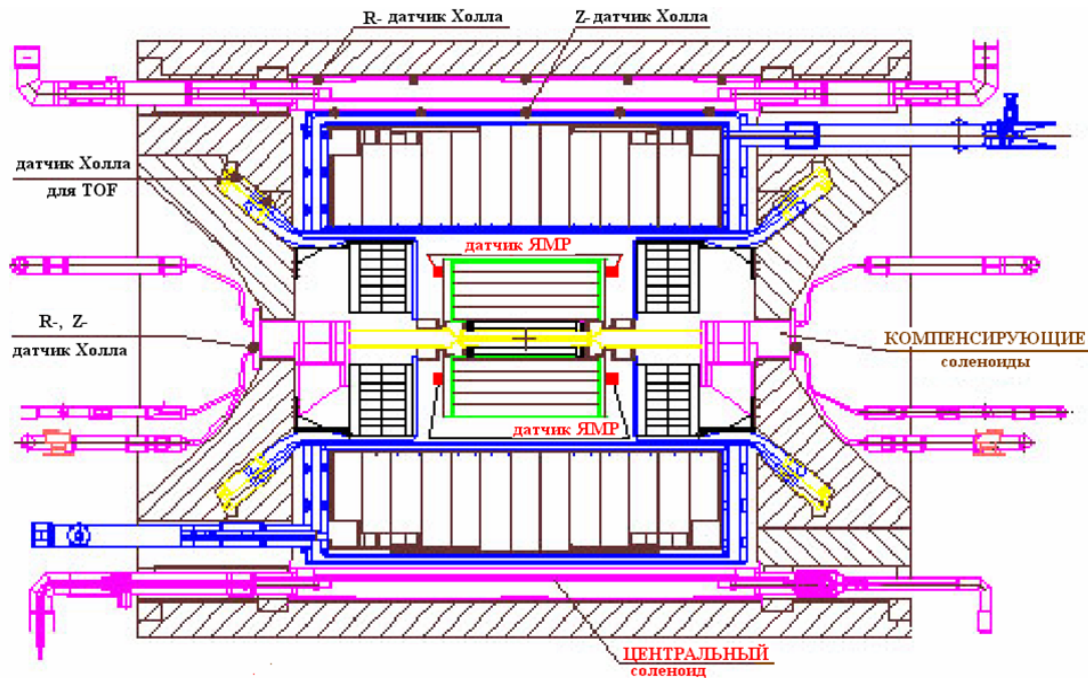


Рис. 8: Расположение датчиков ЯМР и Холла для измерения магнитного поля в детекторе.

10 датчиков Холла с точностью  $10^{-3}$  отслеживают радиальную и продольную компоненты поля в непосредственной близости от основного соленоида, располагаясь над и под верхней стенкой (снаружи) его криостата.

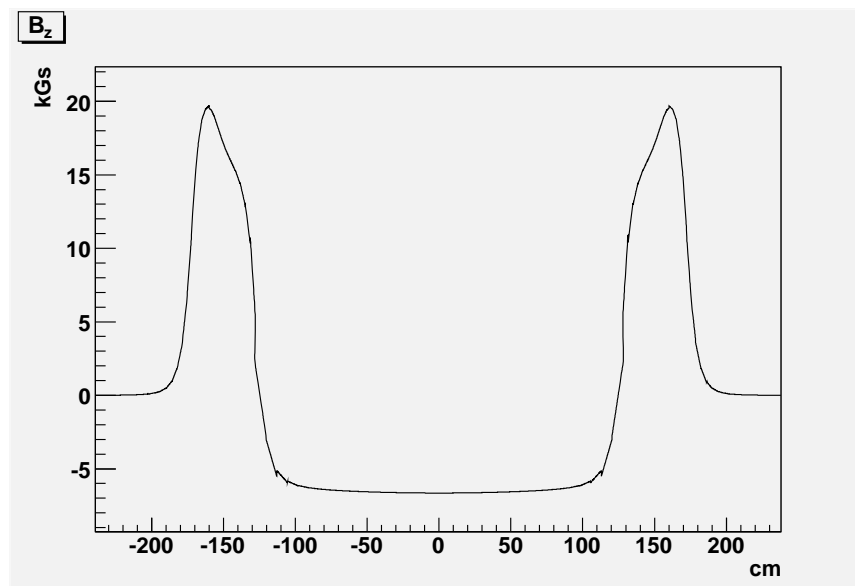


Рис. 9:  $z$ -компонента магнитного поля на продольной оси детектора (расчёт).

На рис. 9,10 показаны результаты расчёта  $z$ -компоненты поля (расчёт выполнен с помощью программы Mermaid3d [19], сила тока в компенсирующих соленоидах — 105 А).



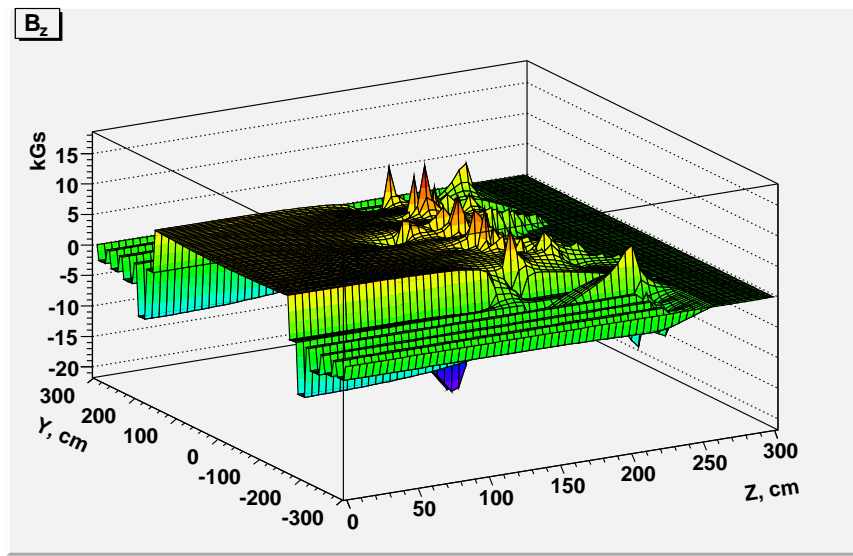


Рис. 10: Карта  $z$ -компоненты магнитного поля в плоскости продольного разреза детектора (расчёт).

## 4 Криогенная система

Криогенными компонентами детектора КЕДР являются центральный электромагнитный калориметр, заполненный 27 тоннами жидкого криптона, и СП соленоиды магнитной системы, охлаждаемые жидким гелием.

Рабочая температура жидкокриптонового калориметра находится вблизи 119.5 К, а СП магнитной системы — 4.5 К. Обе системы работают при нормальном давлении и в бездренажном режиме.

В качестве вспомогательного хладагента используется жидкий азот (рабочая температура 85 К), запас которого (до 101000 кг) хранится в двух танках и выдаётся под избыточным давлением до 0.5 МПа.

Жидкий азот в основном используется для охлаждения вакуумных экранов криостатов и азотных теплообменников.

Газообразный азот, прогретый до температуры окружающей среды, используется для обдува снаружи дрейфовой камеры, что существенно улучшает её характеристики.

Один из этих полностью взаимозаменяемых азотных танков постоянно используется в роли действующего накопителя-раздатчика жидкого и газообразного азота, тогда как второй служит для накопления жидкого азота из транспортных сосудов и последующего его вытеснения в действующий танк по линии выдачи жидкого азота. Такая методика позволяет устранить попадание кислорода из атмосферы в газовый объём действующего танка и, следовательно, уберечь от проблем с чистотой азота для дрейфовой камеры. Второе её преимущество — возможность непрерывной выдачи жидкого и газообразного азота потребителям в любом из режимов в азотной системе.

Для накопления, хранения и выдачи жидкого криптона для калориметра оборудованы пять одинаковых хранилищ — три верхних и два нижних (по отношению к калориметру). Они представляют собою криогенные сосуды с рабочим давлением 0.6 МПа и объёмом 8 м<sup>3</sup> (заполнение жидкостью до 6 м<sup>3</sup>) каждый. Все хранилища оборудованы азотными теплообменниками для конденсации на них газообразного криптона и испарителями для самонадува и вытеснения жидкого криптона в раздаточный

коллектор.

Кольцеобразный цилиндрический криптоновый сосуд калориметра изготовлен из алюминиевого сплава и рассчитан на рабочее избыточное давление не выше 0.03 МПа. Поэтому жидкий криптон подаётся в него из верхних хранилищ и эвакуируется в нижние — самотёком.

Криптоновая система оборудована регенерируемым блоком очистки газообразного криптона от электроотрицательных примесей (кислорода) [20]. Требуемая чистота — 1 ppm ( $10^{-6}$ ).

Термостатирование калориметра обеспечивается периодической подачей жидкого азота в теплообменный змеевик, приваренный на поверхности алюминиевого корпуса криптонового сосуда калориметра.

Рабочее абсолютное давление в калориметре поддерживается в диапазоне 0.105 — 0.120 МПа, при этом температура меняется в интервале 118.5 — 120.5 К.

Для термостатирования СП магнитов применяется сателлитный гелиевый рефрижератор холодопроизводительностью 1200 Вт на температурном уровне 4.5 К, работающий по циклу среднего давления (2.5 МПа) с избыточным обратным потоком и подпиткой жидким гелием от стороннего источника в количестве 4 — 10 % от величины циркуляционного расхода. Гелиевые компрессор рефрижератора и газгольдеры установлены на криогенной станции, удалённой от детектора на 600 м.

Запас жидкого гелия до 2 м<sup>3</sup> для СП магнитов накапливается в специальном гелиевом криостате за счёт жидкого гелия, вырабатываемого ожижителями на криогенной станции и доставляемого автотранспортом в дьюарах. Над уровнем жидкого гелия располагаются охлаждаемые его парами токовводы — по два в каждом из каналов, ведущих из этого криостата к СП магнитам. По каналам жидкий гелий движется самотёком. Для гарантированного охлаждения токовводов пары гелия прокачиваются через них принудительно — за счёт откачки эжекторным насосом с индивидуальными регулирующими вентилями вверх каждого из каналов.

Из криостатов СП магнитов холодные пары гелия направляются в рефрижератор, где их энтальпия используется для охлаждения входного (прямого) потока газообразного гелия с массовым расходом 80 — 100 кг/час. Обратный поток гелия при давлении не более 0.07 МПа и температуре выше 0° С (273 К) из рефрижератора поступает в газгольдеры криогенной станции, проходит через блоки криогенной очистки и посредством компрессора вновь вовлекается в рабочий цикл.

Суммарное суточное потребление стороннего жидкого гелия в системе составляет до 1100 литров при работе рефрижератора в дроссельном режиме. Благодаря использованию поршневого детандера расход понижается до менее 500 литров в сутки.

Криогенные трубопроводы, танки и оригинальные криостаты имеют экранно-вакуумную теплоизоляцию. Защитный вакуум для криптонового калориметра (не хуже  $10^{-3}$  —  $10^{-4}$  Па) обеспечивается непрерывной работой магниторазрядного насоса на уровне  $2 \cdot 10^{-4}$  Па. Для гелиевых объектов вакуум лучше  $7 \cdot 10^{-3}$  Па создаётся с помощью турбомолекулярных насосов и агрегатов.

Управление криогенным обеспечением осуществляется дистанционно, посредством персональной ЭВМ под операционной системой Linux и электроники собственного производства в конструктивах КАМАК и Вишня. В комплексе задействовано более 300 датчиков (давления, расхода, уровня, температуры, координат, положения и др.) и 100 исполнительных устройств различных типов.

## 5 Вершинный детектор

### 5.1 Конструкция

Координатная система детектора КЕДР конструктивно состоит из двух частей — цилиндрической дрейфовой камеры и вершинного детектора (ВД). Вершинный детектор расположен между дрейфовой камерой и вакуумной трубой накопителя и перекрывает телесный угол до  $98\% \times 4\pi$ .

Вершинный детектор [21, 22, 23, 24] состоит из 312 цилиндрических дрейфовых трубок длиной 670 мм и диаметром 10 мм, которые образуют шесть концентрических слоёв, окружающих вакуумную камеру. Трубки нечётных слоёв уложены таким образом, чтобы зазор между ними был минимальным. При этом чётные слои уложены со сдвигом на полшага от нечётных. Это сделано для увеличения эффективности регистрации треков.

Дрейфовая трубка состоит из цилиндрического катода и центральной анодной проволоки, закреплённой в торцевых пробках посредством обжима в пинах. Внутренний объём каждой трубки независимо продувается рабочей газовой смесью. Трубки работают в режиме пропорционального усиления и позволяют измерять расстояние от трека заряженной частицы до центра трубки по времени дрейфа ионизации.

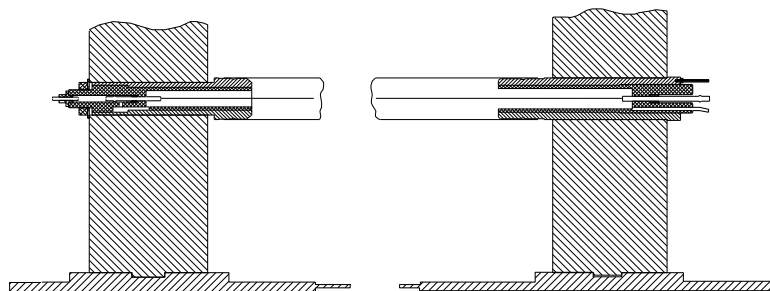


Рис. 11: Конструкция дрейфовой трубки ВД.

Катод трубки изготовлен из однослойного алюминизированного лавсана толщиной 20 мкм с толщиной алюминия 0.1 мкм. Особенностью такой конструкции ВД является малое количество вещества на пути частицы. Благодаря тому, что трубки способны самостоятельно выдерживать избыточное давление, отпадает необходимость в дополнительном герметичном объёме, вносящем дополнительное вещество в детектор. Суммарная толщина вещества ВД составляет около 0.2% радиационной длины ( $X_0$ ), что значительно меньше толщины вещества вакуумной камеры равного 1.5%  $X_0$ .

В процессе создания ВД была разработана технология изготовления однослойных трубок из тонкого лавсана. Трубки изготавливаются из алюминизированной лавсановой плёнки шириной 5 см, которую навивают на оправку по спирали, а затем герметизируют стыки специально разработанным методом ультразвуковой сварки. Трубка сохраняет герметичность при избыточном давлении до 3 атм. Конструкция дрейфовой трубки ВД показана на рис. 11. Лавсановая трубка крепится к пробкам, которые обеспечивают крепление трубки во фланце ВД. В пробку запрессовываются пины для крепления анодной проволоки, а также штуцеры для подвода газа. В качестве анода используется позолоченная проволока из вольфрам-рениевого сплава диаметром 20 мкм.

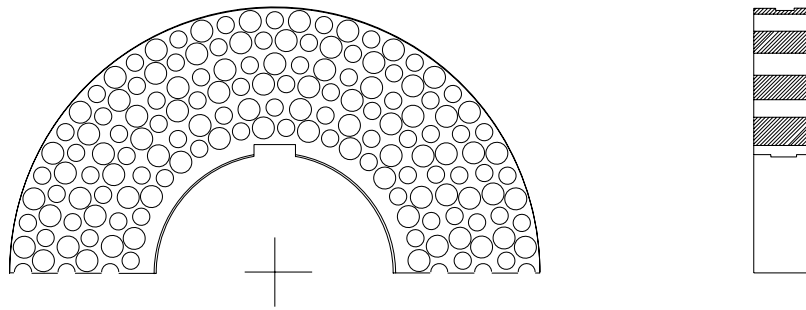


Рис. 12: Фланец вершинного детектора.

Конструктивно ВД выполнен в виде двух разъёмных полуцилиндров. Трубки крепятся во фланцах в форме полуколец, которые базируются на вакуумной камере накопителя (рис. 12). Толщина фланцев равна 28 мм, что обеспечивает достаточную глубину посадочных отверстий для пробок и устойчивость к моменту сил, возникающих при натяжении трубок. Все трубки фиксируются во фланцах независимо, газ подаётся в каждую трубку индивидуально. Конструкция ВД предусматривает возможность индивидуальной замены каждой трубки. Цилиндричность трубок обеспечивается за счёт точной посадки пробок во фланцах и посредством дополнительного продольного натяжения трубок. Подвижная фиксация трубок во фланцах позволяет устанавливать требуемое натяжение трубок. Подача высокого напряжения, съём сигнала с анодной проволоки и заземление также выполнены индивидуально для каждой трубки.

В качестве рабочей газовой смеси в ВД используется аргон с добавлением 30% углекислоты под избыточным давлением около 0.1 атм. Для этой газовой смеси практически во всём объёме трубки скорость дрейфа электронов ионизации находится в области насыщения и слабо зависит от напряжённости электрического поля, температуры и давления. Это устраняет основные источники систематических ошибок в измеряемой координате. Используемая смесь не содержит горючие компоненты, что упрощает газовую систему и облегчает эксплуатацию детектора. Недостатком данной смеси является невозможность достижения пространственного разрешения лучше 100 мкм из-за сильной диффузии.

Для обеспечения устойчивого снабжения ВД газом используется газовая система со смешиванием компонент в потоке. Часть газовой системы, обеспечивающая необходимую концентрацию компонент смеси, состоит из двух магистралей высокого давления (аргоновой и углекислотной), к которым могут быть подключены до трёх 40-литровых баллонов с очищенными компонентами газовой смеси, редукторов, уменьшающих давление до 1–2 атм, контроллеров потока газа фирмы Bronkhorst, задающих постоянный расход компонент смеси на входе в ВД, и смешивающей ёмкости. Газовая смесь подаётся по магистрали на коллекторы, расположенные на внешней поверхности детектора КЕДР. Каждая дрейфовая трубка соединяется с коллектором фторопластовой трубкой длиной четыре метра и внутренним диаметром 1 мм. Такая конструкция позволяет в случае необходимости отключать неисправные трубки от газового потока без разборки детектора.

С выхода ВД газовый поток поступает на измеритель потока газа и далее на стабилизатор абсолютного давления, поддерживающий постоянное давление газа в ВД. С выхода стабилизатора давления газовая смесь выпускается в атмосферу через мас-

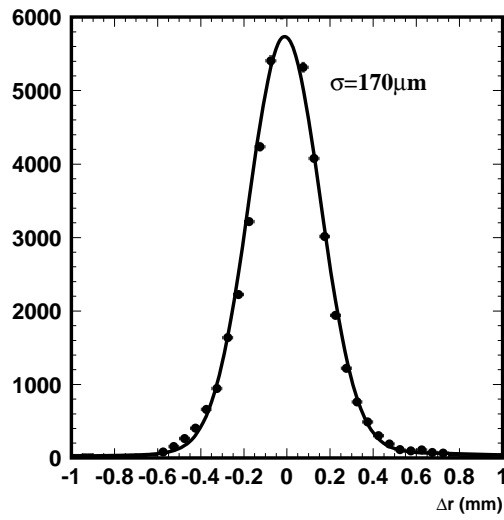


Рис. 13: Пространственное разрешение ВД на космических частицах.  $\sigma = 170$  мкм.

ляный затвор для исключения попадания кислорода в детектор. Кроме того, части входного и выходного потока поступают на мониторы газовой смеси для контроля коэффициента газового усиления и качества смеси. Мониторы представляют собой трубки, облучаемые  $\gamma$ -квантами от изотопа  $^{55}\text{Fe}$ , аналогичные трубкам, используемым в ВД. По амплитудному спектру сигнала с мониторов измеряется коэффициент газового усиления и контролируется качество газовой смеси. Все параметры газовой системы измеряются и контролируются с помощью компьютера.

## 5.2 Пространственное разрешение

Для реконструкции трека с использованием информации с ВД в первую очередь необходимо определить расстояние дрейфа по измеренному времени. Для этого необходимо знать зависимость расстояния дрейфа от времени дрейфа  $R(t)$ , а также pedestal  $t_0$  для каждого канала, соответствующие нулевому расстоянию дрейфа. Разработана процедура калибровки, которая может производиться как непосредственно по набираемым данным с накопителя ВЭПП-4М, так и по специально записываемой статистике космических мюонов. В первом приближении временные константы  $t_0$  могут быть определены по положению края спектра времён с каждого канала, а зависимость  $R(t)$  — с помощью интегрирования временного спектра по всем каналам. Однако, в реальной фоновой ситуации при работе на ускорителе и наводках между каналами использование этой процедуры приводит к ухудшению пространственного разрешения. Для более точной калибровки временные константы и дрейфовая кривая уточняются с помощью реконструкции прямолинейных треков космических мюонов.

При работе с космическими треками на ВД было получено пространственное разрешение около 170 мкм (рис. 13) при коэффициенте газового усиления около  $10^5$ . При повышении газового усиления пространственное разрешение улучшается, но при этом растёт число ложных срабатываний, вызванных наводками между каналами электроники. Эффективность срабатывания одиночной трубки, измеренная с космическими частицами, превышает 99%.

При работе в составе детектора информация с ВД обрабатывается совместно с данными дрейфовой камеры для восстановления треков заряженных частиц. Кроме

того, срабатывание трубочек ВД используется для формирования решения вторичного триггера, что существенно подавляет фон.

### 5.3 Электроника

Система считывания данных с ВД состоит из: камерной электроники; формирующей электроники, выполненной в стандарте ВИШНЯ; оцифровывающей части, выполненной в стандарте КЛЮКВА; схем управления и подачи высокого напряжения, выполненных в стандарте КАМАК [25]. Каждая анодная проволока подключается к предварительному усилителю (ПУ), установленному непосредственно на камере. Конструктивно предусилители объединены в блоки по 8 каналов. Каждый блок предусилителей соединён кабелем длиной 12 метров с усилителем-формирователем (УФО). К одному блоку УФО подключается два блока предусилителей. Блок УФО состоит из усилителя и подключённого к его выходу дискриминатора, формирующего логический сигнал. Далее сигнал поступает на оцифровывающую электронику, которая измеряет время между срабатыванием УФО и задержанным сигналом триггера.

## 6 Дрейфовая камера

Основные требования к дрейфовой камере (ДК) обусловлены физическими задачами, для решения которых создавался детектор КЕДР [26, 27, 28]. Эти требования включают:

- хорошее импульсное разрешение в проектном магнитном поле напряжённостью 1.8 Тл при малой измерительной базе ( $L=370$  мм);
- регистрация и измерение импульса частиц в большом телесном угле;
- хорошее разделение частиц по измерению ионизационных потерь в камере;
- малое количество вещества перед калориметром;
- минимальное количество каналов электроники.

### 6.1 Конструкция

Дрейфовая камера детектора КЕДР [29, 30, 31, 32, 33] имеет цилиндрическую форму и занимает пространство, ограниченное двумя цилиндрическими обечайками длиной 1100 мм и двумя торцевыми пластинами (рис.14). Внутренняя обечайка диаметром 250 мм выполнена из углепластика толщиной 1.5 мм для уменьшения многократного рассеяния при совместном измерении импульса по вершинному детектору и дрейфовой камере. Внешняя обечайка диаметром 1070 мм изготовлена из стеклотекстолита толщиной 5 мм. На внутренние поверхности обечаек наклеен фольгированный стеклотекстолит толщиной 0.1 мм, на который подаётся высокое напряжение для выравнивания полей в крайних слоях ДК и уменьшения расстояния между последним слоем ячеек и обечайкой. Количество вещества в ДК приведено в таблице 3.

Проволочки натянуты между двумя торцевыми пластинами из стеклотекстолита толщиной 20 мм. Среднеквадратичное отклонение по обеим координатам не превышает 20 мкм. Суммарное натяжение проволочек, приложенное к торцевым пластинам, равно 3.4 тонны. Максимальный прогиб торцевых пластин под этой нагрузкой равен

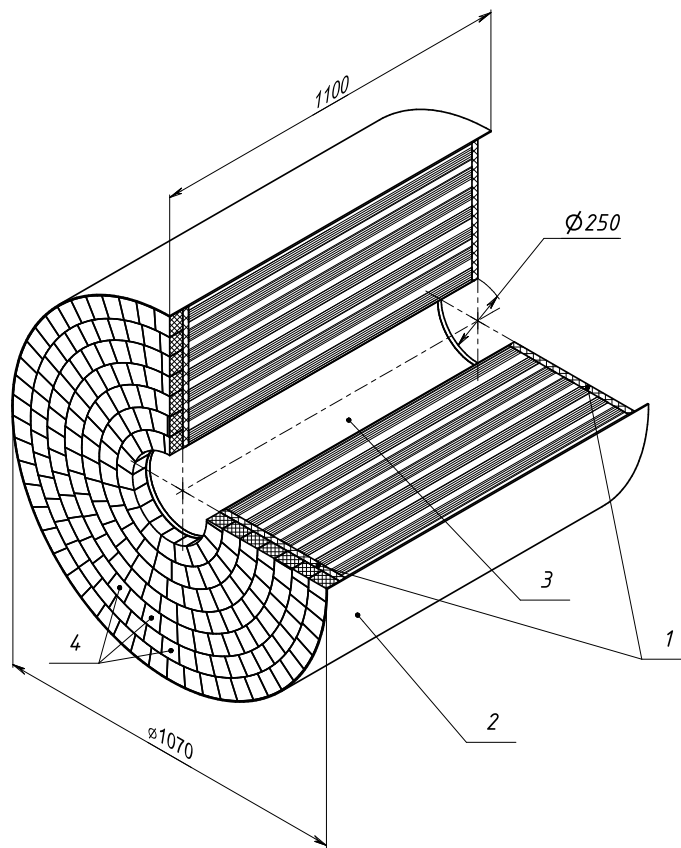


Рис. 14: Схема дрейфовой камеры.

Таблица 3: Количество вещества в ДК.

Элемент ДК	Толщина, мм	Толщина, % $X_0$
Внутренняя обечайка:		
углепластик	1.5	0.54
стеклотекстолит	0.1	0.05
медная фольга	0.02	0.13
Сумма		0.72
Проволочки (среднее)		0.25
Газ(ДМЭ)		0.19
Внешняя обечайка (стеклотекстолит)	5.0	2.5
Всего для $\theta = 90^\circ$		3.7
Торцевые пластины (стеклотекстолит)	20.0	10.0

1.5 мм, удлинение проволочек того же порядка. После завершения натяжения проволочек в ДК было произведено измерение их натяжения, разброс не превысил  $\pm 5\%$  от номинального значения.

## 6.2 Выбор ячейки и рабочего газа

Так как объём, выделенный в детекторе под дрейфовую камеру, ограничен (внешний радиус около 500 мм, внутренний 125 мм), то для получения хорошего импульсного разрешения необходимо использовать ячейку с высоким координатным разрешением и малым радиальным расстоянием между анодными проволочками для увеличения числа измерений координаты.

В ДК КЕДРа используется ячейка, впервые применённая в дрейфовой камере детектора SLD [34], с некоторыми изменениями. Ячейка содержит восемь анодных проволочек, шесть из которых — чувствительные (рис.15). Крайние (нерабочие анодные

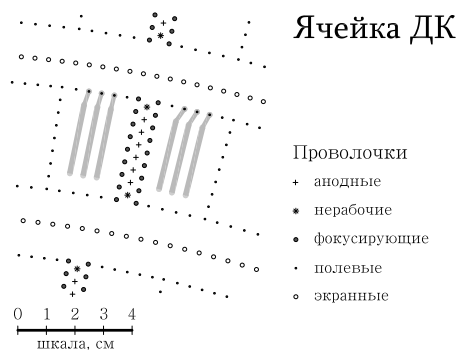


Рис. 15: Ячейка дрейфовой камеры.

проволочки) служат для выравнивания полей в ячейке. Радиальное расстояние меж-

Таблица 4: Параметры ячейки.

Параметр	Значение
Число чувствительных анодных проволочек	6
Диаметр проволочек:	
анодные (W/Au)	28 мкм
полевые и фокусирующие (Ti/Au)	150 мкм
экранные (Ti/Au)	70 мкм
Натяжение проволочек:	
анодные и экранные	100 г
полевые и фокусирующие	250 г
Напряженность поля на поверхности проволочек:	
анодные	360 кВ/см
фокусирующие	8 кВ/см
полевые	15-52 кВ/см
Максимальное напряжение на полевых проволочках	7.5 кВ
Напряженность поля в дрейфовом промежутке	1.6 кВ/см
Скорость дрейфа:	4.6 мкм/нс
Рабочий газ	ДМЭ (1.06 атм)

ду анодными проволочками равно 4.5 мм. Анодные проволочки диаметром 28 мкм изготовлены из позолоченного вольфрама и имеют натяжение 100 г. Коэффициент



газового усиления определяется потенциалом на фокусирующих проволочках, расположенных на расстоянии  $\pm 3.5$  мм от анодных. Распределение потенциалов на полевых проволочках создаёт однородное поле в дрейфовом промежутке равное 1.6 кВ/см. Полевые проволочки расположены с шагом около 4.5 мм. Угол Лоренца для магнитного поля 1.8 Тл составляет  $3^\circ$ . Радиальный размер ячейки равен 36 мм, максимальное расстояние дрейфа около 30 мм. В качестве рабочего газа был выбран чистый диметиловый эфир (ДМЭ,  $C_2H_6O$ ). В ДМЭ при напряжённости поля 2.0 кВ/см достигается минимум диффузии, при этом скорость дрейфа равна 6 мкм/нс. Во время эксперимента напряжённость поля составляла 1.6 кВ/см, скорость дрейфа 4.6 мкм/нс. Основные параметры ячейки приведены в таблице 4.

Проволочная структура дрейфовой камеры содержит семь концентрических цилиндрических суперслоёв ячеек: четыре аксиальных суперслоя (нечётные) и три стерео суперслоя (чётные). В стерео суперслоях проволочки наклонены под углом  $\pm 100$  мрад к оси камеры. Длина проволочек в ДК равна 970 мм. Камера содержит 1512 анодных проволочек. На треке пересекающем всю дрейфовую камеру производится 42 измерения координаты и ионизационных потерь. Основные параметры ДК приведены в таблице 5.

Таблица 5: Параметры дрейфовой камеры.

Параметр	Значение
Внутренний радиус	125 мм
Наружный радиус	535 мм
Длина	1100 мм
Длина проволочек	970 мм
Количество суперслоёв:	
аксиальных	4
стерео	3
всего	7
Стерео угол	$\pm 100$ мрад
Число измерений	42
Число ячеек	252
Число проволочек:	
анодных	1512
полевых и фокусирующих	11772
экранных	2748
всего	16032

### 6.3 Импульсное разрешение

Разрешение по импульсу ДК при проектной напряжённости магнитного поля 1.8 Тл при 42 измерениях координаты с точностью 100 мкм и измерительной базе 370 мм равно:

$$(\sigma_{p_\perp}/p_\perp)^2 = (0.003)^2 + (0.0056 \cdot p[\text{ГэВ}])^2. \quad (5)$$

В расчёте многократного рассеяния учитывалось вещество проволочек и рабочего газа. При вычислении вклада многократного рассеяния на проволочках использовалась

траектория с изломом в точке попадания частицы в проволочку, что понижает величину этого вклада в импульсное разрешение в 1.6 раза.

При измерении импульса по ДК и вершинному детектору измерительная база увеличивается до 450 мм при 48 измерениях координаты. Импульсное разрешение в этом случае равно:

$$(\sigma_{p_{\perp}}/p_{\perp})^2 = (0.003)^2 + (0.0033 \cdot p[\text{ГэВ}])^2. \quad (6)$$

В настоящее время на дрейфовой камере получено пространственное разрешение  $\sigma_x = 115$  мкм в аксиальных и  $\sigma_x = 220$  мкм в стерео слоях. Импульсное разрешение при рабочей напряжённости магнитного поля 0.6 Тл составляет:

$$(\sigma_{p_{\perp}}/p_{\perp})^2 = (0.03)^2 + (0.02 \cdot p[\text{ГэВ}])^2. \quad (7)$$

## 6.4 Идентификация частиц

Для идентификации заряженных частиц в дрейфовой камере используется значение  $dE/dx$  на треке, вычисленное суммированием потерь по хитам с помощью модифицированного метода усечённого среднего, основанного на зависимости разрешения от плотности ионизации. Данный подход позволяет быстро и с хорошей точностью про-

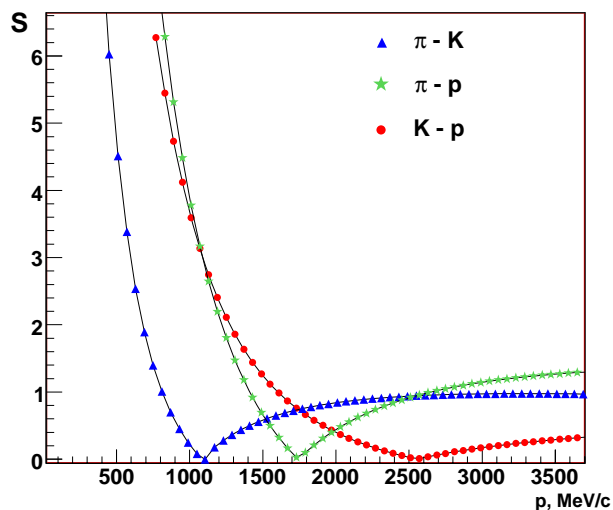


Рис. 16: Зависимость коэффициента разделения S (в единицах  $\sigma$ ) от импульса.

вести вычисления разделения частиц в ДК по измерению ионизационных потерь. Степень разделения частиц в единицах стандартных отклонений описывается формулой:

$$S = \frac{|dE_1 - dE_2|}{\sigma}, \quad (8)$$

где

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad (9)$$

здесь  $dE_{1,2}, \sigma_{1,2}$  — наиболее вероятные ионизационные потери энергии и стандартные отклонения потерь энергии, соответственно, для двух частиц, вычисленные методом усечённого среднего. Достигнутое в эксперименте энергетическое разрешение дрейфовой камеры составило 8.5% для минимально ионизирующих частиц при нормальном

падении, что обеспечивает  $\pi/K$  разделение до импульса 670 МэВ/с и  $K/p$  разделение до 1200 МэВ/с на уровне  $2\sigma$  (рис.16).

## 6.5 Электроника

При проектировании электроники ДК [35] был выбран метод параллельного съёма информации. Электроника, расположенная непосредственно на камере, состоит из линейного предусилителя, разработанного и изготовленного в ИЯФ. Основные параметры предусилителя представлены в таблице 6. В схеме предусмотрена возможность калибровки коэффициента усиления.

Таблица 6: Параметры предусилителя.

Параметр	Значение
Входное сопротивление, Ом	75
Крутизна преобразования, мВ/мкА	3.5
Полоса пропускания, МГц	20
Потребляемая мощность, мВт	92
Парафазный выход	+

Регистрирующая электроника состоит из плат ТАМ, выполненных в стандарте КЛЮКВА и предназначенных для измерения времени дрейфа и амплитуды сигнала. Плата ТАМ позволяет производить эти измерения для четырёх частиц в одной ячейке ДК.

Для организации вторичного триггера в плате предусмотрено считывание информации о срабатывании проволочек (ДА-НЕТ) в интерфейс вторичного триггера (ИВТ). Эта информация собирается во входных регистрах коммутатора в течение времени дрейфа электронов в ячейке ДК.

## 6.6 Высоковольтное питание

Высокое напряжение на камеру подаётся от двух источников, выполненных в стандарте КАМАК и произведённых в ИЯФ. Один источник номиналом  $-2.77$  кВ подаёт напряжение на фокусирующие проволочки, имеющие одинаковый потенциал во всех суперслоях. Другой источник подаёт напряжение  $-7.5$  кВ на полевые проволочки. Имеется возможность измерения потребляемого тока в каждом канале с точностью 5%. При необходимости возможно подключение отдельных каналов на дополнительные источники.

Непосредственно на камере располагаются фильтры и высоковольтные делители. Для повышения надёжности каждый суперслой по высокому напряжению разбит на три части, напряжение на которые вводится в детектор отдельно.

## 6.7 Газовая система и система измерения температуры

Скорость дрейфа электронов в ДМЭ линейно зависит от плотности газа и напряжённости электрического поля. Изменения параметров газа  $\Delta T = 0.3^\circ\text{C}$ ,  $\Delta p/p = 10^{-3}$ ,  $\Delta E/E = 10^{-3}$  в нашем случае дают вклад в ошибку 10 мкм для одного сантиметра

дрейфа. Так как изменения температуры много больше приведённых значений, в газовой системе ДК (рис.14) предусмотрена возможность стабилизации плотности газа в камере. Стабилизация плотности газа в ДК осуществляется посредством компенсации изменения плотности из-за температурных колебаний соответствующим изменением давления газа. В настоящее время система работает в режиме стабилизации давления.

Внутренний объём внешней трубки трубопровода, газового пульта и пространство между торцевыми пластинами и наружными крышками ДК продувается азотом для устранения возможности накопления газа и появления взрывоопасной концентрации при возникновении утечки ДМЭ из газовой системы. Использование азота позволяет уменьшить натекание кислорода в объём ДК и увеличивает длину поглощения электронов.

Система измерения температуры содержит 32 датчика немецкой фирмы Sensikon. Термодатчики были прокальброваны с точность лучше  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

## 7 Черенковские счётчики АШИФ

Работы по созданию аэрогелевых черенковских счётчиков для детектора КЕДР были начаты в 1986 году. Первый проект был основан на прямом светосборе на ФЭУ [36]. В 1990 году было проведено успешное испытание прототипа [36]. Аналогичная система аэрогелевых черенковских счётчиков была создана для детектора Belle (КЕК, Япония) [37]. Основным недостатком метода прямого светосбора является необходимость использовать большое число ФЭУ с большой площадью фотокатода.

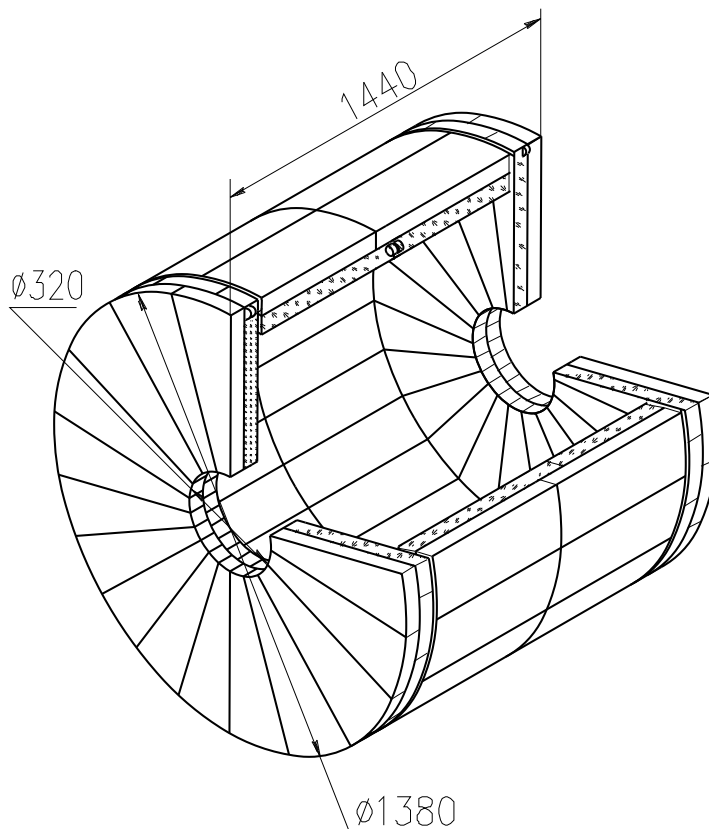


Рис. 17: Схема системы АШИФ детектора КЕДР.

В 1988 году в ИЯФ были начаты работы по созданию счётчиков АШИФ (Аэро-

гель, ШИФтер, Фотоумножитель) со сбором света с помощью переизлучателей спектра (шифтеров). Первые результаты работ были опубликованы в 1992 году [38]. Метод АШИФ позволил существенно уменьшить число ФЭУ и использовать ФЭУ с меньшей площадью, чем в проекте с прямым светосбором [39, 40].

Система АШИФ детектора КЕДР показана на рисунке 17. Она включает в себя 160 счётчиков: 80 баррельных и 80 торцевых. Общий объём аэрогеля — 1000 литров. Показатель преломления аэрогеля — 1.05, что позволяет разделять  $\pi$ - и  $K$ -мезоны в диапазоне импульсов от 0.6 до 1.5 ГэВ/с. Система способна работать в магнитном поле до 1.8 Тл.

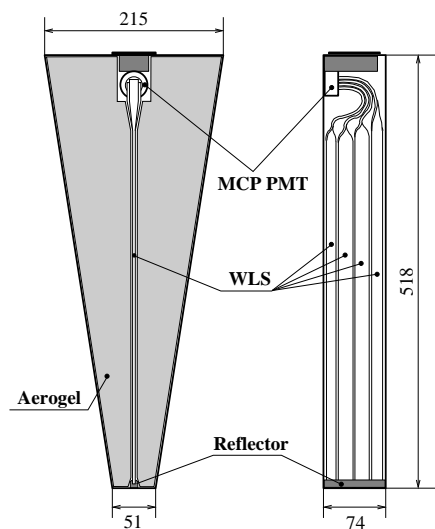


Рис. 18: Торцевой счётчик.

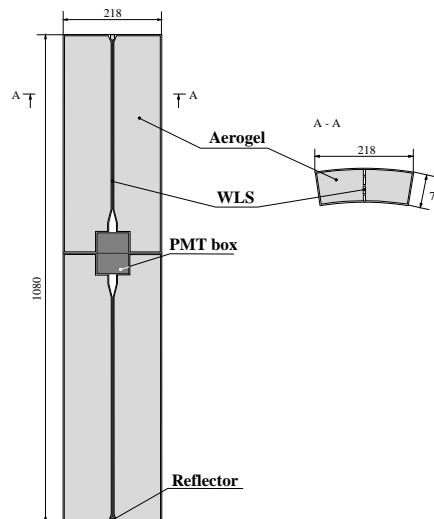


Рис. 19: Два баррельных счётчика в одном корпусе.

На рис. 18 и 19 представлена конструкция торцевого и баррельного счётчиков. Стенки счётчиков покрыты диффузно-отражающим материалом на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), имеющим коэффициент отражения от слоя толщиной в 750 мкм — 97÷98% [41]. Черенковский свет из аэрогеля собирается на шифтер, переизлучается с длиной волны  $\sim 500$  нм, и часть его ( $\sim 50\%$ ) оказывается в условиях полного внутреннего отражения. Эта часть переизлученного света как по световоду распространяется к ФЭУ, соединённому оптическим контактом с одним из концов переизлучателя. На противоположном конце установлен отражатель из ПТФЭ.

Для расчёта коэффициента светосбора в счётчике была создана программа моделирования методом Монте-Карло. Входными параметрами являются измеренные спектральные характеристики аэрогеля, переизлучателя, ФЭУ и ПТФЭ [39].

Важной особенностью всей системы счётчиков является её двухслойная конструкция. Счётчики располагаются таким образом, чтобы частица с импульсом выше 0.6 ГэВ/с, летящая из точки взаимодействия пучков, не пролетала одновременно через шифтеры счётчиков в двух слоях. Вероятность частице с импульсом 0.6 ГэВ/с попасть в шифтер в одном слое равна 10%, для импульса 1.5 ГэВ/с — 5%. Это значит, что для большей части частиц для идентификации можно будет использовать информацию с двух слоёв, что значительно улучшает качество идентификации.

Количество вещества в двух слоях счётчиков при перпендикулярном пролёте составляет 24%  $X_0$ .

## 7.1 Аэрогель

С 1986 года в г. Новосибирске ведутся совместные работы по производству аэрогеля Институтом катализа им. Г.К.Борескова СО РАН и ИЯФ. Освоено производство аэрогелей с показателем преломления  $n = 1.008 \div 1.13$  [42]. По оптическим параметрам производимый в Новосибирске аэрогель является одним из лучших в мире. Для аэрогеля, используемого в детекторе КЕДР, данные по длине поглощения приведены на рис. 20.

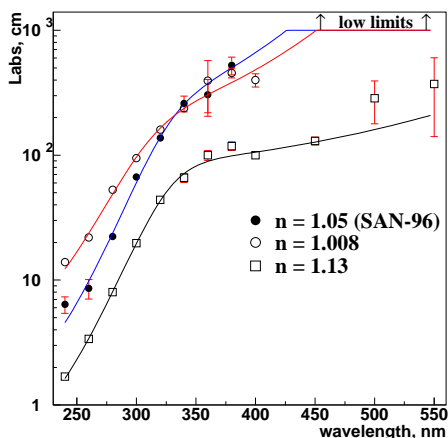


Рис. 20: Измеренная зависимость длины поглощения в аэрогеле от длины волны света для разных аэрогелей.

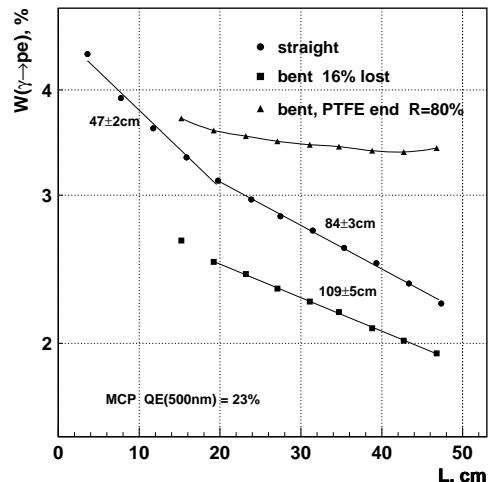


Рис. 21: Измеренная вероятность преобразования фотона в фотоэлектрон ( $W(\gamma \rightarrow pe)$ ) шифтера в зависимости от расстояния до фотоприемника в разных стадиях производства и длина ослабления (число рядом с кривой).

Аэрогель обладает способностью абсорбировать воду из окружающей среды. Большое количество поглощенной воды приводит к механическому разрушению аэрогеля, поэтому все счётчики при производстве герметизируются.

## 7.2 Переизлучатели спектра

Разработка переизлучателей производилась совместно НИИ Полимеров им. В.А. Каргина (г. Дзержинск) и ИЯФ. Переизлучатель на основе полиметилметакрилата (ПММА) с добавкой ВВQ (benzo(de)benzo(4,5)imidazo(2,1-a)isoquinolin-7-one) (150 мг ВВQ на 1 кг ПММА) производится в виде листов толщиной 3 мм. Резка, полировка, придание необходимой формы и контроль качества шифтеров производятся в ИЯФ. Переизлучатель с ВВQ имеет спектр поглощения от 280 до 450 нм. При толщине 3 мм фотоны из данного диапазона длин волн переизлучаются с вероятностью близкой к 100%. ВВQ переизлучает свет в узкий пик с максимумом на длине волны 500 нм.

На рис. 21 показаны вероятности преобразования фотона в фотоэлектрон в зависимости от расстояния от точки поглощения фотона до фотоприемника и длина ослабления для образца переизлучателя сечением  $3 \times 17 \text{ мм}^2$  на различных стадиях производства [39, 43].

### 7.3 Фотоумножители

В качестве фотонного детектора для системы АШИФ выбран ФЭУ на основе микроканальных пластин (МКП) с мультищелочным фотокатодом. Данные приборы производятся в г. Новосибирске. Мультищелочной фотокатод имеет максимальную квантовую чувствительность в максимуме спектра излучения ВВQ. Другими достоинствами данного прибора являются: малый габарит (высота 17 мм, диаметр 31 мм), коэффициент усиления  $10^6$ , слабая чувствительность к магнитному полю (усиление уменьшается в  $3 \div 5$  раза в поле 1.8 Тл) и низкая стоимость [39, 43, 44, 45].

### 7.4 Электроника

Заряд с анода ФЭУ преобразуется зарядово-чувствительным предусилителем в парафазный сигнал, который выводится из детектора и подается на вход плат оцифровывающей электроники по длинному кабелю ( $\sim 40$  м).

Для оцифровки сигнала была разработана специальная электронная плата А6 в стандарте КЛЮКВА, работающая в режиме pipe-line. Основными элементами схемы являются 10-разрядный АЦП и сдвиговый регистр. АЦП измеряет мгновенное значение напряжения с периодом 50 нс. Сдвиговый регистр служит для сохранения информации на время решения триггера. Для каждого импульса считываются пять значений напряжения, по ним восстанавливаются амплитуда и время прихода импульса. Для контроля за собственными шумами фотоумножителей в схеме есть дискриминатор.

### 7.5 Сборка счётчиков

Перед сборкой счётчиков производятся измерения оптических параметров аэрогеля, квантовой эффективности ФЭУ, коэффициента сбора фотоэлектронов, эффективности переизлучения фотона в фотон для шифтера и вероятности преобразования фотона в фотоэлектрон для комплекта шифтер-ФЭУ.

Все счётчики перед установкой в детектор несколько раз тестируются на космических частицах.

### 7.6 Тестирование счётчика на пучке

В 2000 году было измерено качество  $\pi/K$ -разделения торцевого счётчика АШИФ на вторичных пучках протонного синхротрона в ОИЯИ (г. Дубна) [46]. Неоднородность светосбора была измерена на пучке пионов с импульсом 0.86 ГэВ/с по всей площади счётчика. Неоднородность сигнала составила  $\pm 15\%$ .

На рис. 22 показаны вероятности ложной идентификации каонов и пионов в зависимости от порога на амплитуду сигнала. Для импульса 0.86 ГэВ/с при пороге 0.05 фотоэлектрона коэффициент подавления пионов равен 900 при эффективности регистрации каонов 94% (разделение  $4.7 \sigma$ ). При импульсе 1.2 ГэВ/с коэффициент подавления пионов равен 1300 при эффективности регистрации каонов 90% ( $4.5 \sigma$ ).

Временное разрешение счётчика АШИФ на пионах с импульсом 0.86 ГэВ/с составило  $\sigma_\tau = 2$  нс [40].

### 7.7 Долговременная стабильность счётчиков

Исследование долговременной стабильности было проведено на 20 торцевых счётчиках, собранных в 1999–2000 годах. Счётчики находились внутри детектора с 2000 до

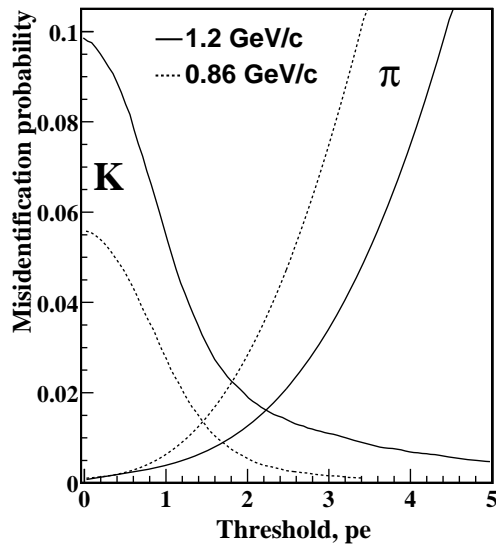


Рис. 22: Измеренная зависимость ложной идентификации пионов и каонов от амплитуды для импульсов  $P=0.86$  ГэВ/с и  $P=1.2$  ГэВ/с.

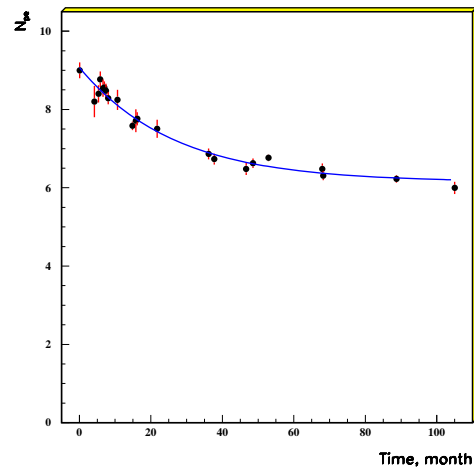


Рис. 23: Амплитуда сигнала (число фотоэлектронов) от космических мюонов как функция времени.

2002 года. Периодически на них подавалось высокое напряжение, измерялись шумы ФЭУ, записывались амплитудные спектры. Все счётчики измерялись на космических частицах до постановки в детектор и после снятия с детектора. Зависимость числа фотоэлектронов от времени для одного из счётчиков представлена на рис. 23. Падение сигнала от времени стабилизировалось на плато на уровне 66% от первоначального, число фотоэлектронов не меняется (в пределах  $\sim 10\%$ ) в течение последних пяти лет.

Было разобрано 13 счётчиков и изучено ухудшение параметров аэрогеля, ФЭУ, переизлучателя и отражателя по отдельности. Среднее уменьшение числа фотоэлектронов в счётчиках за 3 года составило 38%. Ухудшение оптической прозрачности аэрогеля в среднем приводит к уменьшению числа фотоэлектронов на 18%. Падение квантовой эффективности ФЭУ составило 17%. Было установлено что при отжиге ( $\sim 5$  часов при температуре  $500 - 600^\circ\text{C}$ ) оптические свойства аэрогеля восстанавливаются [42].

## 7.8 Статус системы

Один слой системы АШИФ (80 счётчиков) с 2003 года работает в детекторе КЕДР.

Ведется контроль за высоковольтным, низковольтным питанием и за шумами ФЭУ в режиме on-line. Несколько раз в неделю проводятся калибровки электроники, калибровка ФЭУ с помощью встроенного светодиода и калибровка всего счётчика на космических частицах. В течение эксперимента информация о работоспособности системы получается по завершении каждого захода (каждые 1-3ч.). В 2005 г. средняя по торцевым счётчикам эффективность срабатывания для событий  $e^+e^-$ -рассеяния составила 99%, по баррельным счётчикам — 88%. Аналогичная эффективность в 2010 г. составила 97% для торцевых и 78% для баррельных счётчиков.

В ближайшую разборку детектора КЕДР планируется установить второй слой системы (80 счётчиков) и повысить качество счётчиков первого слоя.



## 8 Время-пролётная система

К задачам, которые решает в эксперименте время-пролётная система (ВПС), относятся:

- запуск первичного триггера от заряженных частиц;
- подавление космического фона;
- идентификация частиц по времени пролёта;
- измерение потерь энергии в материале счётчика  $dE/dx$ .

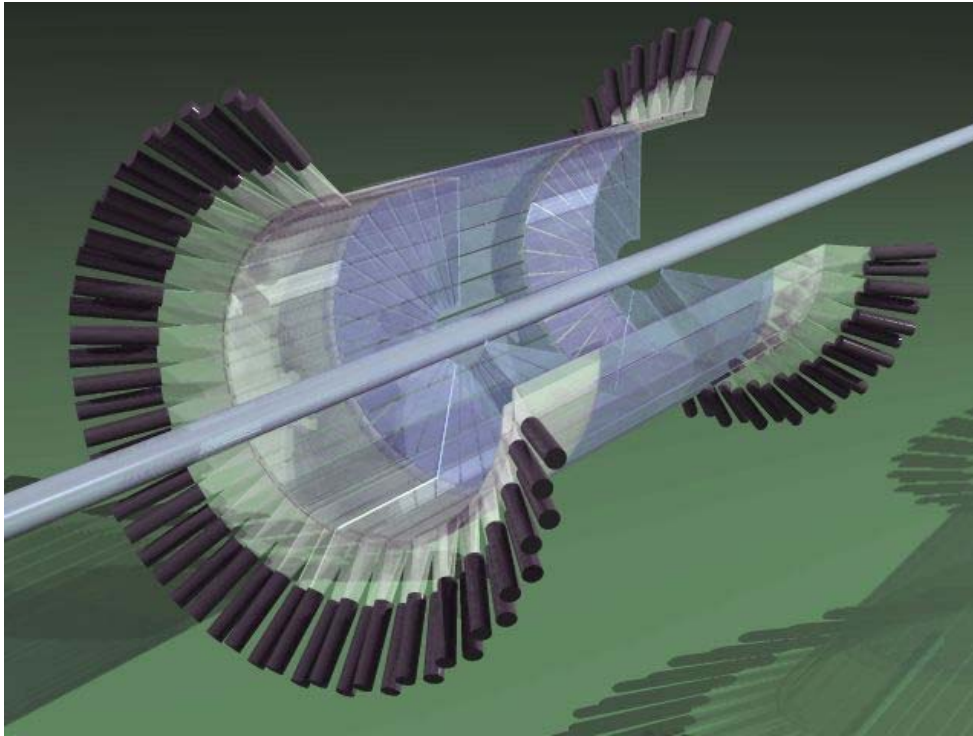


Рис. 24: Рисунок время-пролетной системы.

### 8.1 Конструкция

Время-пролётная система детектора КЕДР (рис. 24) состоит из продольной и торцевой частей.

Продольная часть содержит 32 сцинтилляционных счётчика толщиной 10 мм и длиной чувствительной части 1640 мм, счётчик просматривается двумя фотоумножителями с противоположных сторон. Счётчики уложены вплотную друг к другу параллельно оси пучков на расстоянии 715 мм от центра вакуумной камеры. Перекрываемый телесный угол для продольных счётчиков составляет  $0.71 \times 4\pi$ .

Торцевая часть системы состоит из 64-х сцинтилляционных счётчиков (по 32 на каждом торце), толщиной 20 мм в форме равнобедренной трапеции с высотой 517 мм и основаниями 143 мм и 29 мм. Расстояние от места встречи до плоскости счётчиков — 735 мм, от оси пучков до края счётчика — 150 мм. Счётчики уложены вплотную друг к другу перпендикулярно оси пучков, каждый из них просматривается одним

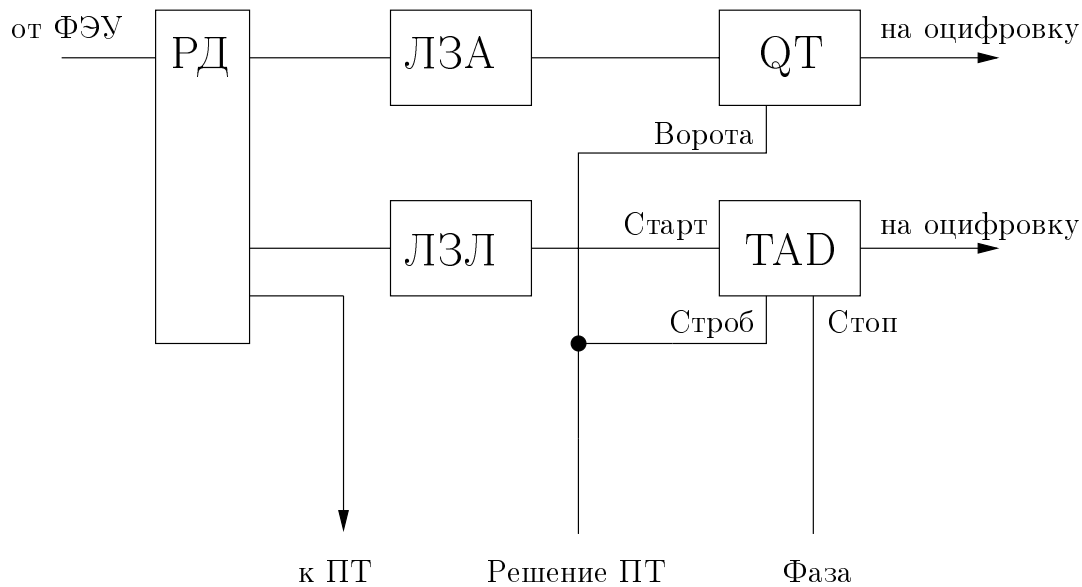


Рис. 25: Канал электроники время-пролётной системы.

фотоумножителем. Телесный угол для торцевой части равен  $0.26 \times 4\pi$ , а для всей системы  $0.97 \times 4\pi$ .

В качестве материала для время-пролётных счётчиков был выбран пластический сцинтиллятор Viscon-408. Для регистрации сцинтилляционного света в системе применяются ФЭУ XR2262. Установленные на световодах ФЭУ помещены внутри магнитных экранов.

## 8.2 Электроника

Каждый ФЭУ имеет два канала оцифровывающей электроники: амплитудный и временной, кроме того сигналы с фотоумножителей поступают на первичный триггер и служат аргументами для формирования запуска для считывания данных детектора.

Канал электроники ВПС включает в себя временную и амплитудную части (рис.25). В амплитудном канале измеряется и оцифровывается амплитуда сигнала с ФЭУ, во временном – время между срабатыванием ФЭУ и сигналом первичного триггера. В состав канала электроники входят разветвитель-дискриминатор (РД), линия задержки аналогового сигнала (ЛЗА), линия задержки логического сигнала (ЛЗЛ), преобразователь заряд-время (QT) и временной экспандер (ТАД). Логические сигналы с выходов QT и ТАД по витой паре поступают на оцифровывающую электронику, выполненную в стандарте КЛЮКВА. Полное количество каналов равно 256: 128 временных и 128 амплитудных каналов.

## 8.3 Физические параметры системы

Для калибровки системы используются экспериментальные события упругого  $e^+e^-$ -рассеяния. Для них разрешение по времени пролёта составляет 300 пс (рис.26) для торцевых счётчиков и 360 пс (рис. 27) для продольных счётчиков. Такое разрешение позволяет разделять каоны и пионы на уровне  $2\sigma$  вплоть до импульсов 600 МэВ/с, а также достаточно эффективно подавлять частицы космического излучения. На

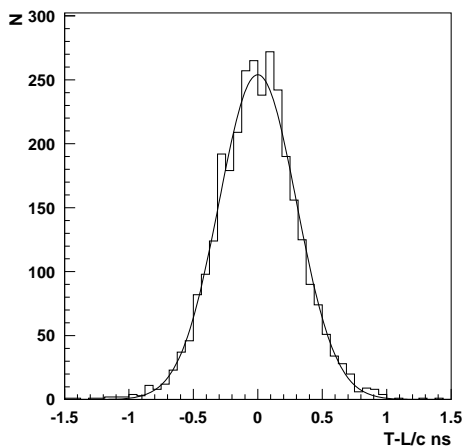


Рис. 26: Экспериментальное разрешение торцевой части время-пролётной системы.  $\sigma_{tof}=300$  пс.

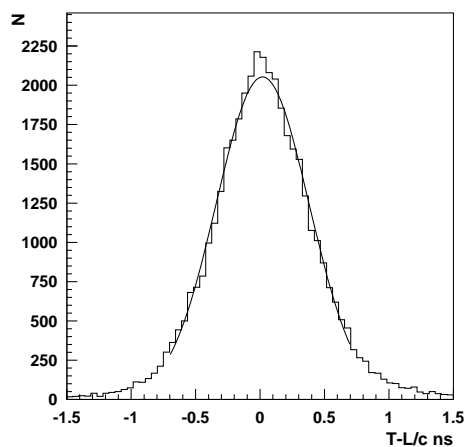


Рис. 27: Экспериментальное разрешение цилиндрической части время-пролётной системы.  $\sigma_{tof}=360$  пс.

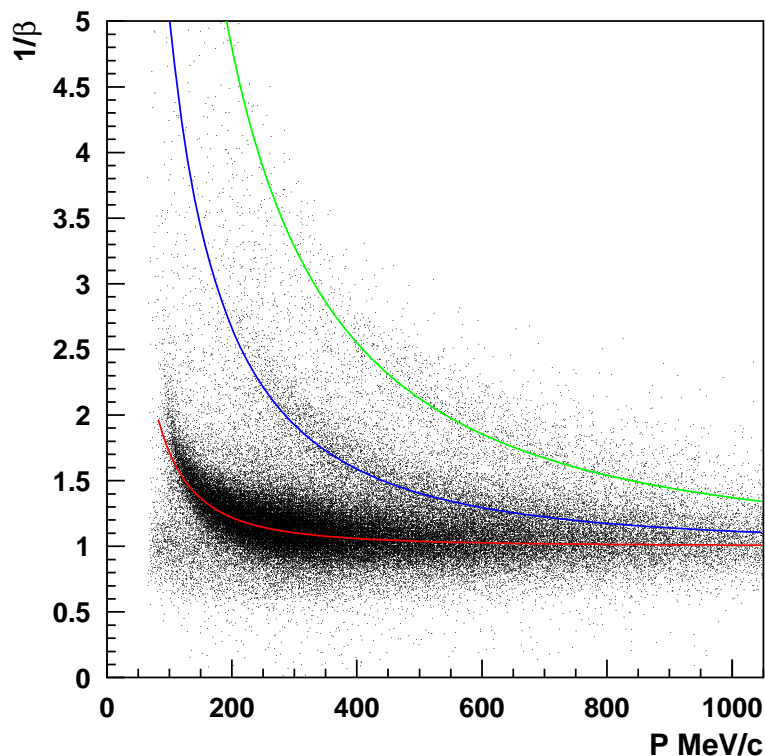


Рис. 28: Разделение частиц по времени пролёта (эксперимент). Теоретические кривые соответствуют различным массовым гипотезам:  $\pi^\pm$  (нижняя кривая),  $K^\pm$  (средняя),  $p^\pm$  (верхняя).

рис. 28 представлена зависимость обратной скорости частиц (параметр  $1/\beta$ ) от импульса для экспериментальных многоадронных событий.

Рис. 29 и 30 иллюстрируют использование идентификации частиц по времени пролёта при обработке экспериментальных данных, набранных на  $\psi'$  мезоне. В частности, в случае распада  $\phi \rightarrow K^+ + K^-$  уровень фона уменьшается примерно в 60 раз.

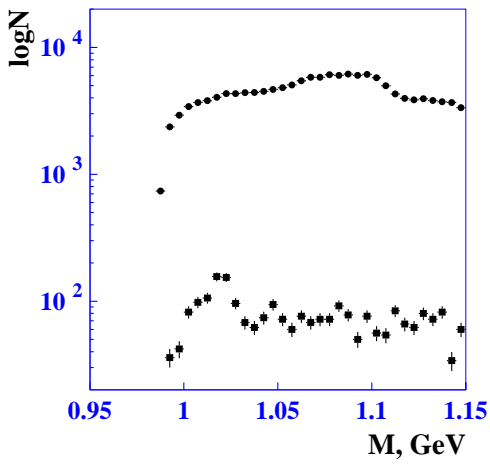


Рис. 29: Экспериментальные данные ( $\psi'$ ). Показаны спектры инвариантных масс двух частиц разного заряда с общей вершиной в предположении, что все частицы  $K^\pm$ . Точки вверху: все частицы. Точки внизу: то же после применения отбора по времени пролёта. Хорошо виден пик от  $\phi \rightarrow K^+ K^-$ .

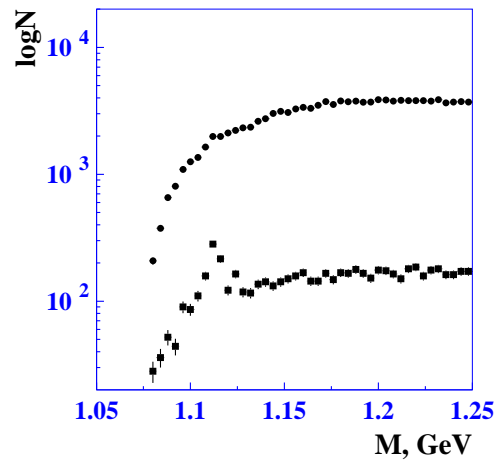


Рис. 30: Экспериментальные данные ( $\psi'$ ). Показаны спектры инвариантных масс двух частиц разного заряда с общей вершиной в предположении, что все частицы  $p$  и  $\pi^-$  или  $\bar{p}$  и  $\pi^+$ . Точки вверху: все частицы. Точки внизу: то же после применения отбора по времени пролёта. Хорошо виден пик от  $\Lambda \rightarrow p\pi^- + c.c.$

## 9 Торцевой калориметр

Торцевой калориметр детектора КЕДР создан на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Na) с регистрацией света вакуумными фототриодами (ФТ). Основные свойства кристаллов йодистого цезия приведены в таблице 7 [6, 47].

Таблица 7: Основные характеристики кристаллов йодистого цезия.

Параметр	CsI(Tl)	CsI(Na)	CsI
Плотность, г/см <sup>3</sup>	4.51	4.51	4.51
dE/dx, МэВ/см	5.6	5.6	5.6
Радиационная длина, см	1.86	1.86	1.86
Радиус Мольера, см	3.57	3.57	3.57
Гигроскопичность	слабая	слабая	слабая
Максимум люминесценции $\lambda_{max}$ , нм	550	420	315
Показатель преломления для $\lambda_{max}$	1.79	1.84	1.95
Время высвечивания, нс	1300	630	35
Световой выход, фотонов/МэВ	$50 \times 10^3$	$40 \times 10^3$	$2 \times 10^3$

Торцевой калориметр состоит из двух частей, расположенных вокруг вакуумной камеры симметрично относительно области взаимодействия  $e^+e^-$  пучков, как показано на рис. 1. Каждая часть включает в себя четыре модуля и внутреннюю систему, состоящую из отдельных счётчиков (см. рис. 31). Модуль собран из 74 блоков. Блок модуля торцевого калориметра состоит из двух кристаллов CsI(Na) с размера-

ми  $60 \times 60 \times 150$  мм, его полная длина составляет 300 мм или  $16.1 X_0$ . Схема блока показана на рис. 32. Система внутренних счётчиков, находящаяся вблизи вакуумной камеры накопителя, содержит 24 кристалла длиной 300 мм. Всего в калориметре 1232 кристалла. Конструкция блоков и их характеристики более подробно описаны в работе [48]. Результаты, полученные с прототипом детектора, представлены в [49]. Предельные возможности данной схемы исследованы в работе [50].

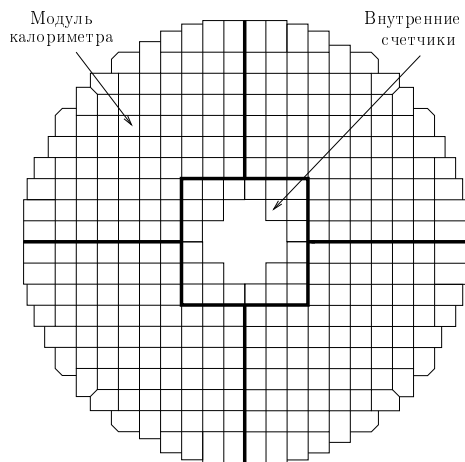


Рис. 31: Схема торцевого калориметра детектора КЕДР.

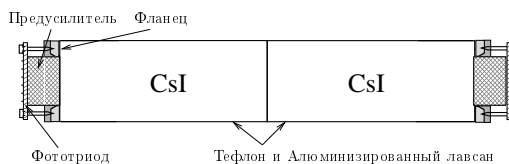


Рис. 32: Блок торцевого калориметра детектора КЕДР состоит из двух кристаллов размером  $60 \times 60 \times 150$  мм, контейнера из алюминизированного лавсана, капролонового фланца, фототриода и предусилителя. Кристаллы обернуты тefлоновой пленкой. Между кристаллом и фототриодом обеспечивается оптический контакт.

Основные параметры торцевого калориметра собраны в таблице 8.

Таблица 8: Основные характеристики торцевого калориметра.

Параметр	Значение
Число кристаллов	1232
Размер кристаллов	$60 \times 60 \times 150$ мм $60 \times 60 \times 300$ мм
Длина блока	300 мм ( $16.1 X_0$ )
Внешний радиус калориметра	665 мм
Масса	3.2 т
Телесный угол	$\simeq 0.21 \times 4\pi$
Энергетическое разрешение (проектное)	3.5 % при 150 МэВ 2 % при 1000 МэВ
Пространственное разрешение	6–12 мм

## 9.1 Кристаллы и счётчики

В торцевом калориметре детектора КЕДР используются кристаллы CsI(Na), произведённые НПО “Монокристаллреактив”, г. Харьков. Кристаллы обернуты диффузным отражателем, в качестве которого использовалась пленка пористого тefлона марки СКЛ толщиной 70 мкм, и упакованы в контейнер из алюминизированного лавсана толщиной 20 мкм. На торцах кристаллов установлены капролоновые фланцы, которые служат для крепления лавсанового контейнера и фотоприемников. При установке

фотоприемников между поверхностью кристалла и окном фототриода обеспечивается оптический контакт при помощи оптической силиконовой смазки. Световыход счётчиков, с учётом коэффициента светосбора, составляет около 10000 фотонов на 1 МэВ выделенной в кристалле энергии, неоднородность светосбора по длине кристалла не превышает 10%.

## 9.2 Фототриоды

В торцевом калориметре детектора КЕДР в качестве фотоприёмников используются вакуумные фототриоды, способные работать в присутствии сильных магнитных полей (до 2 Тл). ФТ были изготовлены на Новосибирском заводе “Экран” [51]. Они имеют полупрозрачный бищелочной фотокатод, плоский электрод-пластину, являющуюся динодом, и анод-сетку между фотокатодом и динодом. Диаметр фототриодов составляет 50–52 мм, высота — 45–50 мм. Диаметр чувствительной области фотокатода — 48 мм. Квантовая эффективность —  $10 \div 15\%$ , неоднородность квантовой эффективности по площади фотокатода — около 10%. Коэффициент усиления динода равен  $10 \div 15$ . При работе в магнитном поле 0.6–1 Тл коэффициент усиления фототриодов уменьшается приблизительно в два раза.

Следует отметить, что за время, прошедшее после изготовления фототриодов (они были изготовлены более 20 лет назад, при этом около 10 лет эксплуатировались в калориметре), вышли из строя или существенно ухудшили свои параметры около 19% ФТ.

## 9.3 Электронный тракт

Схема электронного тракта калориметра представлена на рис. 33.

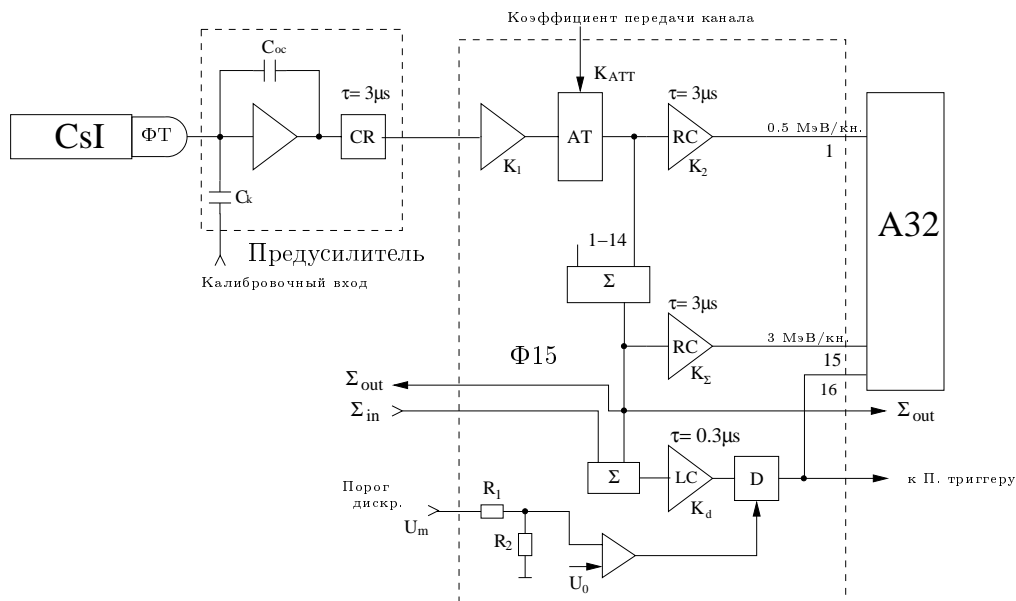


Рис. 33: Электронный тракт торцевого калориметра детектора КЕДР состоит из фототриода, предусилителя, усилителя-формирователя  $\Phi 15$  и АЦП А32.

Заряд с анода фототриода поступает на вход зарядочувствительного предусилителя. Коэффициент передачи предусилителя составляет 0.22 В/пКл. Затем сигнал

формируется в плате усилителей-формирователей Ф15, после чего оцифровывается АЦП с пиковым детектором А32 [52], выполненном в стандарте КЛЮКВА [53]. Время формирования сигнала составляет 3 мкс.

В каждой плате Ф15 производится аналоговое суммирование всех сигналов, поступающих на вход платы. Этот просуммированный сигнал также поступает на АЦП. Кроме того, просуммированный сигнал используется для организации нейтрального триггера детектора, для чего производится его дополнительное формирование. Фронт данного сигнала после формирования составляет 300 нс. После формирования сигнал поступает на компаратор. Если его амплитуда превышает заданное опорное напряжение, формируется логический сигнал, который используется в триггере детектора. Для контроля за работой описанной выше схемы логический сигнал с компаратора также подается на АЦП.

Для проведения калибровки электронного тракта торцевого калориметра и проверки его работоспособности, в каждом предусилителе калориметра предусмотрен специальный (калибровочный) вход.

Для контроля работы электроники торцевого калориметра была организована система “медленного контроля”, включающая в себя измерение напряжения питания предусилителей, формирователей Ф15, АЦП, температуры калориметра и т.д.

## 9.4 Калибровки калориметра и достигнутые параметры

Для контроля параметров и калибровки калориметра проводились следующие процедуры:

- измерения пьедесталов АЦП — ежедневно;
- калибровка электронного тракта с помощью генератора импульсов — ежедневно;
- калибровка калориметра с использованием космических частиц — 1–2 раза в неделю;
- абсолютная калибровка энергии с использованием событий упругого  $e^+e^-$  рассеяния — по мере набора необходимой статистики.

Стабильность пьедесталов между измерениями оказалась лучше одного канала АЦП, что эквивалентно 0.5 МэВ выделенной в кристаллах энергии. Стабильность электронного тракта составляет 0.3–0.4%. Интегральная нелинейность не превышает 1% на всём измерительном диапазоне. Полные шумы электронного тракта эквивалентны 0.4 МэВ выделенной в кристалле энергии, доля когерентных шумов не превышает 20%.

При проведении космической калибровки точность измерения положения космического спектра составляет 3–4%. Как уже упоминалось выше, в процессе работы детектора КЕДР калибровка торцевого калориметра при помощи космических частиц проводится 1–2 раза в неделю. Полученные данные позволяют утверждать, что временной дрейф коэффициентов передачи измерительных каналов калориметра мал. Так, при сравнении космических калибровок, проведённых с разницей по времени в 2–4 недели, разница полученных калибровочных коэффициентов определяется точноностью измерения положения космического спектра. Из имеющихся данных мы делаем вывод о том, что в среднем стабильность каналов торцевого калориметра в течение интервала времени между космическими калибровками лучше 2%.

Энергетическое разрешение калориметра, полученное по событиям упругого  $e^+e^-$  рассеяния, составляет 3.5% при энергии частиц 1.5 ГэВ. Его пространственное разрешение при этой энергии составляет  $\simeq 8$  мм и соответствует проектному. Полученное энергетическое разрешение хуже проектного (таблица 8). Основным вкладом в ухудшение энергетического разрешения калориметра по сравнению с проектными параметрами является неточность калибровочных коэффициентов и, возможно, неоднородность светосбора кристаллов. В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию процедур калибровки калориметра для получения его проектных параметров.

## 10 Цилиндрический калориметр

В качестве цилиндрической части электромагнитного калориметра детектора КЕДР используется ионизационный калориметр на основе жидкого криптона [54, 55, 56].

### 10.1 Конструкция

На рис. 34 изображена конструкция жидко-криптонового (ЛКр) калориметра детектора КЕДР. ЛКр-калориметр представляет собой набор цилиндрических ионизационных

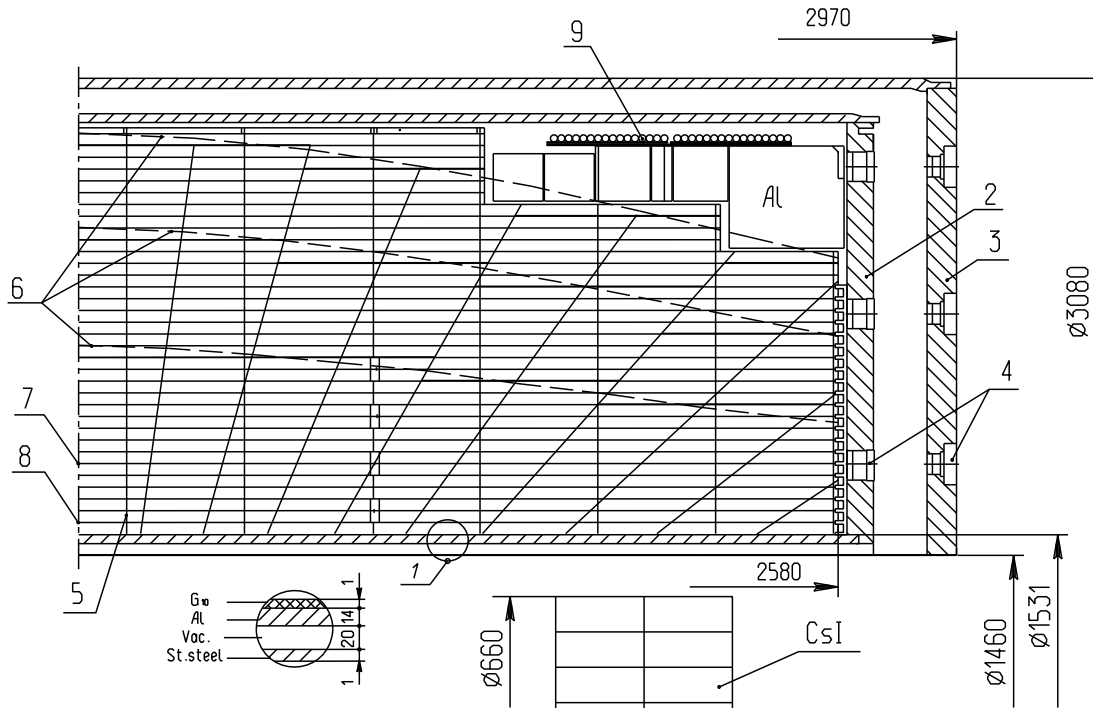


Рис. 34: Схема ЛКр-калориметра: 1 — входная стенка, 2 — холодный фланец, 3 — тёплый фланец, 4 — разъёмы, 5 — проставки (шпангоуты), 6 — линии равной толщины, 7 — координатные электроды, 8 — высоковольтные электроды, 9 — платы разводки высокого напряжения и разделительных ёмкостей.

камер. Внутренний радиус калориметра равен 75 см, толщина — 68 см или 14.8 радиационных длин. Полное количество жидкого криптона равно 27 тонн. Электроды камер изготовлены из листов стеклотекстолита (G10) толщиной 0.5 мм, покрытого с



двух сторон медной фольгой толщиной 18 мкм. Всего в калориметре 35 слоёв электродов. Зазор между электродами, равный 19.5 мм, задаётся с помощью конструкции из тонких кольцевых шпангоутов и пересекающих их по оси калориметра рёбер. Помимо сохранения зазора между электродами камер шпангоуты предназначены для фиксации электродов от слоя к слою. Система электродов собирается в криостате с экранно-вакуумной термоизоляцией, внутренний объём которого изготовлен из алюминия, а внешний — из нержавеющей стали. Внутри криостата, на внешнем радиусе фланцев, для экономии криптона монтируются алюминиевые кольца-вытеснители. В холодном и тёплом фланцах сварены стеклянные разъёмы для вывода сигналов из калориметра. Для термостабилизации с внешней стороны алюминиевого объёма приварены трубки, через которые, по мере необходимости, может продуваться жидкий азот.

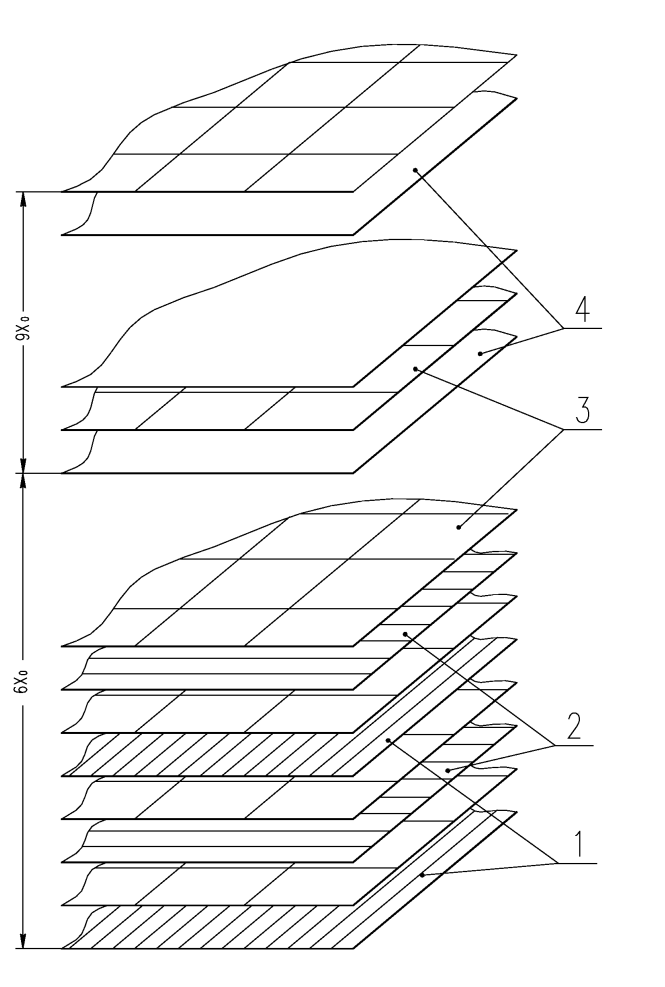


Рис. 35: Схема электродной структуры калориметра: 1 —  $\phi$ -полоски, 2 —  $z$ -полоски, 3 — высоковольтные электроды, 4 — заземлённые электроды.

На рис. 35 схематично изображена система электродов калориметра. Съём сигнала для измерения энергии осуществляется с высоковольтных электродов, которые разбиты на прямоугольники, соединённые между собой по радиусу так, что образуют ячейки ("башни") калориметра, ориентированные на место встречи. На ближнем к пучку радиусе ячейки имеют поперечный размер  $10 \times 10 \text{ см}^2$ , который по мере удаления от пучка увеличивается. По радиусу калориметр имеет три слоя таких ячеек. Заземлённые электроды первого слоя разбиты на полоски для измерения координат.

Всего имеется 4 плоскости для измерения  $z$  координаты и 4 плоскости для измерения угла  $\phi$ , которые чередуются друг с другом. Ширина ячеек и полосок увеличивается вдоль  $z$  по мере удаления от центра калориметра, чтобы обеспечить одинаковое разрешение по полярному углу.

## 10.2 Электроника

В состав электроники LKr-калориметра входят следующие компоненты:

- платы с разделительными ёмкостями, установленные внутри криостата калориметра, предназначенные для съёма сигнала с высоковольтных электродов;
- камерная электроника, установленная снаружи на торцевых фланцах калориметра;
- система коммутации каналов калориметра — блоки "Путаница";
- система калибровки электроники калориметра;
- платы суммирования каналов для первичного триггера детектора;
- промежуточная электроника с платами формирующих RC–2CR фильтров (одно интегрирующее и два дифференцирующих звена);
- оцифровывающая электроника.

Общее число каналов регистрирующей электроники калориметра равно 7240, из них 2304 канала предназначены для измерения энергии и 4936 — для измерения координат. Так как для измерения энергии сигнал снимается с высоковольтных электродов, то необходима разделительная ёмкость между камерой и измерительной электроникой. В калориметре для этого установлено 48 плат с конденсаторами по 48 каналов в каждой. Номинальное значение разделительной ёмкости для одного канала равно 28 нФ. Эти же платы служат для разводки высокого напряжения по калориметру.

К камерной электронике относятся зарядочувствительные предусилители на полевом транзисторе SNJ1800D [57, 58], которые размещаются на торцах криостата в металлических коробках по 48 штук в каждой. Помимо предусилителей, в коробке находятся фильтры питания предусилителей и калибровочные ёмкости. Парафазные сигналы с предусилителей выводятся через 96-контактные разъёмы типа PANDUIT (по два на одну коробку). Через эти же разъёмы подаётся питание для предусилителей ( $\pm 12$  В) и сигналы от калибровочного генератора.

Зарядочувствительный предусилитель воспринимает токовый импульс с камер калориметра и интегрирует его на ёмкости обратной связи (номинальное значение 5 пФ). Сопротивление обратной связи, поддерживающее режим по постоянному току, имеет значение 100 МОм. Таким образом, постоянная времени интегрирования равна 500 мкс.

Сигналы от предусилителей передаются по экранированным витым парам в блоки системы коммутации, которые расположены в зале детектора. В этих же блоках расположены специальные калибровочные генераторы, создающие через калибровочные ёмкости каналов ток, по форме близкий к току от частицы. Один калибровочный генератор работает на 4 коробки предусилителей. Помимо этого, для спектрометрических каналов в блоках системы коммутации установлены платы суммирования, которые

суммируют сигналы восьми соседних каналов в двух первых слоях и результат передают первичному триггеру детектора.

Платы Ф32 с RC–2CR фильтрами располагаются в пультовой детектора в крейтах КЛЮКВА [35]. В системе сбора данных калориметра присутствуют платы двух типов: Ф32Б (с постоянной времени 1.5 мкс) — предназначен для работы со спектрометрическими каналами калориметра и Ф32П (с постоянной времени 4.2 мкс) — предназначен для работы с координатными каналами. Для увеличения динамического диапазона платы Ф32Б имеют дополнительные каскады десятикратного усиления. Поэтому на выходе этих плат есть 32 сформированных сигнала плюс ещё 32 сформированных сигнала с дополнительным усилением. Общее количество плат Ф32Б равно 72, а Ф32П — 155.

Сформированные сигналы с калориметра оцифровываются пиковыми 12-разрядными АЦП, которые изготовлены в стандарте КЛЮКВА по 32 канала на плате [52]. Диапазон оцифровки составляет от 0 до 2 В, время оцифровки — 100 мкс. Максимальная интегральная нелинейность равна  $\pm 3$  канала.

### 10.3 Шумы электроники и радиоактивность

Выпускаемый промышленностью криптон содержит примесь  $\beta$ -радиоактивного изотопа  $^{85}\text{Kr}$  с периодом полураспада 10.5 лет и граничной энергией спектра 0.67 МэВ. Электроны от  $\beta$ -распада создают точечную ионизацию в зазоре ионизационной камеры калориметра. Токовые сигналы от событий  $\beta$ -распада случайным образом накладываются на полезный сигнал в калориметре и, таким образом, являются источником дополнительного шума.

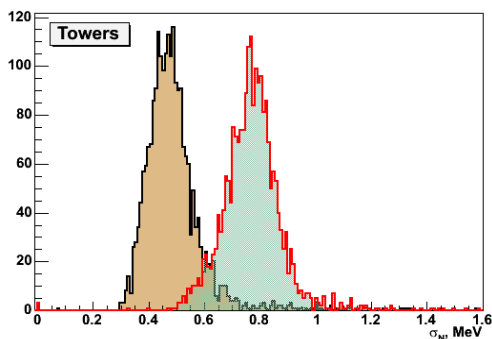


Рис. 36: Распределения по измеренным шумам всех спектрометрических каналов калориметра. Левая гистограмма: нет высокого напряжения на камерах калориметра, правая — высокое напряжение подано.

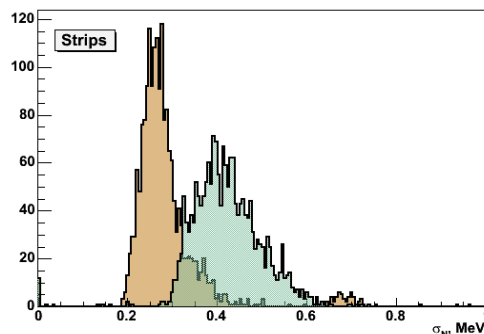


Рис. 37: Распределения по измеренным шумам всех координатных каналов калориметра. Левая гистограмма — нет высокого напряжения на камерах калориметра, правая — высокое напряжение подано.

На рис. 36, 37 изображены распределения по измеренным шумам для всех каналов калориметра в случае, когда подано высокое напряжение на камеры калориметра и когда оно выключено. В первом случае в шум канала даёт вклад как собственный шум электроники калориметра, так и шум от радиоактивности криптона, во втором — только шум электроники. Как видно из этих распределений, практически все спектрометрические каналы имеют шумы меньше 1 МэВ, а координатные — меньше

0.6 МэВ. Квадратично вычитая значения шумов, измеренные без высокого напряжения, из значения шумов при поданном высоком напряжении, получаем вклад в шум от радиоактивности криптона. Для башен имеем в среднем 0.6 МэВ, для полосок — 0.3 МэВ.

## 10.4 Калибровка

Отсутствие внутреннего усиления в калориметре позволяет с приемлемой точностью проводить относительную калибровку каналов, с помощью специальных генераторов, имитирующих на входе усилителей токовый сигнал от частиц. В результате калибровки определяются пьедестал АЦП и коэффициент усиления каналов. Генераторная калибровка проводится 2 раза в неделю. Измеренная временная стабильность пьедесталов составляет  $\pm 0.3$  канала АЦП (0.3 МэВ в энергетических единицах), а относительная стабильность коэффициентов усиления равна  $10^{-3}$ .

Помимо генераторной калибровки, проводится также калибровка по записанным событиям с космическими мюонами. Основная цель космической калибровки — это отслеживание изменения амплитуды сигнала калориметра со временем, которое происходит в результате медленного загрязнения криптона электроотрицательными примесями. Темп уменьшения амплитуды сигнала калориметра со временем приблизительно равен 1% в месяц. Космическая калибровка позволяет также проверить работоспособность всех каналов калориметра и сделать грубую абсолютную калибровку.

## 10.5 Параметры калориметра

Энергетическое разрешение калориметра в области больших энергий было измерено на событиях упругого  $e^+e^-$ -рассеяния. На рис. 38 показано распределение по измеренной в калориметре энергии для этих событий. Разрешение на энергии 1.8 ГэВ равно

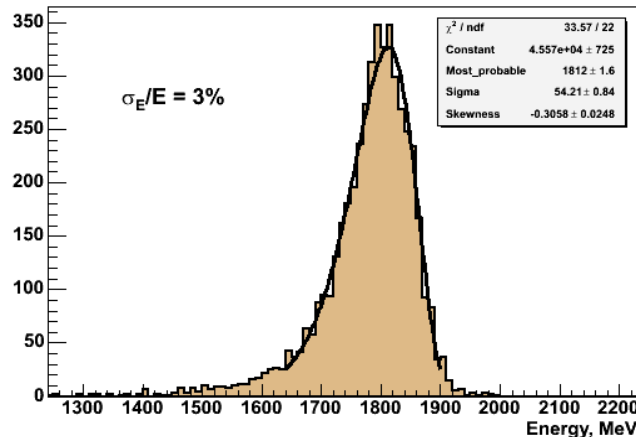


Рис. 38: Распределение по измеренному энерговыделению в калориметре для событий  $e^+e^-$ -рассеяния при энергии  $2E=3.6$  ГэВ.

$3.0 \pm 0.1$  %. Ожидаемое из моделирования калориметра разрешение для этой энергии составляет 2.4 %. Отличие, по-видимому, связано с недостаточной точностью относительной калибровки каналов калориметра.

Энергетическое разрешение калориметра в области малых измеряемых энергий определяет разрешение детектора по восстановленной инвариантной массе  $\pi^0$ -мезона.

На рис. 39 изображено два распределения по инвариантной массе зарегистрированных в калориметре пар фотонов из распада  $\psi'$ -мезона. Первое распределение построено

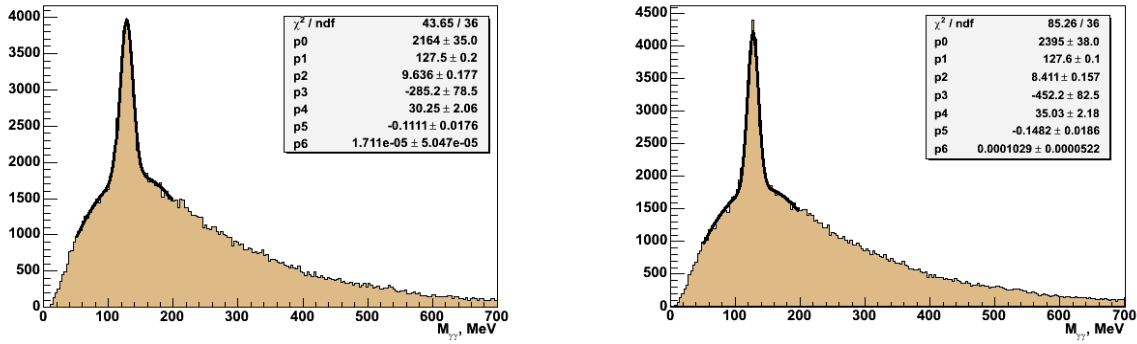


Рис. 39: Распределение по измеренной в калориметре инвариантной массе двух фотонов. Левый график: координаты фотонов определялись методом центра тяжести только по амплитудам спектрометрических каналов, разрешение по массе  $\pi^0$ -мезона  $\sigma_m = 9.6 \pm 0.2$  МэВ. Правый график: координаты фотонов определялись с использованием информации из стриповой структуры калориметра, разрешение по массе  $\pi^0$ -мезона  $\sigma_m = 8.4 \pm 0.2$  МэВ.

для случая, когда координаты фотонов реконструировались только по амплитудам в спектрометрических каналах, второе — когда использовалась и информация из стриповой структуры калориметра. Из этих рисунков видно, что хорошее координатное разрешение для фотонов в калориметре, которое достигается благодаря наличию полосок в электродной структуре, позволяет улучшить разрешение по инвариантной массе двух фотонов от распадов  $\pi^0$ -мезона с  $9.6 \pm 0.2$  МэВ до  $8.4 \pm 0.2$  МэВ.

Очевидно, что координатное разрешение становится особенно важным для реконструкции частиц с большой энергией. Когда энергия  $\pi^0$ -мезона больше 400 МэВ, получены следующие данные по разрешению по массе  $\pi^0$ -мезона: если не использовать данные с полосок калориметра, то  $\sigma_m = 10.2 \pm 0.2$  МэВ, а при реконструкции с использованием этой информации —  $\sigma_m = 7.6 \pm 0.2$  МэВ. Таким образом, хорошее пространственное разрешение калориметра для фотонов заметно улучшает характеристики детектора.

Непосредственно само пространственное разрешение калориметра было измерено для минимально ионизирующих частиц на событиях с космическими мюонами [59]. Для перпендикулярного полоске падения мюона разрешение составило  $0.62 \pm 0.1$  мм (для слоя с шириной полосок 6.9 мм), что хорошо согласуется с разрешением, полученным в моделировании. Пространственное разрешение для фотонов различной энергии ранее было измерено с прототипом калориметра [60]. Полученное в этом эксперименте значение для разрешения, практически во всем энергетическом диапазоне, лучше 1 мм.

## 11 Мюонная система

Мюонная (пробежная) система предназначена для идентификации и разделения мюонов и пионов по отличию длины пробега в веществе детектора [61].

Система построена на основе цилиндрических газовых проволочных камер, работающих в самогасящемся стримерном (СГС) режиме [62] — так называемых стримерных трубок.

Блоки мюонной системы расположены в три слоя внутри ярма магнита детектора (рис. 1). Таким образом, железо ярма служит поглотителем. Толщина железа перед каждым слоем мюонной системы — 23 см (1.4 ядерной длины). На рис. 40 и 41 представлен результат расчёта с помощью KEDRSIM (см. п.16) вероятности срабатывания слоёв мюонной системы от  $\mu^\pm$ - и  $\pi^\pm$ -мезона, вылетевшего из места встречи под углом  $90^\circ \pm 5^\circ$  к оси пучков с равномерным распределением по углу  $\phi$ .

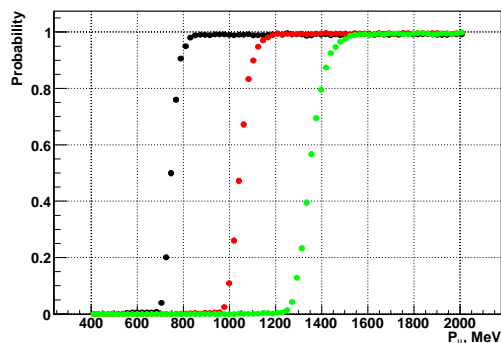


Рис. 40: Вероятность срабатывания 1-го, 2-го и 3-го слоёв мюонной системы для  $\mu^\pm$  в зависимости от импульса (расчёт).

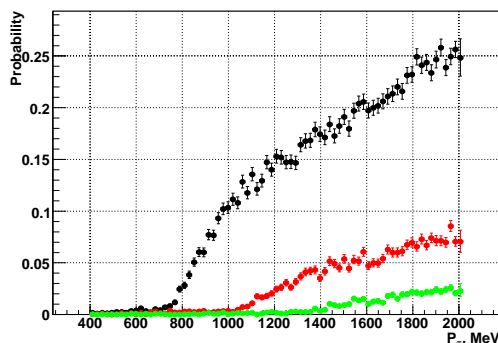


Рис. 41: Вероятность срабатывания 1-го, 2-го и 3-го слоёв мюонной системы для  $\pi^\pm$  в зависимости от импульса (расчёт).

## 11.1 Конструкция

Система состоит из 2208 стримерных трубок. Каждая трубка изготовлена из нержавеющей стали толщиной 300 мкм и имеет длину 4.5 м и диаметр 4 см. По оси трубки натянут анод — проволоочка диаметром 100 мкм из позолоченного молибдена. Торцы трубки закрыты изолирующими пробками из капронита, герметично фиксирующими анод и имеющими отверстия для продувки рабочей газовой смеси.



Рис. 42: Блок мюонной системы на стенде. Защитный кожух снят.

Трубки объединяются в блоки (рис. 42). В каждом блоке трубки фиксируются с помощью четырёх дюралюминиевых матриц, две из которых расположены у концов

трубок, а две других — на расстоянии  $1/3$  длины трубок от концов. На торцевых матрицах установлены платы камерной электроники и разводки высокого напряжения, закрытые защитными кожухами. Блок имеет разъёмы для подачи питания, высокого напряжения, калибровочных сигналов, управления порогом дискриминаторов, выходной сигнальный разъём и трубки для подвода и отвода рабочей газовой смеси.

Чтобы уменьшить вред от выхода отдельного канала из строя, трубки в блоке размещены в два слоя со сдвигом на радиус трубки. Для уменьшения числа каналов электроники анодные проволочки трубок соединены последовательно по четыре (в некоторых каналах — по шесть). Трубки соединяются, как правило, через одну, чтобы уменьшить вероятность срабатывания нескольких трубок одного канала от одной частицы.

Блоки системы установлены в зазорах ярма магнита детектора в три слоя. В соответствии с восьмигранной формой ярма блоки сгруппированы в октанты.

## 11.2 Технология изготовления

Механическая сборка блока производится по следующей технологии: на специальном столе закрепляются матрицы, в которые помещаются трубки; трубки тщательно промываются изнутри водой, а затем спиртом; далее, анодная проволочка пропускается внутри трубки, продевается сквозь отверстия в пробках, в которые вставляются пины; пробки вдавливаются в торцы трубки специальным поршнем. Пробки предварительно бракуются по току поверхностного разряда при высоком напряжении. На внешней поверхности пробки выдавливается круговой бортик высотой 0.3 мм, а непосредственно перед вдавливанием края пробки смазываются силиконовым (кремний-органическим) клеем КС-5. Такая технология обеспечивает надёжную герметизацию соединения, которая не нарушается при изменении температуры в широких пределах, а также закрепляет трубки в матрицах, создавая надёжный электрический контакт. Анодная проволочка натягивается с усилием 300 г и закрепляется в пробках с помощью пинов. Пины изготавливаются из лужёной капиллярной трубки из отожжённой меди с внешним диаметром 1.6 мм и внутренним диаметром 220 мкм. После натяжения всех проволочек в блоке к пинам припаиваются изолированные проводники. Место установки пина в пробку также герметизируется клеем КС-5. Газовые отверстия пробок соединяются полихлорвиниловой трубкой.

После механической сборки проверяются герметичность блока и натяжение проволочек. Для проверки герметичности блок надувается воздухом до избыточного давления 0.2 атм, при этом течь не должна превышать 0.02 л/ч. Поскольку характерный поток газовой смеси через блок равен 0.1 л/мин и перепад давления практически отсутствует, реальная течь оказывается значительно меньше измеренной при тестировании. Натяжение проволочки измеряется резонансным методом. Проволочки, у которых измеренное натяжение менее 100 г, заменяются.

На следующем этапе производятся монтаж плат разводки высокого напряжения и калибровочного сигнала, камерной электроники, распайка кабелей, настройка камерной электроники. Затем блок продувается воздухом и подвергается тренировке обратным высоким напряжением. После этого блок продувается рабочей газовой смесью, измеряются счётные характеристики и распределения шумов по анодным проволочкам.

### 11.3 Газовая смесь

В ИЯФ изучались различные газовые смеси для СГС-режима [63, 65]. В мюонной системе детектора КЕДР используется смесь аргон + углекислый газ + н-пентан. В различные периоды работы соотношение компонент несколько менялось: (63 : 30 : 7), (68 : 25 : 7), (60 : 32 : 8). При таких концентрациях пентана эта смесь взрывобезопасна.

Для получения рабочей газовой смеси углекислый газ продувается через н-пентан, находящийся в термо- и баростабилизированном сосуде. Концентрация пентана в смеси определяется давлением насыщенных паров пентана при данной температуре, поэтому температура стабилизируется с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Затем к смеси добавляется требуемое количество аргона. Потoki аргона и углекислого газа управляются контроллерами Bronkhorst.

Готовая газовая смесь подаётся параллельно на октанты системы. Внутри октанта продувка идёт последовательно по блокам от внутреннего слоя ко внешнему. Трубки каждого блока продуваются последовательно.

Поскольку блоки системы изготовлены более 20 лет назад, их герметичность часто оставляет желать лучшего. В этих условиях требования к непрерывности продувки рабочего газа через мюонную систему резко возрастают. На практике максимальный срок остановки продувки без существенного ухудшения параметров системы составляет на конец сезона 2009–10 гг. около суток, после чего в системе образуются пробки испорченного газа, на удаление которых может уходить до нескольких недель.

Качество газовой смеси — необходимое условие высокой эффективности регистрации. К сожалению, сбои продувки неоднократно имели место во время экспериментальных сезонов.

### 11.4 Электроника

Камерная электроника обеспечивает определение продольной координаты пролёта частицы по разности времён прихода сигналов на концы цепочки трубок. Блок-схема канала электроники показана на рис. 43.

Сигналы с концов проволочек через высоковольтную развязку поступают на усилители-формирователи (УФ). Когда входной сигнал превышает заданный порог, формирователь генерирует логический сигнал заданной длительности. Входные пороги дискриминаторов УФ могут индивидуально регулироваться подстроечными резисторами в диапазоне примерно 5–50 мВ; кроме того, пороги всех УФ одного блока могут быть одновременно смещены внешним управляющим напряжением. Порог УФ «старт» устанавливается примерно равным 25 мВ, «стоп» — 20 мВ; таким образом, если сработал «старт», то сработал и «стоп».

Сигнал УФ «старт» отправляется непосредственно на вход экспандера, в то время как сигнал «стоп» идёт на экспандер через линию задержки. Линия задержки сделана из витой пары, её длина подбирается таким образом, чтобы сигнал «стоп» всегда приходил на экспандер позже сигнала «старт». Длительность сигнала «старт» выбирается такой, чтобы до его окончания сигнал «стоп» всегда успевал прийти на экспандер. Амплитуда сигнала «стоп» увеличена, чтобы компенсировать ослабление в линии задержки.

Экспандер формирует на выходе парафазный логический сигнал, длительность которого в несколько десятков раз больше времени между передними фронтами «старта» и «стопа». Параметры линии задержки и экспандера подбираются таким образом, чтобы диапазон длительностей выходного сигнала был примерно 2–8 мкс. Выходной



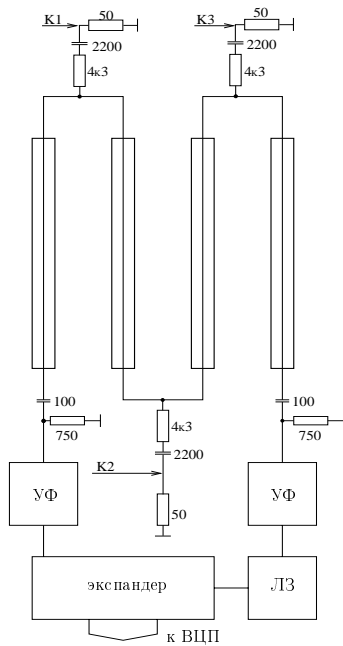


Рис. 43: Схема канала электроники мюонных камер.

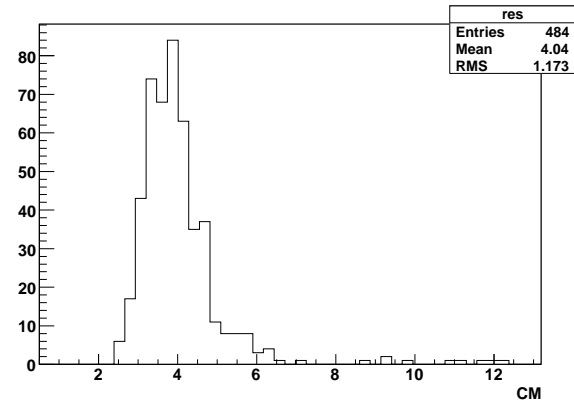


Рис. 44: Продольное координатное разрешение каналов мюонной системы (эксперимент, май 2010 года).

сигнал передаётся по кабелю из экранированной витой пары на время-цифровой преобразователь — ТП-плату стандарта КЛЮКВА [64]. Измерение длительности сигнала производится методом прямого счёта с дискретностью 2.5 нс.

Номер сработавшей трубки в связке и продольная координата срабатывания определяются по времени ВЦП. Поперечная координата определяется положением сработавшей трубки. Более точное измерение поперечной координаты не требуется из-за многократного рассеяния частиц в веществе детектора.

Высокое напряжение, необходимое для работы камер в СГС-режиме, подаётся независимо на каждый октант системы и далее распределяется между блоками параллельно. Величина рабочего напряжения равна 4200 В, ширина плато — около 400 В.

Неисправности камерной электроники и пробой в высоковольтных кабелях являются основными причинами снижения эффективности мюонной системы. На конец сезона 2009–10 гг. были неисправны примерно 5% каналов системы, ещё около 5% исправны частично (не измеряют координаты срабатывания).

## 11.5 Калибровка и параметры системы, полученные в эксперименте

Калибровка системы заключается в определении времён ВЦП, соответствующих концам трубок. Она может производиться с помощью генератора и по временным спектрам, набранным с космическими частицами.

Генераторная калибровка используется в основном для контроля работоспособности электроники. Калибровочные константы получаются из подгонки временных спектров, записанных в специальных заходах. Затем они уточняются по экспериментальным заходам. Продольное координатное разрешение измеряется по прямым трекам, восстановленным в мюонной системе. Среднее разрешение каналов мюонной системы

Таблица 9: Эффективность мюонной системы, % (май 2010 года).

№ октанта	внутренний слой	средний слой	внешний слой
1	97.7	99.0	92.8
2	99.1	99.7	96.3
3	90.6	98.8	92.3
4	98.6	99.8	99.0
5	98.0	97.3	95.3
6	98.6	99.0	61.6
7	99.2	97.5	92.4
8	98.4	95.5	94.0

в детекторе составляет около 4 см (рис. 44).

Эффективность системы измеряется по экспериментальным заходам. Отбираются события, в которых восстановлены треки в мюонной системе. Слои системы используются для перекрёстного таггирования; так, например, для измерения эффективности среднего слоя используются треки, у которых есть срабатывания во внутреннем и внешнем слоях. Измеренная эффективность сохраняется в базе данных и затем используется при анализе экспериментальных данных.

## 12 Монитор светимости

### 12.1 Введение

Светимость коллайдера определяет частоту наблюдения физических процессов как

$$\frac{dN}{dt} = L \cdot \sigma_{vis},$$

где  $L$  — светимость, а  $\sigma_{vis}$  — видимое (эффективное) сечение, учитывающее кинематику процесса, геометрию и эффективность детектирующей системы.

Оперативная (on-line) светимость измеряется по хорошо известному процессу однократного тормозного излучения (ОТИ)  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ . При столкновении одна из частиц теряет часть энергии, излучая фотон, а вторая частица практически не меняет своего движения. Излученные фотоны летят в узком конусе вдоль направления исходной частицы с углом  $\theta \sim m_e/E_b$ , где  $m_e$  — масса электрона, а  $E_b$  — энергия пучка. Измеряя скорость счёта от электронного и позитронного пучков, мы получаем два независимых измерения светимости. Энергетический спектр излученных фотонов имеет вид

$$\frac{dN_\gamma}{d\omega} \sim \frac{1}{\omega}$$

для  $\omega \leq E_b$ . Край спектра ОТИ при  $\omega = E_b$  может использоваться для амплитудной калибровки и измерения разрешения.

Сечение процесса ОТИ было впервые рассчитано в 60-х годах в работах [66, 67]. Позднее, в 80-х годах, более точные измерения и расчёты [68, 69] показали заметное влияние на механизм излучения таких макроскопических параметров, как размер пучка и прицельный параметр столкновения пучков. При наших условиях учёт размера пучка изменяет сечение на несколько процентов [70]. Если для измерения светимости

регистрируются  $\gamma$ -кванты с энергией выше пороговой  $E_\gamma^{min}$ , то сечение регистрации можно аппроксимировать следующей формулой:

$$\sigma_{vis} = C \cdot \left( \ln \frac{1}{Th} - \frac{3}{8} Th^2 + Th - \frac{5}{8} \right), \quad (10)$$

где  $Th = E_\gamma^{min}/E_b$ , а коэффициент  $C \approx 0.53 \cdot 10^{-25}$  см<sup>2</sup> слабо зависит от энергии и размера пучка, пороговой энергии.

При изменении энергии коллайдера в диапазоне 1.5–5.5 ГэВ и величине порога  $E_\gamma^{min} \approx 300$  МэВ сечение регистрации меняется в пределах  $(0.7 \div 1.3) \cdot 10^{-25}$  см<sup>-2</sup>. При светимости  $10^{30}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup> скорость счёта составляет около 100 кГц, что достаточно для оперативного измерения светимости.

## 12.2 Аппаратура монитора светимости

Монитор светимости (МС) детектора КЕДР представляет собой два электромагнитных калориметра, расположенных на оси сталкивающихся пучков с обеих сторон от места встречи на расстоянии около 18 м (см. рис. reffig:vepp). При выборе конструкции калориметра принимались во внимание следующие факторы.

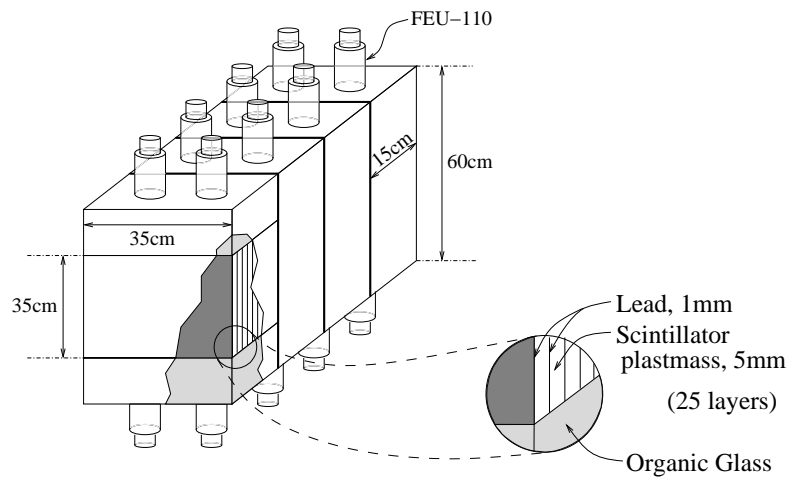
- При работе в области высоких энергий (5 ГэВ) светимость ВЭПП-4М составит (неск. единиц)  $\times 10^{31}$  см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>. При этом ожидаемая загрузка от фотонов с энергией больше 100 МэВ превышает 5 МГц, а радиационная загрузка может составить 1000 Грэй за 1 год работы. Большинство кристаллических сцинтилляторов не работает при таких условиях.
- Для рассеянных частиц с энергией  $E_e^\pm$  в процессе ОТИ очень точно выполняется соотношение  $E_\gamma + E_e^\pm = E_b$ . Измерение энергии тормозного фотона позволит пометить лишние частицы в СРРЭ (см. п. 13), что даёт возможность уменьшить фон при изучении двухфотонных процессов.

Поэтому, в качестве калориметра был выбран сэндвич, состоящий из чередующихся пластин сцинтилляционной пластмассы и свинца. Это обеспечивает нужное быстродействие и радиационную стойкость. Для оптимизации разрешения была выбрана конструкция с максимальным светосбором и малыми сэмплинг-флуктуациями.

Устройство детектора показано на рис. 45. Каждый сцинтилляционный сэндвич состоит из четырёх одинаковых блоков. Блок содержит 25 слоёв свинца толщиной 1 мм, которые перемежаются пластинами сцинтилляционной пластмассы толщиной 5 мм. К пластинам сцинтиллятора с обеих сторон приклеены световоды в виде прямоугольных блоков оргстекла. Каждый блок сэндвича просматривается четырьмя ФЭУ, всего используется 16 ФЭУ на сэндвич. В световоды вклеены светодиоды, которые служат для проверки работоспособности ФЭУ. Полная радиационная длина сэндвича составляет  $18 X_0$ .

Для измерения светимости суммируются сигналы с четырёх ФЭУ, по одному от каждого блока, и этот сигнал, пропорциональный энергии фотона, подаётся на дискриминатор с фиксированным порогом. Частота срабатывания дискриминатора служит для измерения светимости. Измерения с электронной и позитронной сторон дают статистически независимые результаты.

Для записи информации осуществляется преобразование амплитудных сигналов в логические, длина которых пропорциональна входному заряду. Длины всех сигналов



$$L = 18X_0$$

Рис. 45: Устройство сцинтиляционных сэндвичей монитора светимости  $e^+e^-$ -коллайдера ВЭПП-4М.

измеряются ТП-платами в стандарте КЛЮКВА [64]. Типичный спектр для полной энергии приведён на рис. 46. По виду спектра можно оперативно контролировать стабильность порога  $Th$  (10).

Расчётное разрешение сэндвича  $\sigma(E_\gamma)/E_\gamma$  определяется вкладками, приведёнными в таблице 10.

Таблица 10: Расчётное разрешение сэндвича ( $E_\gamma$  в ГэВ).

Вклад	Величина в %
Сэмплинг-флуктуации	$4.2/\sqrt{E_\gamma}$
Продольные утечки	$1.0 \cdot E_\gamma$
Статистика фотоэлектронов	$3.0/\sqrt{E_\gamma}$
Сумма при $E_\gamma = 1$ ГэВ	6.5

В эксперименте разрешение сэндвича можно измерить по событиям ОТИ с помощью СРРЭ (см. п. 13). Результаты показаны на рис. 47. Энергия фотонов измерялась в СРРЭ с точностью (1–2)%. Ухудшение разрешения, по сравнению с расчётным, определяется неточностью калибровки, наложением сигналов и нестабильностью ФЭУ при изменении загрузки.

### 12.3 Оперативное измерение светимости

Светимость коллайдера определяется по формуле

$$L = \frac{(f - f_{bg})}{\sigma_{vis}} \cdot (1 + \delta),$$

где  $f$  – частота срабатывания монитора,

$f_{bg}$  – фон ОТИ на остаточном газе,

$\sigma_{vis}$  – ожидаемое сечение регистрации ОТИ (10),

$\delta$  – корректирующий фактор, связанный с потерями фотонов.

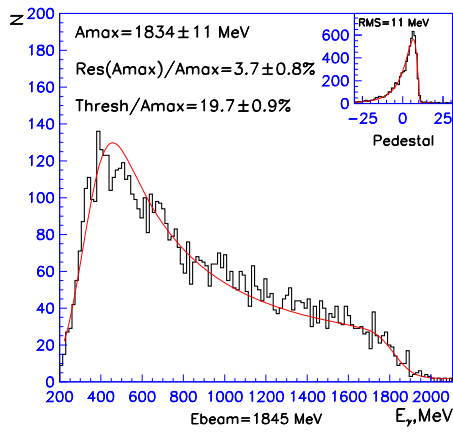


Рис. 46: Спектр ОТИ, используемый для измерения порога срабатывания. Ширина и форма пьедестала определяются наложением сигналов с предыдущих оборотов. Правый край спектра уширяется из-за совпадения  $\gamma$ -квантов с одного оборота.

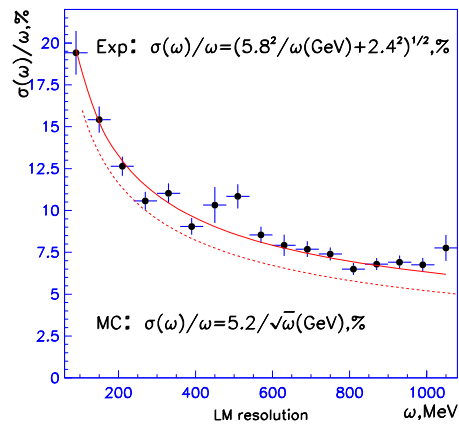


Рис. 47: Разрешение монитора светимости по событиям ОТИ. Точками показаны экспериментальные данные, сплошной линией — их подгонка, а пунктиром — подгонка разрешения, рассчитанного методом Монте-Карло.

Для настройки параметров ускорителя желательно измерять светимость с периодом  $\sim 10$  сек при относительной точности на уровне 1%.

В нашем случае точность определяется следующими факторами, перечисленными в порядке их влияния на точность измерения.

- Из-за конструктивных особенностей ВЭПП-4М, фотоны ОТИ выходят из вакуумной камеры через окно в вольфрамовом приёмнике синхротронного излучения. Угловые размеры окна всего в 3–4 раза превышают  $1/\gamma$  — естественный размер пятна ОТИ, что приводит к  $\sim 10\%$  потерям фотонов на краях. Из-за изменения угла в месте встречи потери могли возрастать до 50%. После принятия мер по стабилизации пучка в месте встречи вероятность потерь, как правило, не превышала 20%. Величина потерь измерялась с помощью СРРЭ по событиям ОТИ (есть рассеянный электрон, но нет  $\gamma$ -кванта).
- Величину порога  $Th$  (10) можно с хорошей точностью измерять в каждом заходе. Характерная величина порога равна 300–350 МэВ. Из-за нелинейности отклика сэндвича, абсолютная ошибка  $\Delta Th$  оценивается в 10%, что дает ошибку светимости  $\Delta L/L \approx 5\%$ .
- При светимости больше  $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$  увеличивается вероятность одновременного попадания в сэндвич нескольких фотонов. При этом происходит два конкурирующих процесса — падение частоты срабатывания (два фотона считаются за один) и увеличение частоты, когда два фотона с энергией ниже порога вызывают срабатывание. В нашем случае эта поправка составляет  $\Delta L/L \simeq -(2-3)\%$ .
- Фон ОТИ  $f_{bg}$  на остаточном газе меняется в зависимости от тока, энергии, состояния вакуумной системы и составляет 3–5%. Периодические калибровки с разведёнными пучками уменьшают его вклад в ошибку  $L$  до 0.5%.

Все поправки определялись только по информации с монитора светимости и СР-РЭ. Точность измерения относительной светимости можно определить сравнивая измерения с электронной и позитронной сторон. Как видно по рис. 48, разница  $(L^-/L^+ - 1)$  имеет разброс  $(3 \div 4)\%$ . Таким образом, точность среднего составляет около  $3\%$ .

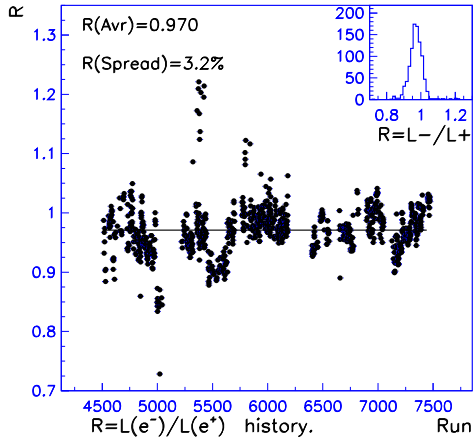


Рис. 48: Отношение измерений светимости по электронному и позитронному мониторам в зависимости от номера захода за 2 года экспериментов.

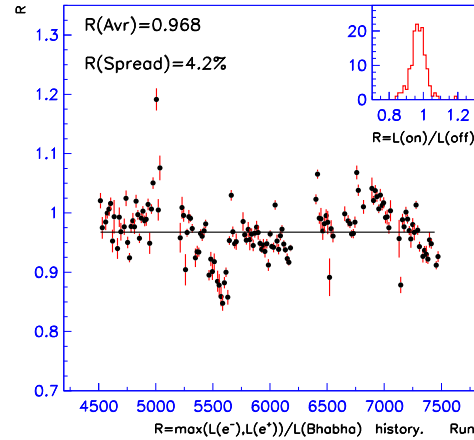


Рис. 49: Отношение интегральной светимости по оперативным измерениям и по Баба-событиям, попавшим в CsI калориметр, в зависимости от номера захода.

Ошибку нормировки можно определить, сравнивая интегральную светимость по мониторам со светимостью, даваемой числом Баба-событий в торцевом калориметре КЕДРА. Результаты сравнения показаны на рис. 49. Поскольку основная ошибка для монитора светимости связана с потерей  $\gamma$ -квантов в веществе, для измерения оперативной светимости берётся максимальное из двух измерений. С учётом ошибки в определении сечения регистрации Баба-событий в  $(2 \div 3)\%$ , это подтверждает точность измерения светимости по ОТИ  $\Delta L/L = (3 \div 4)\%$ .

## 13 Система регистрации рассеянных электронов

### 13.1 Введение

Наряду с процессами однофотонной аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow X$  (рис. 50a), значительный интерес представляют, так называемые, двухфотонные процессы вида  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- X$ , идущие через канал с двумя виртуальными фотонами  $\gamma^*\gamma^* \rightarrow X$  (рис. 50b). Эти процессы позволяют изучать на  $e^+e^-$ -коллайдерах  $C$ -чётные конечные состояния, которые не рождаются в однофотонном канале. Обзоры теоретических положений и современного состояния двухфотонной физики можно найти в публикациях [71, 72, 73].

Выражение для дифференциального сечения процесса 50b содержит в знаменателе массы виртуальных фотонов  $q_i^2$  (11). При  $q_i^2$  близких к 0 оно максимально. Поэтому основное сечение процесса характеризуется малыми поперечными импульсами участвующих частиц. В частности, рассеянные электроны, в основном, летят вдоль пучка до ближайшего магнитного элемента структуры ускорителя.

Существует два подхода к изучению этих процессов. В первом случае параметры рождённой системы восстанавливают только по продуктам распада, зарегистрирован-

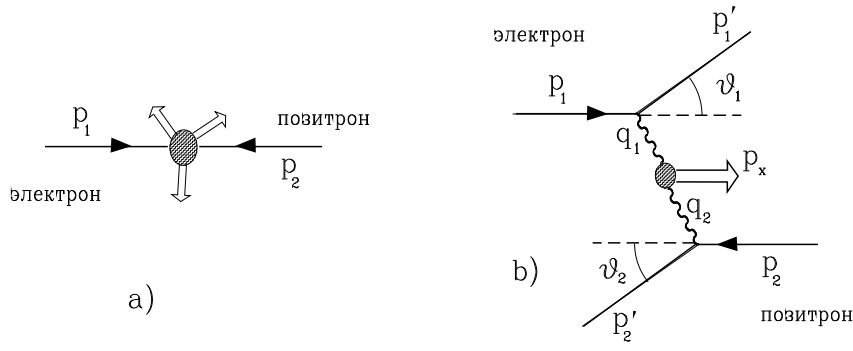


Рис. 50: а) Аннигиляция электрона и позитрона. б) Двухфотонное взаимодействие электрона и позитрона.

ным в центральной части детектора. Малость поперечного импульса системы является основным параметром для выделения таких событий. Это так называемый *po-tag* метод, применяемый на большинстве детекторов. Он достаточно хорошо работает при изучении малочастичных конечных состояний рождённой системы  $X$ .

Если детектор может регистрировать обе рассеянные частицы пучков (для краткости назовём их рассеянными электронами (РЭ)), то параметры рождённой системы можно определить независимо от центральной части. Это так называемый *double-tag* метод. Инвариантная масса рождённой системы  $W$  и квадраты масс виртуальных фотонов  $q_i^2$  при малых углах рассеяния РЭ выражаются простыми формулами:

$$W^2 \approx 4\omega_1\omega_2 = 4(E_b - E_{e^-})(E_b - E_{e^+}), \quad (11)$$

$$q_i^2 \approx -E_b(E_b - \omega_i)\vartheta_i^2, \quad i = 1, 2,$$

где  $\omega_i$  — энергии виртуальных фотонов,

$E_{e^+,e^-}$  — энергии РЭ,

$\vartheta_i$  — углы РЭ,

$E_b$  — энергия пучка.

В промежуточном случае регистрация одного РЭ (метод *single-tag*) даёт дополнительную информацию для кинематической реконструкции в центральной части детектора и помогает подавлению фона.

Большинство детекторов могут регистрировать РЭ, когда угол рассеяния  $\gtrsim 10^\circ$ . При этом эффективность регистрации не превышает нескольких процентов, а разрешение по энергии фотона  $\sigma(\omega)/E_b \sim (1 \div 5)\%$ . Эффективность можно существенно повысить с помощью специальной системы регистрации рассеянных электронов (СР-РЭ), которая может измерять энергию РЭ, вылетающих из места встречи вдоль оси пучков.

В 1984–1985 гг. подобная система работала на детекторе МД-1 на коллайдере ВЭПП-4. Описание системы и результаты работы можно найти в [74]. Новая система регистрации РЭ, разработанная для детектора КЕДР, имеет заметно бóльшую эффективность и на порядок лучшее разрешение по инвариантной массе. Физические принципы проекта СРРЭ описаны в [75, 76]. Перейдём к описанию этой системы.

## 13.2 Общее описание

### 13.2.1 Принцип работы

Используя оптику дублета квадрупольных линз, предназначенных для получения малой  $\beta$ -функции в месте встречи, и поворотные магниты, был спроектирован двухплечевой фокусирующий магнитный спектрометр для измерения энергии РЭ. Части системы регистрации расположены вдоль вакуумной камеры на удалении 9–17 метров от места встречи (рис. 51), где рассеянные электроны и позитроны, потерявшие часть энергии, выводятся с равновесной орбиты с помощью магнитного поля поворотных магнитов.

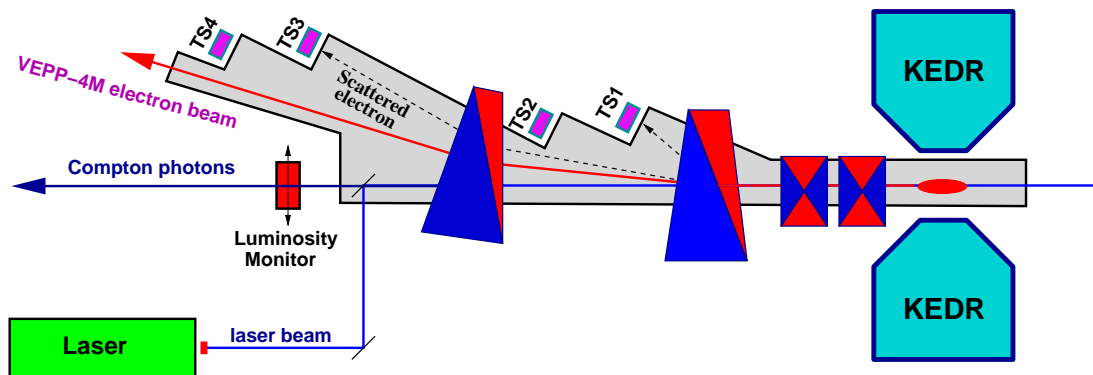


Рис. 51: Схема экспериментального промежуточного ВЭПП-4М для электронного направления (вид сверху). После детектора РЭ проходят фокусирующие линзы и поворотные магниты за которыми расположены блоки СРРЭ (TS1–TS4). Слева показан монитор светимости (LM) и схема заведения лазерного луча для получения комптоновских фотонов.

В магнитном спектрометре с фиксированной точкой вылета необходимо измерять координату и угол рассеянного электрона. Как правило, ошибка измерения угла ограничивает точность определения энергии. В фокусирующем спектрометре достаточно измерять координату, но точка фокусировки двигается вдоль орбиты в зависимости от энергии РЭ. Чтобы отслеживать смещение фокуса, наша система регистрации разбита на четыре отдельных блока, которые размещены вдоль вакуумной камеры, как показано на рис. 51. Для каждого блока имеется своя характерная энергия РЭ, где компенсация углового разброса (рис. 52) оптимальна, см. таблицу 11.

Таблица 11: Проектные параметры блоков СРРЭ.

СР	Рабочая область	Диапазон энергии $E_S/E_b$	Энергия фокусировки	$\sigma(E_S)/E_b$ для 90% РЭ	$\sigma(\omega)/\omega$ для 90% фотонов
1	7.7 см	0.39 – 0.59	0.59	0.996 %	1.29 %
2	4.3 см	0.60 – 0.72	0.66	0.245 %	0.64 %
3	8.9 см	0.73 – 0.85	0.79	0.141 %	0.67 %
4	15.8 см	0.87 – 0.98	0.89	0.114 %	0.81 %

Вклад углового разброса пучка в энергетическое разрешение минимален в центре и возрастает на краях блока. В такой геометрии для частиц, вылетающих из места



встречи с поперечной координатой  $X_0$  (в плоскости орбиты) под нулевым углом, выполняется соотношение

$$X_{tr} = a \frac{E_b}{\tilde{E}_S} + b + X_0,$$

где  $X_{tr}$  — измеренная в СРРЭ поперечная координата трека,

$\tilde{E}_S$  — истинная энергия рассеянного электрона,

$a, b$  — геометрические параметры, зависящие от параметров магнитной системы

и

положения координатных блоков.

Параметр  $a$  для блоков TS1–TS4 меняется в пределах 100–1100 мм. Нелинейные поправки для вычисления  $E_S$  составляют  $\Delta E_S/E_b \sim 10^{-3}$  и в настоящее время не учитываются. Ошибка измеренного значения энергии РЭ  $E_S$  определяется координатным разрешением блока, размером места встречи (т.к. мы знаем только среднее для  $X_0$ ) и остаточным вкладом углового разброса.

Энергия излученного фотона равна

$$\omega = E_0 - \tilde{E}_S \approx E_b - E_S,$$

где  $E_0$  — начальная энергия электрона, отличная от  $E_b$  из-за наличия энергетического разброса в пучке  $\sigma_E$ , а  $E_S$  — измеренная энергия РЭ.

В нашем случае (это зависит от оптики ускорителя) для частиц в пучке есть сильная корреляция между координатой РЭ в месте встречи  $X_0$  и величиной  $(E_b - E_0)$ . Благодаря этому, ошибка в  $E_0$  в значительной мере компенсируется смещением в определении  $E_S$ . Расчётное разрешение для фотонов с учетом всех факторов показано на рис. 52.

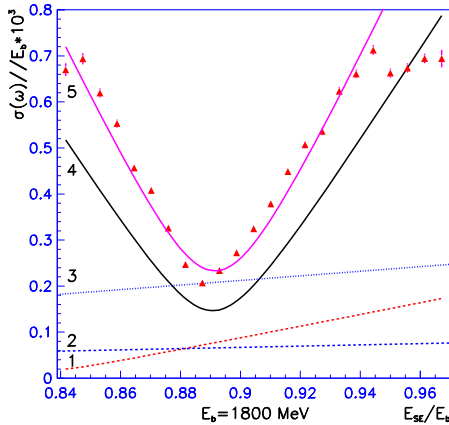


Рис. 52: Расчётное разрешение по энергии излученного фотона. Линии соответствуют вкладам: 1 — энергетического разброса в пучке  $\sigma(E_b)/E_b = 4 \cdot 10^{-4}$ ; 2, 3 — измерения координаты трека с точностью 0.1 и 0.3 мм; 4 — углового разброса в пучке. 5 — суммарное разрешение для  $\sigma(track) = 0.1$  мм.

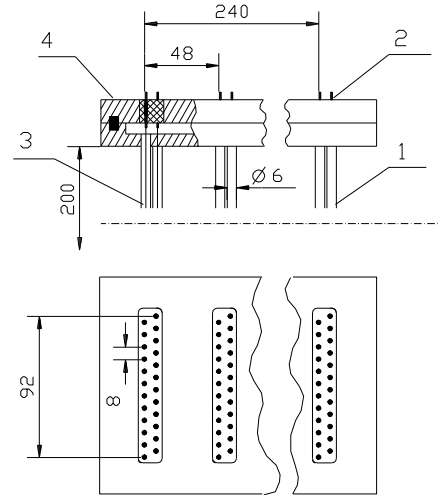


Рис. 53: Годоскоп дрейфовых трубок. 1 — дрейфовая трубка, 2 — анодный пин, 3 — анодная проволочка, 4 — фланец.

### 13.2.2 Конструкция координатных блоков

Система состоит из двух наборов по четыре блока, расположенных по обе стороны от места встречи. Каждый координатный блок сконструирован в виде единого жёсткого модуля. Шесть блоков имеют ширину около 90 мм и два блока имеют удвоенный размер. Вертикальный размер системы 200 мм заведомо избыточен, поскольку большинство рассеянных электронов лежит в полосе  $\pm 5$  мм от плоскости орбиты.

Схематический чертёж блока показан на рис. 53. Каждый блок содержит 6 двойных слоев дрейфовых трубок, измеряющих отлёт РЭ от оси пучка в плоскости орбиты. Каждый слой состоит из двух рядов трубок из нержавеющей стали с толщиной стенки 90 мкм и диаметром 6 мм, расположенных с шагом 8 мм. Трубки фиксируются в отверстиях фланцев из стеклотекстолита. Расстояние между слоями 48 мм. Толщина стенок трубок обеспечивает достаточную защиту от мягкого синхротронного излучения и не приводит к существенному рассеянию регистрируемых частиц.

Анодные проволочки изготовлены из позолоченной вольфрамовой проволоки диаметром 28 мкм и закрепляются в пинах с натяжением 70 г. Пины выступают из стеклотекстолитовых фланцев и соединяются с камерной электроникой. Вклад механической точности изготовления блока в координатное разрешение составляет около 50 мкм. Анодные проволочки смещены относительно центра трубок на 300 мкм, причём знак смещения в соседних двойных слоях разный. Это позволяет устранить неопределённость “лево-право” при восстановлении трека. Выбранная конструкция обеспечивает от 6 до 12 измерений координаты РЭ, обеспечивая достаточную избыточность для реконструкции сложных событий.

Все трубки в координатном блоке составляют единый газовый объем. Для этого верхний и нижний фланцы системы сделаны двойными. В отверстия нижней части с помощью проводящего клея вклеены трубки, в верхнюю часть вклеиваются стеклотекстолитовые вставки с отверстиями для пинов. В герметизированный промежуток между фланцами подаётся газовая смесь.

### 13.2.3 Газовая смесь

СРРЭ работает в условиях высокой загрузки от выбывающих частиц пучка и синхротронного излучения. При светимости  $10^{31}$  см<sup>-2</sup>см<sup>-1</sup> в наиболее загруженных местах суммарный заряд может достигать (1–2) Кл/см за год работы, что может приводить к радиационному старению. Поэтому для использования в системе была выбрана смесь  $\text{CF}_4 + 10\% \text{iC}_4\text{H}_{10}$ , известная своей радиационной стойкостью. Кроме того, электроника была настроена на низкий коэффициент газового усиления — около  $10^5$ . На прототипе системы была достигнута доза 7 Кл/см без заметного снижения коэффициента газового усиления. Это означает, что в течение нескольких лет непрерывной эксплуатации системы не должно наблюдаться существенного ухудшения её характеристик. Кроме того, для уменьшения эффектов старения предусмотрена возможность вертикального смещения блоков.

### 13.2.4 Регистрация сигналов

Высокое напряжение подаётся на анодные проволочки через сопротивления номиналом 300 кОм для развязки по входному сигналу. Сигнал проволочки на вход предусилителя подаётся через разделительный конденсатор. Ёмкость конденсатора равна 600 нФ, что позволяет пропускать без искажений сигналы с длительностью в несколько микросекунд. Каждый блок запитывается от отдельного высоковольтного источ-

ника. Рабочее напряжение составляет 1.9–2.2 кВ и подбирается для каждого блока индивидуально для получения хорошей эффективности к треку.

Камерная электроника выполнена в виде стандартных механически защищённых модулей, которые надеваются контактными гнездами на анодные пины и крепятся к фланцам СРРЭ. Каждый модуль камерной электроники содержит 12 независимых каналов. Сигнал с проволоочки усиливается с помощью низкошумящего предусилителя и далее подаётся на усилитель-формирователь, порог которого регулируется внешним напряжением. Длительность сигнала после предусилителя составляет около 30 нс, мёртвое время после срабатывания – около 60 нс, минимальный порог  $\sim 3 \cdot 10^{-15}$  Кл. Полное число каналов системы равно 1440.

Выходной логический сигнал подаётся в пультовую для измерения времени дрейфа. Время измеряется с помощью Т-платы [64] с дискретностью 2 нс, при максимальном времени дрейфа около 30 нс. Счёт в каждом канале начинается по приходу сигнала и продолжается до общего сигнала “стоп” от триггера. Если “стоп” не приходит после 512 отсчётов (время обращения пучка), то производится “сброс”, после чего канал снова готов к приёму следующего сигнала. Вклад электроники в координатное разрешение составляет около 0.12 мм, при ожидаемом разрешении 0.35–0.45 мм. Эффективность большинства трубочек 95–100%. В основном, потеря эффективности происходит от неисправностей электроники и наводок от соседних каналов. Даже при 90% эффективности всех трубок вероятность потери трека не превышает 1%.

### 13.3 Исследования на тестовом пучке

Параметры СРРЭ были измерены во время тестовых заходов на прототипах калориметра для детектора BELLE в 1996–1999 гг. [77, 78, 79]. Для получения калибровочного пучка использовался процесс комптоновского рассеяния монохроматических лазерных фотонов на электронах пучка. Спектр рассеянных фотонов представляет собой относительно плоское плато с резким краем при максимальной энергии (при лобовом столкновении)

$$\omega_{max} = 4\gamma^2\omega_0 / (1 + 4\gamma\omega_0/m), \quad (12)$$

где  $\omega_0$  — энергия начального фотона,  $m$  — масса электрона,  $\gamma$  — релятивистский фактор пучка.

Спектр рассеянных электронов лежит в пределах от  $(E_b - \omega_{max})$  до  $E_b$ . Размытие края спектра около энергии  $(E_b - \omega_{max})$  полностью определяется энергетическим разрешением СРРЭ (рис. 52). Используя лазер, работающий на двух модах с энергией фотонов  $\omega_0=1.165$  эВ и  $\omega_0=2.33$  эВ, и изменяя энергию пучка в пределах  $E_b=1.8$ –4.5 ГэВ, мы измерили разрешение СРРЭ в 15 точках, отвечающих энергиям рассеянных фотонов от 150 МэВ до 550 МэВ.

Для лучшего изучения энергетического разрешения СРРЭ один блок был дополнен микростриповой газовой камерой (МСГК), изготовленной в нашей лаборатории [80]. Ширина стрипов данной МСГК равна 200 мкм, что позволяло иметь разрешение по координате трека около 60 мкм. Результаты измерений показаны на рис. 54, 55. Трек восстанавливался в годоскопе и продолжался до пересечения с МСГК. Затем выбиралась отметка в МСГК, ближайшая к точке пересечения. Разница координат показана на рис. 54. Полученная точность измерения координаты трека только по трубочкам составляет около 330 мкм, что вносит заметный вклад в энергетическое разрешение вблизи точек фокусировки (см. рис. 52).

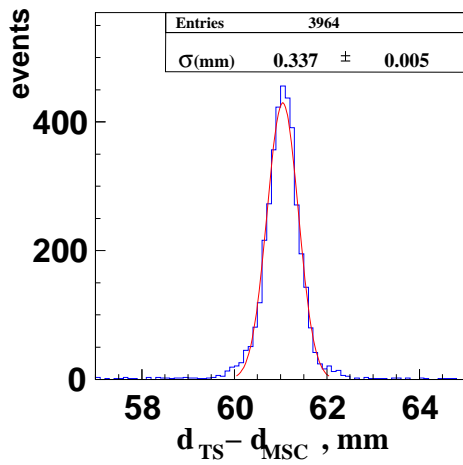


Рис. 54: Разность координат трека, измеренных в СРРЭ и в микростриповой газовой камере.  $\sigma = 0.337 \pm 0.005$  мм.

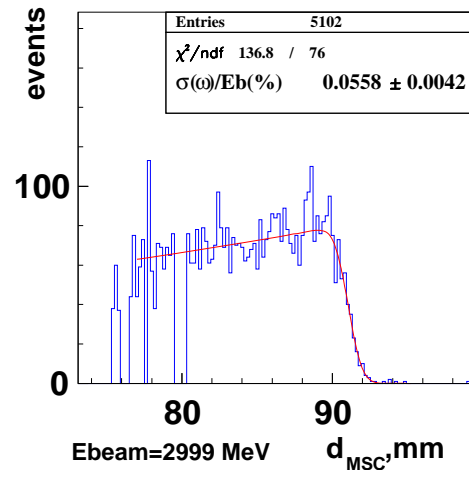


Рис. 55: Пример комptonовского спектра, полученного с помощью МСГК. Ширина края (около 0.7 мм) пересчитывается в разрешение по энергии фотона  $\sigma(\omega)/E_b = (0.058 \pm 0.0042)\%$ .

Пример наблюдаемого спектра комptonовского рассеяния приведён на рис. 55. Провалы в распределении соответствуют мёртвым зонам в МСГК (неисправности электроники). Разрешение по энергии РЭ составляет около  $6 \cdot 10^{-4} \cdot E_b$ . Результаты измерений для ширины края, пересчитанные в разрешение по энергии фотона, показаны на рис. 56.

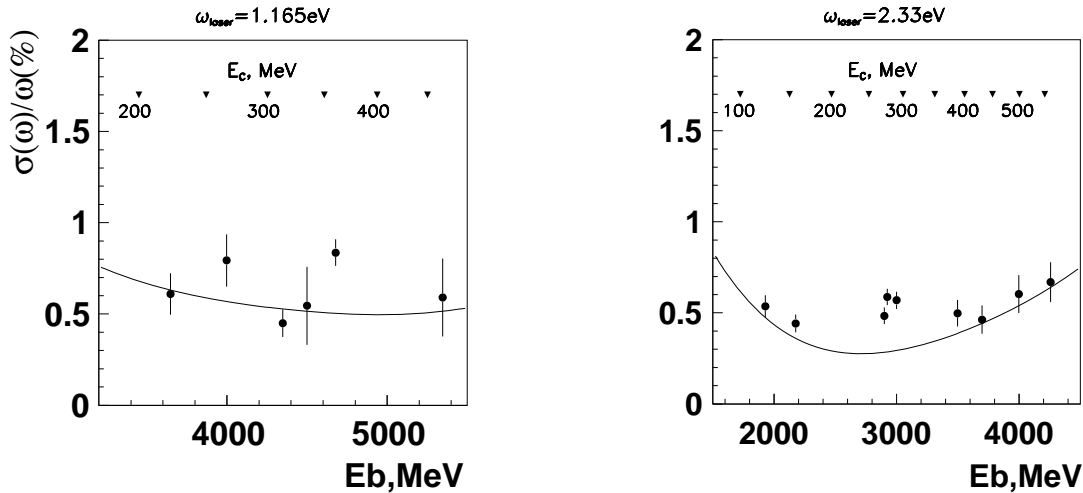


Рис. 56: Сравнение экспериментальных данных (точки с ошибками) и расчёта ширины края спектра (линия) для гармоник лазера  $\omega_0=1.165$  эВ (слева) и 2.33 эВ (справа). Треугольниками вверху показана величина  $\omega_{max}$  (12) (на рисунке она обозначена  $E_c$ ) в зависимости от энергии пучка  $E_b$ .

Таким образом, в диапазоне энергий рассеянных фотонов 150–550 МэВ разрешение составило  $\sigma(\omega)/\omega \simeq 0.5\%$ . Наблюдается удовлетворительное согласие расчётов и экспериментальных данных. Заметное расхождение с расчётами есть лишь в области наилучшего разрешения, что может быть связано с неточным знанием размера и аксептанса пучка в ускорителе.

### 13.4 Детекторы на основе трёх-каскадных ГЭУ

В результате успешной работы с МСГК было решено провести модификацию СРРЭ. Использованная МСГК позволяла измерять только одну координату, кроме того, подобный тип камер не обеспечивает долговременной стабильности. Поэтому было решено применить другой тип детекторов – на основе многокаскадных газовых электронных умножителей (ГЭУ) [81]. Это позволяет не только улучшить энергетическое разрешение СРРЭ, но и даёт возможность измерять вертикальную координату трека, что может быть использовано для подавления фона однократного тормозного излучения.

Детекторы на основе газовых электронных умножителей для СРРЭ (ГЭУ-СРРЭ) включают в себя каскад из трёх ГЭУ, расположенных на расстоянии 1.5 мм друг от друга, как показано на рис. 57.

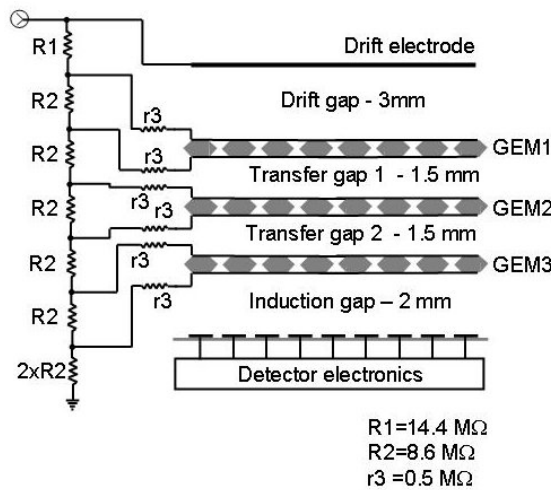


Рис. 57: Схема детектора ГЭУ-СРРЭ с высоковольтным делителем. Рабочее напряжение на детекторе составляет 3.3 – 3.6 кВ.

Каждый ГЭУ имеет гексагональную структуру из отверстий диаметром 80 мкм, расположенных на расстоянии 140 мкм друг от друга. Расстояние между нижним ГЭУ и считывающей полосковой структурой равно 2 мм, расстояние от верхнего ГЭУ до высоковольтного дрейфового электрода составляет 3 мм. Считывающая полосковая структура имеет два параллельных слоя, её структура схематично показана на рис. 58. Верхний слой (прямые полоски, обозначенные на рисунке светлым оттенком) состоит из полосок шириной 60 мкм. Нижний слой ("наклонные" полоски, обозначенные на рисунке чёрным) состоит из полосок шириной 150 мкм, которые разделены на прямые секции и наклонные переходные участки, соединяющие прямые секции так, что в среднем полоски наклонены на определённый угол по отношению к верхнему слою. Такая структура полосок обеспечивает равномерное наведение сигнала на полоски, которое не зависит от координаты трека частицы. Соотношение ширины прямых и наклонных полосок выбрано таким образом, чтобы сигналы, наведённые на оба типа полосок, совпадали по величине.

Общий вид и габариты платы с полосковой структурой показаны на рис. 59. Плоскость орбиты в накопителе расположена перпендикулярно прямым полоскам (горизонтально на рисунке) на расстоянии 50 мм от верхнего обреза детектора. На рисунке

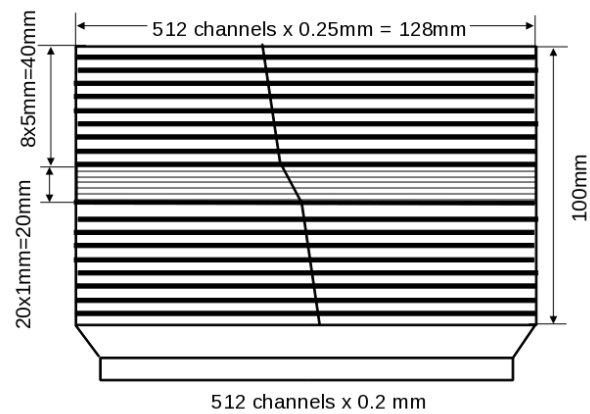
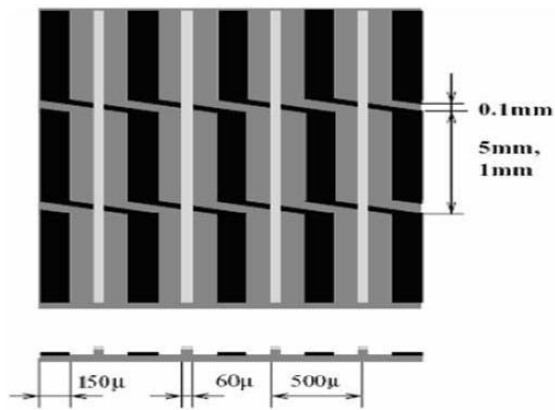


Рис. 58: Конфигурация двух-слойной по- лосковой считывающей структуры с пря- мым верхним и наклонным нижним слоя- ми.

Рис. 59: Устройство и габариты считыва- ющей платы с переменным углом наклона полосок нижнего слоя.

схематично изображена центральная область шириной 20 мм, где эффективный наклон полосок нижнего слоя составляет  $30^\circ$ , и внешние области детектора, где угол наклона полосок близок к  $11^\circ$ . Горизонтальные линии в этих областях условно обозначают зоны перехода полосок нижнего слоя. Такие зоны во внешних областях расположены с шагом 5 мм, а во внутренней области имеют шаг 1 мм. Наклонная линия в центре рисунка показывает характер изменения наклона полосок нижнего слоя. Такая структура позволяет иметь хорошее пространственное разрешение по вертикали вблизи плоскости орбиты, и, одновременно, уменьшает вероятность ошибок при ассоциации кластеров в разных координатах в двумерной картине при одновременном попадании нескольких частиц.

Так же, как и блоки СРРЭ на основе дрейфовых трубок, детекторы на основе ГЭУ изготовлены двух типов. Станции TS4 на обоих направлениях оборудованы детекторами с размером чувствительной области  $256 \times 100 \text{ мм}^2$ , станции TS1–TS3 оборудованы детекторами размером  $128 \times 100 \text{ мм}^2$ . Большие детекторы имеют 1024 каналов (512 каналов в верхнем слое и 512 каналов в нижнем слое), детекторы TS1–TS3 имеют 512 каналов (по 256 каналов в каждом слое). Детекторы работают с газовой смесью  $\text{Ar} + 25\% \text{CO}_2$ .

Каждая полоска считывающей структуры присоединена ко входу бескорпусного чипа, содержащего 128 аналоговых каналов, включающих в себя малошумящий усилитель-формирователь и две ёмкости, которые могут быть соединены с выходом усилителя-формирователя по внешнему сигналу. Кроме того в чипе содержится аналоговый мультиплексор, позволяющий последовательно вычитывать содержимое ёмкостей всех каналов с частотой 1 МГц. Электроника детекторов содержит 4 или 8 таких чипов, в зависимости от количества каналов. При каждом столкновении электронов и позитронов выходной сигнал усилителей-формирователей во всех каналах коммутируется на ёмкость, и сигнал запоминается. В том случае, если после этого приходит сигнал от первичного триггера (ПТ), запускается процесс вычитывания и оцифровки.

Вычитывание и оцифровка происходит под управлением контрольного блока (КБ). Система содержит 2 КБ, по одному на электронную и позитронную сторону. КБ содержит 4 АЦП, память на 8 событий, считанных из 4-х детекторов плеча, а также

программируемую логическую матрицу (ПЛМ), которая содержит программу управления детекторной электроникой. КБ размещены в крейтах КАМАК на экспериментальном промежутке ВЭПП-4М рядом с соответствующими плечами СРРЭ.

Считанные и оцифрованные данные из памяти КБ передаются в компьютер по линиям Ethernet со скоростью 100 Мбит/сек. После того, как событие считано из детекторов, оцифровано и передано в компьютер, управляющий работой системы, из данных вычитаются пьедесталы, удаляются каналы, не содержащие информации (подавление нулей) и оставшаяся полезная часть данных передаётся в центральный компьютер системы сбора данных. Общее время на обработку события без учёта времени, затрачиваемого на передачу данных в систему сбора данных, составляет не более 2 мс. Более подробное описание устройства детекторов на основе ГЭУ и системы управления и сбора данных представлено в [82, 83, 84].

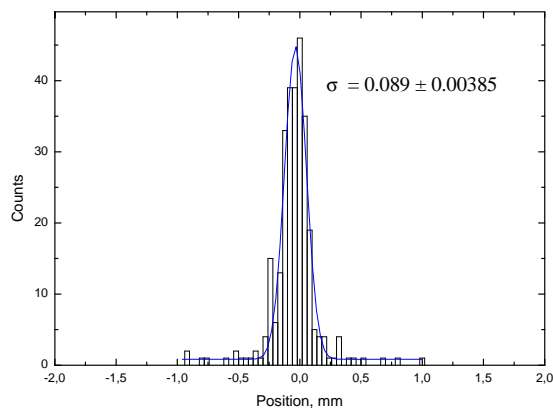


Рис. 60: Распределение отклонений измеренной координаты трека от вычисленной с детекторов. Пространственное разрешение одного детектора  $\simeq 73$  мкм.

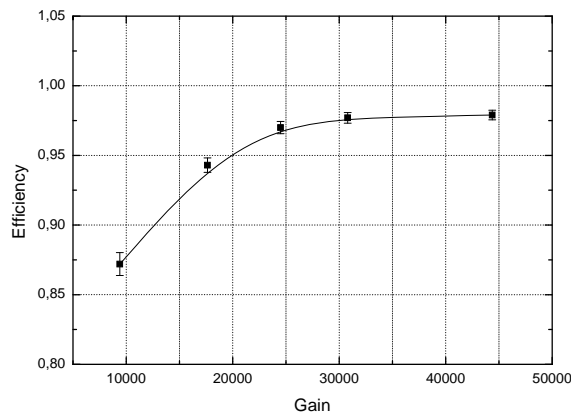


Рис. 61: Эффективность детектора на основе ГЭУ в зависимости от коэффициента газовой усиления.

Основные характеристики детекторов ГЭУ-СРРЭ были измерены на специальном стенде на космических частицах [83]. Стенд состоял из трёх одинаковых детекторов ГЭУ-СРРЭ и двух запускающих сцинтилляционных счетчиков. Два детектора использовались для локализации трека, а средний детектор для исследования характеристик. На рис. 60 показано распределение разности измеренной координаты события в исследуемом детекторе и вычисленной координаты точки пересечения трека и плоскости детектора. Ширина распределения составляет 89 мкм, что соответствует разрешению одной камеры  $\sigma_{det} \simeq \sigma_{meas}/\sqrt{3/2} \simeq 73$  мкм в направлении перпендикулярном полоскам верхнего слоя. Разрешение в направлении вдоль полосок в центральной зоне детектора, измеренное аналогичным образом, составляет 220 мкм. Эффективность детектора, как функция коэффициента газовой усиления, показана на рис. 61. Видно, что эффективность выходит на плато на уровне  $\sim 98\%$  при величине газовой усиления  $2.5 \cdot 10^4$ . Следует отметить, что в течение сезона 2009-1010 детекторы ГЭУ-СРРЭ работали при газовом усилении в диапазоне  $(3 - 6) \cdot 10^4$  без пробоев и других видимых проблем, связанных с высоким напряжением.

### 13.5 Физические параметры

Параметры системы регистрации довольно сложным образом зависят от магнитной структуры ВЭПП-4М, параметров пучка в ускорителе и энергии рассеянного элек-

трона. Из-за переделки магнитных линз вблизи места встречи точка фокусировки РЭ значительно сместилась. В результате этого энергетическое разрешение СРРЭ во время набора данных в 2005–2010 гг заметно ухудшилось. После запланированного ремонта детектора структура ВЭПП-4М будет возвращена к проектным параметрам.

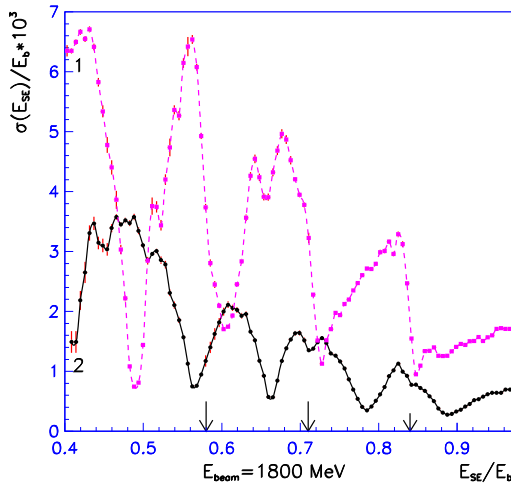


Рис. 62: Энергетическое разрешение СРРЭ для рассеянного электрона при энергии пучка 1.8 ГэВ. Линия 1 соответствует текущей магнитной структуре ВЭПП-4М, линия 2 — оптимальной структуре с ”правильной” фокусировкой. Стрелками отмечены границы блоков СРРЭ.

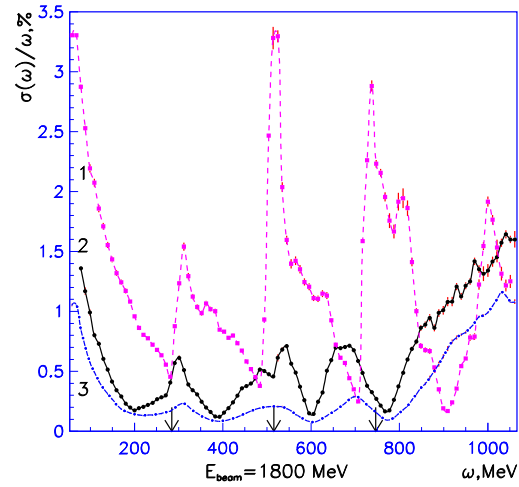


Рис. 63: Энергетическое разрешение  $\sigma(\omega)/\omega$  для излученного фотона. Линии 1,2 соответствуют двухфотонным событиям с текущей и оптимальной структурами ВЭПП-4М. Линия 3 показывает разрешение для реальных фотонов в событиях ОТИ при оптимальной структуре.

Для энергии пучка 1.8 ГэВ результаты расчётов представлены на рис. 62, 63. Результаты приведены для рабочего и оптимального вариантов структуры ВЭПП-4М. Для энергии 5 ГэВ относительное разрешение несколько ухудшается, поскольку угловой и энергетический разброс в пучке растут пропорционально квадрату энергии. На рис. 62 показано разрешение по энергии РЭ. Для других детекторов, где регистрация РЭ производится в калориметре или дрейфовой камере, разрешение обычно составляет несколько процентов. Разрешение по энергии излученного фотона для двухфотонных событий показано на рис. 63. Разрешение для реальных фотонов в событиях ОТИ несколько лучше, чем для двухфотонных событий, из-за меньшего углового разброса излученных фотонов. Как видно из рисунка, можно получать меченные фотоны с разрешением около 0.5% в широкой области энергий, в то время как лучшие калориметры имеют в этой области разрешение  $\sigma(\omega)/\omega \geq 2\%$ .

Расчётное энергетическое разрешение по инвариантной массе  $M_{\gamma\gamma}$  для событий с регистрацией двух РЭ показано на рис. 64. Из-за наличия хвостов, разрешение определялось по ширине распределения  $\Delta M = M_{\gamma\gamma} - M_{MC}$  как  $\sigma = \text{FWHM}/2.36$  ( $M_{\gamma\gamma}$  вычислялось по формуле (11),  $M_{MC}$  — инвариантная масса  $\gamma\gamma$ -системы в моделировании). Ожидаемое разрешение на порядок лучше разрешения других подобных систем, что позволяет надеяться на качественно новый уровень изучения двухфотонных процессов.

На рис. 65 показана эффективность регистрации события с хорошим измерени-



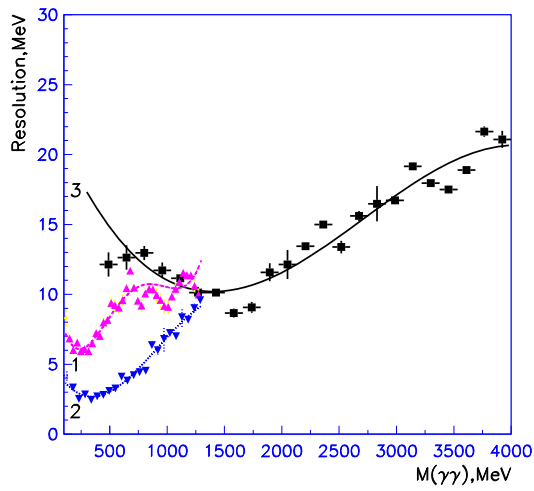


Рис. 64: Разрешение по инвариантной массе  $\gamma\gamma$ -системы. Линии 1,2 показывают разрешение при энергии пучка 1.8 ГэВ для текущей и оптимальной структур ВЭПП-4М, линия 3 — для оптимальной структуры при энергии пучка 5 ГэВ.

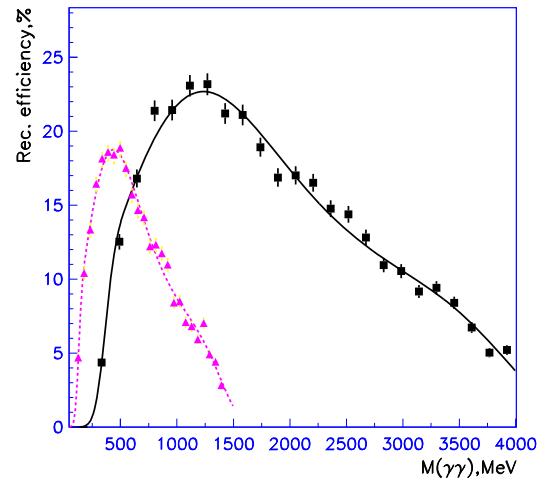


Рис. 65: Вероятность реконструкции  $\gamma\gamma$ -события с хорошим измерением энергии при энергии пучка 5 ГэВ (правая кривая) и 1.8 ГэВ (левая кривая).

ем энергии ( $\Delta M(\gamma\gamma) < 2.5\sigma$ ) для энергии пучка 5 ГэВ и 1.8 ГэВ в зависимости от инвариантной массы  $\gamma\gamma$ -системы.

## 14 Триггер

Задачей триггера является отбор из всей массы событий только тех, которые соответствуют изучаемым процессам. Все остальные события являются фоновыми и должны быть, по возможности, отброшены. При этом эффективность к полезным событиям должна быть как можно выше, потери их — как можно меньше, а примесь фоновых событий такой, чтобы загрузка на выходе триггера была приемлемой для обработки потока данных на компьютерах и последующей записи на диск.

Аппаратный триггер детектора КЕДР имеет двухуровневую структуру. Он включает в себя первичный (ПТ) и вторичный (ВТ) триггеры. Третичный триггер является программным. Временная диаграмма работы триггера показана на рис. 66.

### 14.1 Алгоритм работы триггера

Первичный триггер детектора КЕДР принимает решение за 450 нс (рис. 66). Это время меньше, чем интервал между столкновениями пучков в кольце ВЭПП-4М (620 нс), поэтому ПТ не имеет мёртвого времени и может обрабатывать каждое возникающее пучковое событие.

У первичного триггера детектора КЕДР есть только один сигнал, являющийся результатом его работы — ”Решение ПТ” или просто ”ПТ”. Он появляется, если текущее событие соответствует требованиям отбора. Импульс ”ПТ” синхронизован с ВЧ сигналом ускорителя ”Фаза”, поэтому он является временной отметкой, относительно которой измеряются времена прихода сигналов от каналов детекторов. Импульс ”ПТ”

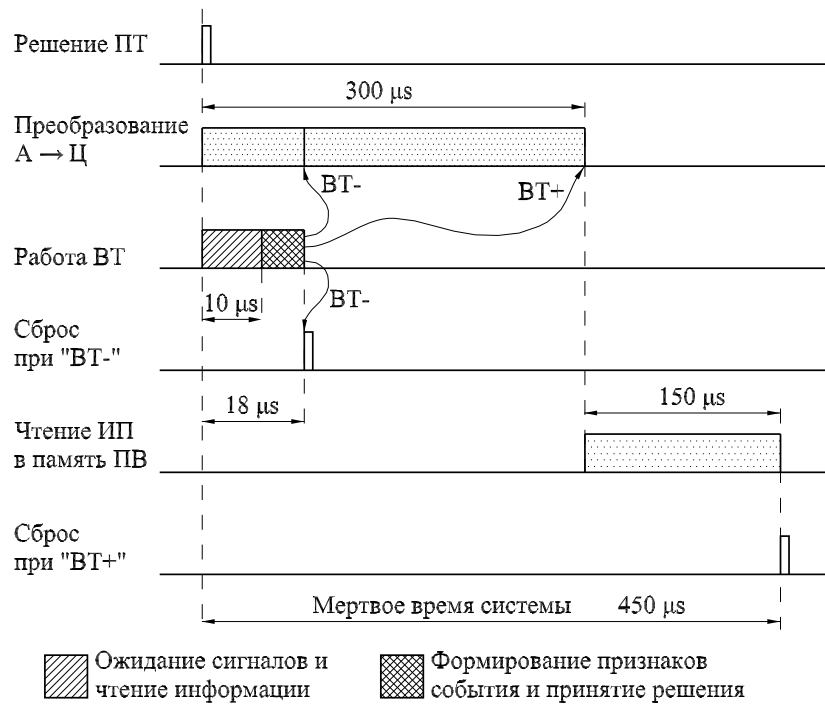


Рис. 66: Временная диаграмма связи работы триггера и системы сбора данных детектора КЕДР.

также является сигналом к началу работы вторичного триггера (рис. 66), который имеет гораздо больше времени на принятие решения и использует информацию от всех трековых подсистем детектора КЕДР и калориметров. Время полной работы ВТ составляет 18 мкс.

Вторичный триггер детектора КЕДР имеет два решения: "ВТ+" и "ВТ-" (рис. 66). Если ВТ не находит в событии требуемых признаков, то через 18 мкс после прихода импульса "ПТ" он выдаёт сигнал "ВТ-". В ответ на это в системе сбора данных (ССД) вырабатывается импульс "Сброс", по которому сбрасываются данные во всех информационных платах, ПТ и сам ВТ. Начавшиеся измерения времён и амплитуд прерываются, и ССД вместе с триггерами вновь готовы к приёму и обработке нового события. Если ВТ классифицирует данное событие как полезное, то он выдаёт сигнал "ВТ+", но не сразу, а задерживает его на 300 мкс, чтобы дать время оцифровывающим блокам электроники закончить измерения времён и амплитуд. По сигналу "ВТ+" запускается процесс чтения информации в память процессоров вывода. После того, как данные из всех информационных плат прочитаны, вырабатывается сигнал "Сброс", и система готовится к принятию нового события от детектора.

## 14.2 Первичный триггер

Блоки электроники ПТ (рис. 67) располагаются возле самого детектора. Это оптимально с точки зрения времени получения сигнала "Решение ПТ". Блоки электроники ПТ выполнены в стандарте КАМАК и занимают два с половиной крейта.

Источниками сигналов для ПТ являются три подсистемы детектора КЕДР: время-пролётная система на основе сцинтилляционных счётчиков (СЦ), торцевой калориметр на основе кристаллов йодистого цезия (CsI) и цилиндрический калориметр, заполненный жидким криптоном (LKr).

Из сигналов от СЦ блоки ПТ формируют три суммы количества сработавших счётчиков — одна для цилиндрической части и две для торцевых — и импульс длительностью 470 нс из логического ИЛИ всех каналов. Причём, если для цилиндрической части подсчитывается просто сумма всех входов, на которых появился сигнал, то для торцевых счётчиков вычисляются суммы несмежных сработавших каналов. Это связано с малым геометрическим размером торцевых СЦ вблизи пучка и, как следствие, повышенной вероятностью срабатывания двух соседних счётчиков от одной пролетевшей заряженной частицы.

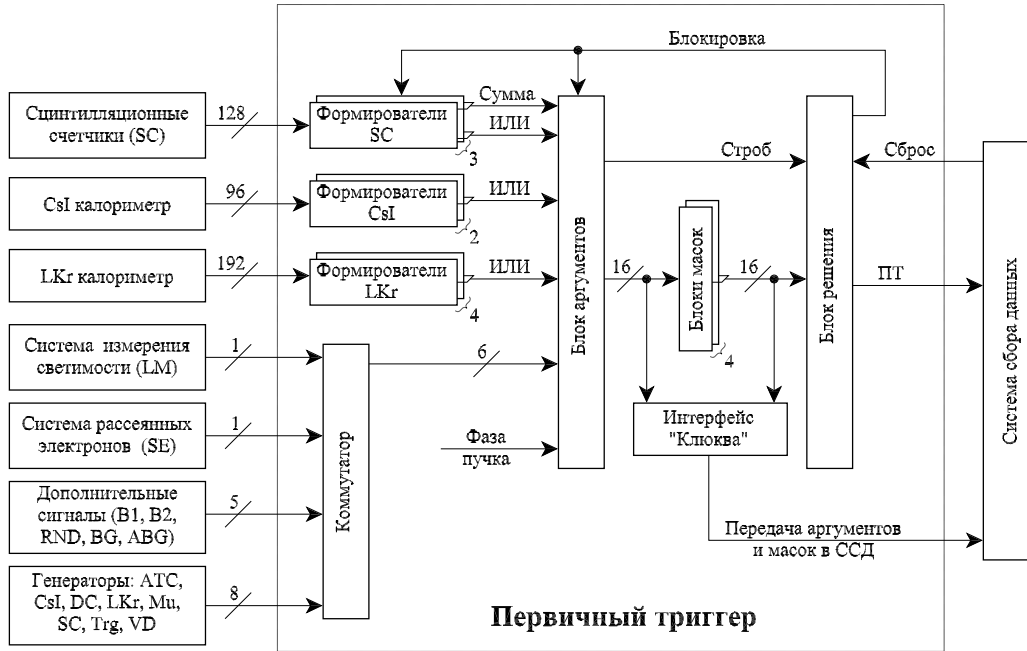


Рис. 67: Блок-схема первичного триггера.

Размер триггерного канала в калориметре должен соответствовать размеру развивающегося в детекторе ливня частиц. Поэтому отдельные кристаллы CsI объединены в группы, которые называются супербашнями (СБ). Каждая СБ содержит от 24 до 28 кристаллов CsI. Всего СБ 48 — по 24 в каждом торце. Аналоговые импульсы от отдельных кристаллов суммируются, чтобы сформировать сигнал от СБ. Далее он разветвляется на два сигнала. Один из них используется в ВТ, а другой подается на дискриминатор с регулируемым порогом для ПТ. Фоновая загрузка кристаллов CsI сильно зависит от расстояния до оси пучка. Поэтому все СБ разделены на три группы в виде колец разного радиуса, и на каждое кольцо подается свой порог для дискриминаторов ПТ. В ПТ используются два сигнала от CsI — по одному от каждого из торцов, каждый из которых представляет собой логическое ИЛИ всех дискриминаторов.

В цилиндрическом электромагнитном LKr-калориметре башни первых двух слоёв объединяются в супербашни для использования в триггере. Всего имеется 192 СБ, каждая из которых состоит из 8 башен LKr —  $2 \times 2 \times 2$  по всем трем координатам ( $r$ ,  $\phi$ ,  $z$ ). Сигналы от них, сформированные со временем 1 мкс, поступают на дискриминаторы с регулируемым порогом. Такое большое время формирования выбрано с целью уменьшения шумов дискриминаторов. Но, так как это время больше, чем время регистрации сигналов в ПТ (350 нс), то сигналы с малой амплитудой от СБ LKr

не попадают в ПТ. Поэтому порог LKr в ПТ определяется не порогом дискриминаторов, а временем, и равен примерно 300 МэВ. В ПТ есть только один сигнал от LKr-калориметра — ИЛИ всех дискриминаторов супербашен.

Всего в ПТ поступает: 128 сигналов от СЦ, 48 от CsI-калориметра, 192 от LKr-калориметра, 7 сигналов от прочих систем детектора и 8 от генераторов. Все эти сигналы используются для формирования признаков события, называемых аргументами, по которым происходит отбор полезных событий. В ПТ предусмотрены следующие аргументы.

- **CsI1** и **CsI2** — признаки срабатывания торцов CsI-калориметра.
- **LKr** — признаки срабатывания супербашен цилиндрического LKr-калориметра.
- **SC1**, **SC2**, **SC3**, **SC4** — признаки срабатывания 1, 2, 3 или 4 и более СЦ.
- **SCB1** — срабатывание СЦ в цилиндрической части.
- **SCE1** и **SCE2** — срабатывание 1 или 2 СЦ в торцах.
- **LM** — признак срабатывания системы измерения светимости ускорителя.
- **SE** — появляется при срабатывании системы рассеянных электронов.
- **ABG** — anti background. Появляется, когда нет срабатывания ближайших к пучку СБ CsI.
- **BG** — инверсия предыдущего сигнала, используется для проверки.
- **B1** и **B2** — признаки первого и второго сгустка частиц. Используются только в произведении одного на другой, что не добавляет никакой загрузки триггеру, но позволяет по записанным данным определить от какого сгустка частиц произошел запуск триггера.
- **RND** — случайный аргумент. Представляет собой сигнал с частотой около 3 Гц.
- 8 генераторных аргументов для всех систем детектора, которые служат для проверки электроники регистрации от генераторов.

Электроника ПТ может работать одновременно только с 16-ю аргументами. Поэтому первые десять описанных выше аргументов постоянно присутствуют в триггере, а остальные 15 являются коммутируемыми. То есть из них в триггере одновременно могут использоваться только 6.

Сформированные аргументы сравниваются с заранее установленными масками. Маска — это слово, состоящее из 0 и 1, в котором каждый бит соответствует одному из аргументов. Для срабатывания маски необходимо наличие всех аргументов, которым в маске соответствует 1. Таким образом, маска — это, по сути, логическое произведение аргументов. Наличие лишних, не входящих в маску, аргументов допустимо. Маска может иметь вид:  $SC2 * CSI1 * ABG$  — это означает, что триггер будет отбирать только те события, в которых одновременно сработали два СЦ (SC2), хотя бы одна супербашня в левой части CsI-калориметра (CSI1) и при этом не было срабатываний ближайших к пучку кристаллов CsI (ABG).

Результаты сравнения аргументов с масками объединяются по ИЛИ, иначе говоря, маски образуют логическую сумму. Эта сумма называется формулой ПТ. В настоящий момент при наборе статистики от пучков используется формула:

$$B1 * B2 + SC2 + CSI1 * SC1 * ABG + CSI2 * SC1 * ABG + CSI1 * CSI2 + LKR + RND + LM + SE * CSI1 + SE * CSI2 + SE * SC1$$

Для выработки положительного решения ПТ необходимо срабатывание хотя бы одного произведения (одной маски) в формуле. Максимальное количество масок в ПТ равно 16. Сравнение масок и аргументов происходит в "Блоках Масок". Результаты сравнения передаются в "Блок Решения", который и формирует сигнал "ПТ".

Информация о срабатывании аргументов и масок ПТ передаётся в ССД КЛЮК-ВА, чтобы иметь возможность считывать эти данные вместе с информацией о событии.

### 14.3 Вторичный триггер

Вторичный триггер (рис. 68) располагается в аппаратном зале КЕДРа, где сосредоточена вся оцифровывающая электроника детектора. Он занимает пять крейтов КАМАК, и еще несколько десятков интерфейсных блоков распределены по крейтам КЛЮКВА. ВТ получает сигналы от всех подсистем детектора КЕДР, за исключением аэрогелевых черенковских счётчиков.

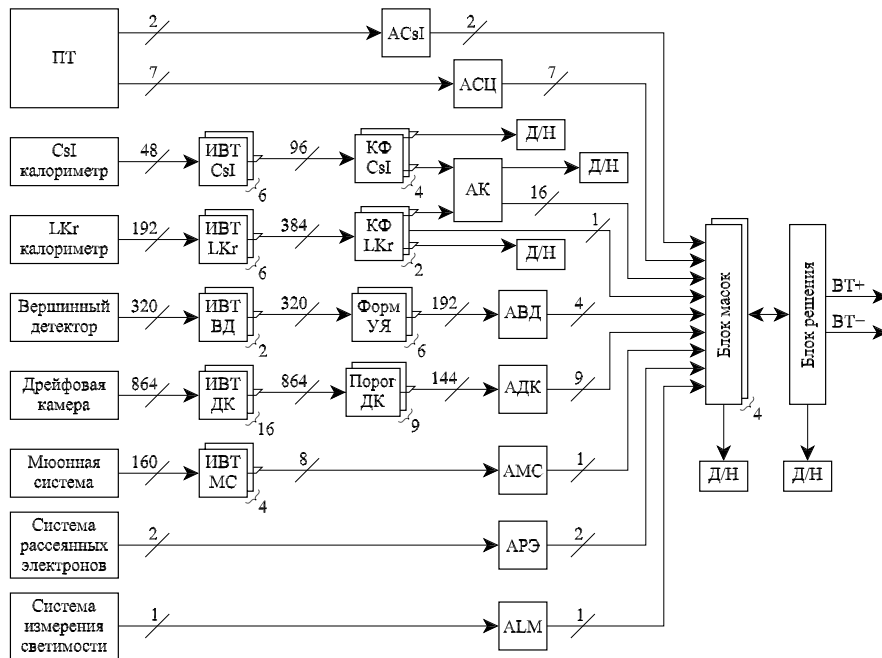


Рис. 68: Блок-схема вторичного триггера.

Из 312 дрейфовых трубок вершинного детектора (ВД) формируются 192 универсальные ячейки (УЯ) триггера, собранных в 3 суперслоя. Блок аргументов вершинного детектора (АВД) определяет количество несмежных УЯ в каждом суперслое ВД. Потом вычисляется полная сумма, и при помощи мажоритарной логики вырабатываются аргументы **VD2**, **VD3**, **VD4** и **VD5**. Они означают, что в ВД сработало не менее 2-х, 3-х, 4-х или 5-ти УЯ, соответственно.

Из дрейфовой камеры (ДК) в ВТ поступает информация только от аксиальных слоёв. В настоящий момент используются только три из них — первый, третий и пятый слой ДК. Блоки цифровых дискриминаторов ДК (ДДК) считают количество сработавших проволочек в каждой ячейке ДК и сравнивают его с установленным порогом. Ячейка считается сработавшей, если в ней есть сигнал от двух и более проволочек. Сигналы о срабатывании ячеек ДК поступают в блок Аргументов ДК (АДК), который определяет количество сработавших несмежных ячеек в каждом слое. Далее мажоритарная логика вырабатывает аргументы **DC11**, **DC12**, **DC13**, **DC21**, **DC22**, **DC23**, **DC31**, **DC32**, **DC33**. Первая цифра в названии означает номер слоя, а вторая — минимальное гарантированное число сработавших несмежных ячеек. Например, аргумент DC22 означает, что во втором слое сработало не менее двух несмежных ячеек.

Аргументы сцинтилляционных счётчиков в ВТ формирует блок Аргументов СЦ (АСЦ). Всего предусмотрено 6 признаков события для этой системы. Для формирования аргументов используются промежуточные сигналы из ПТ. Во-первых, это признаки числа сработавших каналов СЦ: **SC2**, **SC3** и **SC4**. Они используются как в самом первичном триггере, так и во вторичном. Также в ВТ формируются следующие аргументы.

- **ASCB** — признак того, что в течение 500 нс после момента встречи НЕ сработал ни один сцинтилляционный счётчик в цилиндрической (баррельной) части. Этот аргумент необходим для антисовпадения при срабатывании сигнала GEOM в цилиндрическом калориметре.
- **ASCE** — то же самое для торцевых СЦ. Этот аргумент необходим для антисовпадений при срабатывании торцевого калориметра.
- **SC1F** — признак совпадения сигналов СЦ с фазой пучка с разрешающим временем 60 нс. Так как период между столкновениями пучков составляет 620 нс, то использование этого аргумента позволяет подавить космику более чем в 10 раз.

Из аналоговых сигналов от 48-ми СБ CsI-калориметра для ВТ формируются логические сигналы о превышении двух порогов — П1 и П2. Для каждого из торцов калориметра и каждого из порогов в блоках кластерфайндеров (КФ) подсчитывается количество сработавших кластеров.

Для LKr-калориметра 192 сигнала от СБ также сравниваются с двумя порогам. Результаты работы дискриминаторов используются в КФ LKr. Также в КФ LKr вычисляется аргумент **GEOM**. Если в любом угле  $240^\circ$  по  $\phi$  есть хотя бы одна сработавшая ячейка, то аргумент **GEOM** становится равным 1.

Шесть чисел, которые являются суммами пятен от четырёх КФ CsI и двух КФ LKr, поступают в блок Аргументов Калориметров (АК). Здесь, для каждого из порогов, из них получаются суммы количества кластеров — отдельно в торцевом калориметре, и в обоих калориметрах вместе. Далее из полученной информации формируются аргументы: **ST11**, **ST12**, **ST13**, **ST14**, **SE11**, **SE12**, **SB11**, **SB12**, **ST21**, **SE21**, **SB21**, **ST22**, **SB22**. Вторая буква в названии этих аргументов указывает на систему: "Т" — весь калориметр, "Е" — только торцевой, "В" — только цилиндрический. Первая цифра — порог П1 или П2. Вторая цифра — количество кластеров. Еще один аргумент **STEE** появляется, если в обоих торцах есть СБ с порогом П2.

В мюонной системе (МС) в ВТ используются данные только от первого слоя. Из них формируется простой аргумент — логическое ИЛИ ячеек первого слоя.

Для системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) в ВТ формируются два аргумента — **SE1** и **SE2**. Первый появляется, если сработал хотя бы один сцинтилляционный счётчик СРРЭ с любой стороны, а второй — если сработали счётчики с обеих сторон.

Система измерения светимости передает в ВТ только один аргумент **LM** — это логическое ИЛИ сигналов от левой и правой частей монитора светимости.

Всего ВТ имеет 64 аргумента, которые формируются соответствующими блоками. В настоящий момент из них используется 43, остальные зарезервированы для будущего использования. Количество масок, заложенное в электронику ВТ, равно 48, но в данный момент для сокращения времени работы проверяется только 39 из них.

В процессе работы ВТ формирует большое количество промежуточной информации, которую необходимо считывать вместе с событием. Это 64 аргумента, 48 масок, суммы пятаен из шести КФ, 384 бита о срабатывании СБ с порогами П1 и П2 в LKr-калориметре и 96 бит из КФ CsI. Эти данные нужны для проверки работы самого триггера, электроники детекторов, поставляющей сигналы, измерения частоты срабатывания каналов.

## 14.4 Мёртвое время триггера

Время работы ПТ детектора КЕДР меньше периода столкновения пучков, поэтому он обрабатывает каждое пучковое событие и не имеет мёртвого времени. Его вклад в потери событий, возникающие из-за мёртвого времени, так называемые просчёты, равен нулю.

Величина просчётов ССД и триггера детектора КЕДР вычисляется по формуле:

$$\text{Просчёты} = \tau_{\text{ВТ}} \cdot F_{\text{ПТ}} + \tau_{\text{ИП}} \cdot F_{\text{ВТ}}.$$

Здесь  $F_{\text{ПТ}}$  и  $F_{\text{ВТ}}$  — частоты срабатывания ПТ и ВТ, соответственно,

$\tau_{\text{ВТ}}$  — мёртвое время ВТ,

$\tau_{\text{ИП}}$  — мёртвое время информационной платы, в которое входит время оцифровки и чтения информации в процессоре вывода.

Загрузки ПТ и ВТ при фиксированных формулах зависят от энергии, токов пучков и фоновой ситуации на ускорителе. В ходе сканирования  $\psi'$  и  $\psi(3770)$  загрузка детектора от фоновых событий равнялась 50 кГц. При этом средние частоты срабатывания ПТ и ВТ составляли 3.5 кГц и 50 Гц, соответственно. Это означает, что две ступени триггеров подавляли фон в 1000 раз. При этом просчёты ВТ равны 6.3%, просчёты ССД — 2.3%. Таким образом, общие потери ССД равны 8.6%, а КПД — 91.5%.

Эффективность выделения полезных событий триггером зависит от типа события. Для изучаемых на детекторе КЕДР физических процессов она составляет 98% — 99%.

## 15 Система сбора данных

### 15.1 Схема системы сбора данных

Электроника системы сбора данных на детекторе КЕДР основана на разработанном в институте стандарте КЛЮКВА. Полное число каналов электроники без системы ГЭУ составляет около 15 тысяч. Система ГЭУ содержит 5120 аналоговых каналов. События записываются с частотой 50–100 Гц. Средний размер записи о событии составляет 2–4 килобайта, из них на ГЭУ приходится около 160 байт. Поток данных

делится на отдельные файлы («заходы»), содержащие примерно по 300 тысяч событий (около одного гигабайта). После записи файлы заходов архивируются с помощью стандартного архиватора `gzip`, что позволяет уменьшить их размер примерно в два раза. Первичные данные дублируются на магнитных лентах.

Информация о набранных заходах помещается в специальную таблицу базы данных. При корректном завершении захода в таблицу `run_info` базы данных записываются следующие параметры захода.

1. Номер захода.
2. Статус захода — штатное либо аварийное завершение.
3. Время начала и время конца набора статистики.
4. Энергия пучков в заходе — номинальная и измеренная.
5. Электронный и позитронный ток.
6. Светимость по электронному и позитронному мониторам светимости.
7. Тип захода (экспериментальный, космическая калибровка).
8. Число прочитанных из электроники событий.
9. Общее число записанных событий.
10. Число записанных многоадронных событий (по маске вторичного триггера).
11. Число записанных событий  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ .
12. Полное время записи статистики.
13. Значение напряженности магнитного поля в детекторе.

## 15.2 Электроника

Электронная аппаратура системы сбора данных может быть разделена на камерную, регистрирующую и обрабатывающую.

Камерная электроника располагается на минимальном расстоянии от детектора и служит для усиления первичных сигналов и их формирования. Регистрирующая аппаратура принимает сигналы от камерной электроники, преобразует их в цифровой вид, отбирает полезную информацию и запоминает её. В обрабатывающей аппаратуре происходит полная или частичная обработка поступающей из регистрирующей электроники информации и её накопление на долговременных носителях (диски, ленты).

Система сбора данных детектора основана на спецкрейтах стандарта КЛЮКВА, разработанных в ИЯФ СО РАН специально для детекторов КМД-2, КЕДР, СНД [53, 35, 52]. В каждом спецкрейте могут быть размещены 16 информационных плат (ИП), предназначенных для оцифровки поступающей информации, и служебные платы — интерфейс вторичного триггера, размножитель служебных сигналов (РСС) и процессор вывода (ПВ).

Синхронизация и управление системой из нескольких спецкрейтов осуществляется специальным КАМАК-модулем (ЦСУ), сигналы от которого поступают в модули КЛЮКВА через платы РСС.



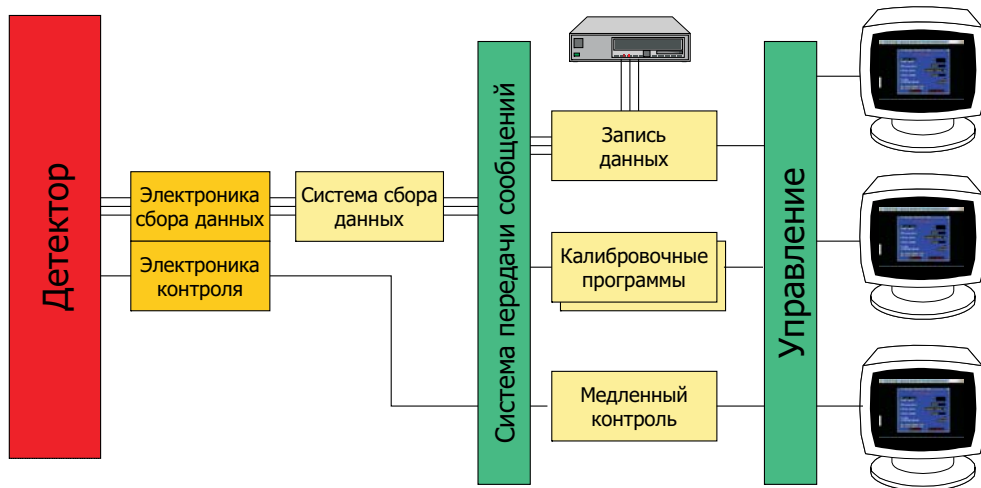


Рис. 69: Схема программного обеспечения эксперимента.

### 15.3 Программное обеспечение

Схема программного обеспечения эксперимента с детектором КЕДР приведена на рис. 69.

Программное обеспечение эксперимента делится на несколько слоёв:

- низкоуровневые процессы, исполняющиеся в режиме реального времени и непосредственно взаимодействующие с аппаратурой детектора;
- система сбора, фильтрации и записи данных;
- прикладные программы калибровки и контроля;
- система управления, связывающая все задачи прикладного уровня.

Системный уровень ПО состоит из нескольких составных частей:

- система управления прикладными задачами, обеспечивающая запуск задач прикладного уровня, поддержание их в рабочем состоянии, доступ оператора к их данным и функциям;
- средства межзадачного взаимодействия (система передачи сообщений), обеспечивающая обмен данными и управляющими сигналами между задачами, в том числе и на разных компьютерах комплекса;
- средства программно-аппаратного сопряжения (система сбора данных, система медленного контроля).

Поток экспериментальных данных с аппаратуры детектора после предварительного аппаратного отбора (первичный фильтр) достигает 1 Мб/сек. Требование исполнения в режиме real-time накладывается только на задачи, непосредственно взаимодействующие с аппаратурой детектора. Тем не менее, при проектировании и реализации задач прикладного уровня необходимо учитывать возможные задержки передачи данных через локальную сеть. Используются дополнительные механизмы для гарантии того, что ПО высокого уровня не мешает работе «привилегированных» процессов, связанных с набором данных.

Работа всех программных средств мониторинга и контроля эксперимента координируется при помощи специальной системы управления процессами. Система позволяет оператору с любого компьютера комплекса получить доступ к данным любого запущенного процесса, передавать и принимать данные, запускать и останавливать задачи. Оператор получает доступ к системе посредством специальной программы **PILOT**.

В системе управления процессами зарегистрировано порядка 40 прикладных программ различного назначения, при этом при проведении эксперимента используются 16 из них.

В течение эксперимента запущены и работают прикладные программы, перечисленные ниже в алфавитном порядке.

<b>1TRIGGER</b>	программа контроля первичного триггера, позволяющая задавать маски для аппаратного отбора событий.
<b>2TRIGGER</b>	программа контроля вторичного триггера.
<b>ALARM</b>	система оповещения о событиях на детекторе и аварийных ситуациях. Ведётся журнал срабатывания, за каждым сообщением закреплён специальный звуковой сигнал.
<b>CAMAC</b>	монитор электроники стандарта КАМАК.
<b>CSIBEAM</b>	запись порогов и выравнивание каналов электроники торцевого CsI-калориметра.
<b>DCM</b>	монитор длины поглощения газа в дрейфовой камере.
<b>LKR_PT</b>	система управления калориметром на жидком криптоне.
<b>KEDFIELD</b>	монитор магнитного поля.
<b>KLUMAN</b>	центральная часть системы считывания и отбора событий. Непосредственно считывает данные с электроники систем детектора, передаёт их на триггер, а затем — программе записи.
<b>KLUMON</b>	монитор состояния электроники стандарта КЛЮКВА — следит за текущим состоянием стоек электроники, в частности, предупреждает о перегреве.
<b>LUMON</b>	управление монитором светимости.
<b>RECORDER</b>	система записи данных и контроля состояния заходов. Основные функции — запуск, завершение, прерывание захода; установка масок триггера; отображение информации по набранной статистике и другим параметрам текущего захода.
<b>TPDB_N</b>	управление газовой системой дрейфовой камеры.
<b>VEPP4-VS</b>	монитор параметров ВЭПП-4М.
<b>VVICHE</b>	контроль высоковольтных и низковольтных источников напряжения, а также вспомогательных параметров: температур, давлений и пр.
<b>VVIMON</b>	контроль состояния высоковольтных источников питания дрейфовой камеры детектора. Контролирует работу камеры, автоматически настраивает напряжение на источниках в зависимости от экспериментальной ситуации, препятствует зажиганию коронного разряда.

На основе записанных данных ведётся журнал набора статистики, автоматически генерируются суточные, недельные и сезонные отчёты. В отчётах указывается

набранная и записанная интегральная светимость, КПД детектора, средняя мгновенная светимость ускорительного комплекса, доля времени, потраченного на различные процессы комплекса (калибровка энергии, калибровка систем детектора, профилактика, набор статистики), а также зарегистрированные неисправности систем детектора и ускорителя.

## 15.4 Контроль работы детектора

Контроль за состоянием систем детектора ведётся при помощи набора мониторирующих программ, запущенных на различных компьютерах экспериментального комплекса. При возникновении нештатной ситуации, например, перегрузке источников питания или выходе какого-либо параметра из заданного диапазона, мониторирующие программы посылают сообщение системе **ALARM**. Последняя записывает информацию о возникшем событии в журнал в базе данных и воспроизводит соответствующий событию звуковой сигнал. Сигнализация о неисправностях конкретной системы может быть отключена по запросу оператора (например, когда система детектора отключена).

Контроль за исправностью аппаратуры систем детектора и изменением параметров, систем, важных для обработки данных, осуществляется с помощью специального пакета калибровочных программ. В течение эксперимента калибровка систем проводится 1–2 раза в неделю в перерывах между набором статистики. Результаты калибровки систем сохраняются в базе данных и используются программами реконструкции набранной статистики.

## 16 Моделирование

Моделирование является неотъемлемой частью современного эксперимента в физике высоких энергий. На стадии конструирования детектора оно позволяет оптимизировать его конструкцию, при обработке эксперимента моделирование необходимо для расчёта эффективностей регистрации изучаемых процессов и фоновых процессов.

Моделирование эксперимента состоит из первичного моделирования — генераторов событий процессов, происходящих в  $e^+e^-$ -столкновениях, и вторичного моделирования — моделирования работы детектора.

Для моделирования работы детектора КЕДР был разработан пакет программ моделирования KEDRSIM. Он написан на основе пакета GEANT3.21 [85] и содержит подробное описание вещества детектора, а также подпрограммы оцифровки сигналов с учетом особенностей работы системы сбора данных для каждой из подсистем детектора. Результатом работы пакета являются данные в том же формате, что и в эксперименте. Кроме того, пакет позволяет записывать дополнительную информацию о взаимодействии рождающихся в детекторе частиц с веществом, что помогает при анализе экспериментальных данных.

Первичное моделирование в настоящее время включает более 50 различных генераторов событий: множественного рождения адронов, распадов  $J/\psi$ ,  $\psi'$ ,  $\psi(3770)$ , Бабá-рассеяния, рождения пар  $\tau^+\tau^-$ , двухфотонного рождения лептонов, двухфотонного рождения адронов и ряда других.

Для эффективного использования моделирования в анализе экспериментальных данных, большое количество событий моделирования основных процессов записано в архив моделирования в формате "сырых" данных КЕДРa.

На основе библиотеки классов ROOT [86] разработана среда анализа данных эксперимента и моделирования, а также написана программа просмотра событий при наборе экспериментальных данных и их последующей обработке.

## 17 Основные параметры детектора

Основные параметры детектора приведены в таблице 12.

Таблица 12: Основные параметры детектора КЕДР.

Система	Параметры системы	Значения
Вершинный детектор $\Omega = 0.98 \times 4\pi$	Пространственное разрешение	170 мкм
Дрейфовая камера $\Omega = 0.72 \times 4\pi$	Пространственное разрешение в аксиальных / стерео слоях Имп. разрешение ДК+ВД на 1 ГэВ/с: $\pi/K$ разделение на $2\sigma$ до $K/p$ разделение на $2\sigma$ до	115 / 220 мкм 9.7% 0.67 ГэВ/с 1.2 ГэВ/с
Черенковские счётчики $\Omega = 0.96 \times 4\pi$	Разделение $\pi/K$ в интервале имп.	0.6–1.5 ГэВ/с
Времяпролётные сч-ки $\Omega = 0.97 \times 4\pi$	Разделение $\pi/K$ на $2\sigma$ до импульса	0.6 ГэВ/с
Торцевой CsI калориметр $\Omega = 0.21 \times 4\pi$ ( $\theta = 6^\circ \div 38^\circ, 142^\circ \div 174^\circ$ )	Энергетическое разрешение на 1.5 ГэВ Пространственное разрешение	3.5% 8 мм
Баррельный LKг кал-тр $\Omega = 0.79 \times 4\pi$ ( $\theta = 38^\circ \div 142^\circ$ )	Энергетическое разрешение на 1.8 ГэВ Разрешение по массе $\pi^0$ Пространственное разрешение	3% 8 МэВ 1 мм
Мюонная система $\Omega = 0.67 \times 4\pi$	Пространственное разрешение Толщина в ядерных длинах	40 мм 6 – 7
Система регистрации рассеянных электронов	Интервал по массе $\gamma\gamma$ -системы Разрешение по массе $\gamma\gamma$ -системы	0.14 – 4 ГэВ 5 – 23 МэВ
Монитор светимости	Регистрируемый процесс Относительная и абсол. точность	$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ (3–4) % и 5%
Криогенная система	27 тонн LKг при температуре СП соленоид и катушки при темп-ре	120 К 4 К
Магнитная система	Основное поле детектора Поле компенсирующих катушек	0.6 – 1.8 Тл 1.83 – 6.55 Тл

## 18 Заключение

Детектор КЕДР с 2002 года ведёт регулярный набор данных на коллайдере ВЭПП-4М. За прошедшее время выполнена целая серия прецизионных измерений, заметно улучшивших точность параметров элементарных частиц в таблицах PDG. К ним относятся: измерение масс  $\psi$ -мезонов [87], измерение массы  $\tau$ -лептона [88], измерение

лептонной ширины  $J/\psi$ -мезона [89], измерение масс заряженного и нейтрального  $D$ -мезонов [90].

Мы благодарны многим сотрудникам ИЯФ СО РАН – лаборантам, инженерам, физикам, специалистам в электронике и вычислительной технике за помощь в разработке и создании детектора. Мы признательны итальянским физикам из Dipartimento di Fisica dell'Università and Sezione INFN (Milan), Dipartimento di Fisica dell'Università and Sezione INFN (Bologna), Dipartimento di Elettronica Università di Pavia and Sezione INFN (Milan) за участие в разработке и изготовлении уникального жидкокриптонового калориметра детектора КЕДР.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 08-02-00142-а, 08-02-00258-а, 08-02-00251-а, 09-02-01035-а, 09-02-01143-а, 10-02-00904-а, 10-02-05033-б, а также Грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации НШ-6943.2010.2.

## Список литературы

- [1] *Petrov V. for the VEPP-4 team.* Status of the VEPP-4M electron-positron collider // 4th Asian Particle Accelerator Conference, Jan. 29 – Feb. 2, 2007, Indore, India. (url=<http://cern.ch/AccelConf/a07/PAPERS/TUPMA008.PDF>).
- [2] *Smaluk V. for the VEPP-4 team.* Status of VEPP-4M collider at BINP // Proceedings of XXIth Russian Particle Accelerator Conference, Sept. 28 – Oct. 3, 2008, Zvenigorod, Russia. (url=<http://cern.ch/AccelConf/r08/papers/МОBAU03.pdf>).
- [3] *Bukin A. D. et al.* Absolute Calibration of Beam Energy in the Storage Ring. Phi-Meson Mass Measurement // Proc. of V-th Int. Symp. on High Energy Physics and Elementary Particle Physics, Warsaw, 1975, P. 138-162.
- [4] *Blinov V. E. et al.* Review of beam energy measurements at VEPP-4M colider KEDR/VEPP-4M // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 23-30.
- [5] *Klein R. et al.* Measurement of the BESSY II electron beam energy by Compton-backscattering of laser photons // Nucl. Instrum. Meth. A. 2002. V. 486. P. 545-551.
- [6] *Nakamura N. et al.* The review of particle physics // Journal of Physics G. 2010. V. 37, P. 075021.
- [7] *Соколов А. А., Тернов И. М.* О поляризационных и спиновых эффектах в теории синхротронного излучения // ДАН СССР, 1963. Т. 153, С. 1052-1054.
- [8] *Bondar A. E. et al.* Polarization measurement in storage rings of the Institute of Nuclear Physics (Novosibirsk) //Proc. 12th Intern. Conf. High Energy Accelerators, 1983, P. 240-243.
- [9] *Nikitin S., Nikolaev I.* Dependence of the electron beam polarization effect in the intra-beam-scattering rate on the vertical beam emittance //Proc. of EPAC 2006. 2006. P. 1184-1186.
- [10] *Байер В. Н., Катков В. М., Страховенко В. М.* О влиянии поляризации на эффекты внутреннего рассеяния электронов в накопителях // ДАН СССР, 1978. Т. 241, С .797-800.

- [11] *Нижитин С. А., Николаев И. Б.* Расчет интенсивности тушековских электронов в накопителе ВЭПП-4М // Препринт ИЯФ (подготовлен к печати). Новосибирск, 2010.
- [12] *Зиневич Н. И., Шубин Е. И.* Синтезатор частоты в стандарте КАМАК //Препринт ИЯФ СО АН СССР 84-11. Новосибирск, 1984.
- [13] *Derbenev Ya. S., Kondratenko A. M., and Skrinsky A. N.* Radiative polarization at ultra-high energies // Part. Acc., 1979 V. 9, P. 247-265.
- [14] *Нижитин С. А.* Расчет деполяризатора с поперечным полем для прецизионных экспериментов на ВЭПП-4М // Препринт ИЯФ 2005-54. Новосибирск, 2005.
- [15] *Анчугов О. В. и др.* Применение методов ускорительной физики в экспериментах по прецизионному измерению масс частиц на комплексе ВЭПП-4 с детектором КЕДР // Приборы и техника эксперимента, 2010, Т. 1, С. 1-14.
- [16] *Muchnoi N. Yu. et al.* Fast and Precise Beam Energy Monitor Based on the Compton Backscattering at the VEPP-4M collider // Proc. of 10th European Part. Acc. Conf. (EPAC 06), Edinburgh, Scotland, 26-30 Jun 2006, P. 1181-1183.
- [17] *Система криогенного обеспечения детектора КЕДР СТАГ-1200/120-120/4,5. Техническое описание 2082 364215 1017 00 2 ТО* // НПО Криогенмаш, 1991.
- [18] *Пивоваров С. Г.* Сверхпроводящая магнитная система и жидкокриптоновый калориметр детектора КЕДР // Кандидатская диссертация по специальности 01.04.16. ИЯФ. Новосибирск, 2001.
- [19] *Dubrovin A.* Mermaid User's Guide // Novosibirsk 1994.
- [20] *Евтушенко П. Н., Rogozin A. И., Тихонов Ю. А.* Простой метод измерения скорости дрейфа и времени жизни электронов в газообразном и конденсированном криптоне // Препринт ИЯФ 99-3. Новосибирск, 1999.
- [21] *Aulchenko V. M. et al.* Vertex chamber for the KEDR detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 283. P. 528-531.
- [22] *Нагаслаев В. П.* Вершинная камера детектора КЕДР. // Кандидатская диссертация по специальности 01.04.16. ИЯФ. Новосибирск, 1997.
- [23] *Байбусинов Б. О. и др.* Первые результаты испытаний ВД для КЕДР // Препринт ИЯФ 97-68. Новосибирск, 1997.
- [24] *Балдин Е. М. и др.* Реконструкция событий в вершинной камере детектора КЕДР // Препринт ИЯФ 2000-005. Новосибирск, 2000. ([url=http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/index.ru.shtml](http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/index.ru.shtml)).
- [25] *Aulchenko V. M. et al.* Data acquisition systems and triggers for the detectors in INP // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 409. P. 639-642.
- [26] *Анашин В. В. и др.* Проект детектора КЕДР. // Труды международного симпозиума по координатным детекторам в физике высоких энергий. Дубна 22-25 сент. 1987. Дубна, 1988, С. 58-66.

- [27] *Anashin V. V. et al.* KEDR status report // RX-1308 (Novosibirsk), May 1990.
- [28] *Anashin V. V. et al.* Status of the KEDR detector // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478. P. 420-425.
- [29] *Baru S. E. et al.* The KEDR drift chamber // Proc. of Fifth Intern. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, USSR, 15-21 Mar 1990. Novosibirsk, 1990, P. 41-52.
- [30] *Baru S. E. et al.* The KEDR drift chamber // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 323. P. 151-156.
- [31] *Baru S. E. et al.* Status of the KEDR drift chamber // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 379. P. 417-420.
- [32] *Baru S. E. et al.* The KEDR drift chamber based on dimethyl ether // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 409. P. 23-25.
- [33] *Baru S. E. et al.* Status of the KEDR drift chamber // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 251-254.
- [34] *SLD Design Report.* SLAC-Report-273 (1984) and updates;  
*Atwood W. B. et al.* Performance Of The Sld Central Drift Chamber Prototype // Nucl. Instr. Meth. A. 1986. V. 252 P. 295.
- [35] *Аульченко В. М., Бару С. Е., Савинов Г. А.* Электроника новых детекторов ИЯФ // Препринт ИЯФ 88-29. Новосибирск, 1988.
- [36] *Onuchin A. P., et al.* Development of aerogel Cherenkov counters for KEDR detector // 5th Int. Conf. Instr. for Colliding Beams Physics, Novosibirsk, 1990 (World Scientific, 1990) 208-213.
- [37] *Sumiyoshi T., et al.* // Silica aerogel Cherenkov counter for the KEK B-factory experiment // Nucl. Instr. Meth. A433(1999)385-391.
- [38] *Onuchin A. P., et al.* The Aerogel Cerenkov counters with wavelength shifters and phototubes // Nucl. Instr. Meth. A315(1992)517-520.
- [39] *Barnyakov M. Yu. et al.* Aerogel Cherenkov counters for the KEDR detector // Nucl. Instr. Meth. A453(2000)326-332.
- [40] *Barnyakov A. Yu. et al.* The status of the KEDR ASHIPH system // Nucl. Instr. Meth. A518(2004)597-601.
- [41] *Buzykaev A. R. et al.* Project of aerogel Cherenkov counters for KEDR // Nucl. Instr. Meth. A379(1996)453.
- [42] *Danilyuk A. F. et al.* Recent results on aerogel development for use in Cherenkov counters // Nucl. Instr. Meth. A494(2002)491-494.
- [43] *Barnyakov M. Yu. et al.* Development of aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and phototubes // Nucl. Instr. Meth. A419(1998)584-589.

- [44] *Barnyakov A. Yu. et al.* R&D of microchannel plate phototubes // Proceedings of Conference Beaune 2005, Beaune.
- [45] *Buzykaev A. R. et al.* Aerogel Cherenkov counters with wavelength shifters and microchannel plate photo-tubes // Journal of Non-Crystalline Solids 225(1998)381-384.
- [46] *Barnyakov A. Yu. et al.* Test of aerogel counters for the KEDR detector // Nucl. Instr. Meth. A478(2002)353-356.
- [47] *Глобус М. Е. Гринев Б. В.* Неорганические сцинтилляторы. Новые и традиционные материалы // Акта, Харьков, 2000.
- [48] *Aulchenko V. M. et al.* Experience with CsI(Na) crystals for calorimetry // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 379. P. 502-504.
- [49] *Aulchenko V. M. et al.* CsI calorimeters for KEDR and CMD-2 detectors // Proc. 5th Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Novosibirsk, 1990, 15-21 Mar 1990. Novosibirsk, 1990. P. 318-330.
- [50] *Grigoriev D. N. et al.* Study of a calorimeter elements consisting of a CsI(Na) crystal and phototriode // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 378. P. 353-355.
- [51] *Bes'chastnov M. P. et al.* The results of vacuum phototriodes tests // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 342. P. 477-482.
- [52] *Аульченко В. М., Леонтьев Л. А., Усов Ю. В.* Информационная плата А32 системы сбора данных КЛЮКВА // Препринт ИЯФ 88-30. Новосибирск, 1988.
- [53] *Бару С. Е. и др.* Служебные блоки системы сбора данных КЛЮКВА // Препринт ИЯФ 88-26. Новосибирск, 1988.
- [54] *Aulchenko V. M. et al.* Investigation Of The Electromagnetic Calorimeter Based On Liquid Krypton // Nucl. Instr. Meth. A. 1990. V. 289. P. 468-474.
- [55] *Aulchenko V. M. et al.* Liquid krypton calorimeter for KEDR detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 316. P. 8-13.
- [56] *Aulchenko V. M. et al.* Liquid krypton electromagnetic calorimeter // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 327. P. 194-198.
- [57] *Aulchenko V. M. et al.* Development of the liquid krypton EM calorimeter of KEDR detector // Batavia, IL, 29 Oct - 1 Nov 1990. Batavia 1990, Proceedings, Calorimetry in high energy physics. P. 233-242.
- [58] *Cantoni P. et al.* Space and energy resolutions in a liquid krypton e.m. calorimeter // Nucl. Instr. Meth. A. 1992. V. 315. P. 491-493.
- [59] *Аульченко В. М. и др.* Пространственное разрешение калориметра на жидком криптоне детектора КЕДР // Препринт ИЯФ 2004-29. Новосибирск, 2004.
- [60] *Aulchenko V. M. et al.* The test of the LKr calorimeter prototype at the tagged photon beam // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 394. P. 35-45.



- [61] *Аульченко В. М. и др.* Мюонная система детектора КЕДР // Препринт ИЯФ 2000-48. Новосибирск 2000. (url=http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/index.ru.shtml)
- [62] *Алексеев Г. Д., Круглов В. В., Хазинс Д. М.* Самогасящийся стримерный (СГС) разряд в проволочной камере // ЭЧАЯ. 1982. Т. 13, вып. 3. С. 701.
- [63] *Аульченко В. М. и др.* Стримерные трубки: измерение поперечной и продольной координат // Препринт ИЯФ 85-122. Новосибирск 1985. (url=http://www.inp.nsk.su/activity/preprints/index.ru.shtml).
- [64] *В.М. Аульченко, Б.О. Байбусинов, В.М. Титов.* Информационные платы ТП, ΔТ и Т2А системы сбора данных КЛЮКВА. Препринт ИЯФ 88-22. Новосибирск, 1988.
- [65] *Aulchenko V. M. et al.* Muon system based on streamer tubes with time difference readout // Nucl. Instr. Meth. A. 1988. V. 265. P. 137-140.
- [66] *Altareli G. and Buchella F.* Single photon emission in high-energy  $e^+e^-$  collisions // Nuovo Cimento 1964. V.34. No.5. P.1337-1346.
- [67] *Байер В.Н., Фадин В.С., Хозе В.А.* О тормозном излучении фотонов при столкновении электронов больших энергий // ЖЭТФ, 1966, Т.51, №4. С.1135-1142.
- [68] *Blinov A.E. et al.* Large impact parameters cut-off in the process  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$  // Phys. Lett. B. 1982. V.113. P.432.
- [69] *Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М.* Роль геометрических факторов в процессе тормозного излучения на встречных  $e^+e^-$  пучках // Ядерная Физика 1982. Т.36. С.163.
- [70] *Тяурский В.А.* МС генератор тормозного излучения // Препринт ИЯФ 2008-35. Новосибирск, 2008.
- [71] *Budnev V. M. et al.* The two-photon particle production mechanism. Physical problems. Applications. Equivalent photon approximation // Physics Reports. 1975. V. 15. P.181-282.
- [72] *Brodsky S. J.* Exclusive photon-photon processes // Proc. XIth. Int. Workshop on Gamma-Gamma collisions, Egmond aan Zee. Netherlands, 10-15 May 1997. P. 197. E-Print: hep-ph/9707444.
- [73] *Urner D.* Review of two photon interactions // AIP Conf. Proc. 2004. 698:566-570. E-Print: hep-ex/0309045.
- [74] *Baru S. E. et al.* Experiments with the MD-1 detector at the  $e^+e^-$  collider VEPP-4 in the energy region of  $\Upsilon$  mesons // Physics Reports. 1996. V. 267. P. 71-159.
- [75] *Аульченко В. М. и др.* Система регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР для изучения двухфотонных процессов // Препринт ИЯФ 91-49. Новосибирск, 1991.

- [76] *Бондарь А. Е.* Система регистрации рассеянных электронов детекторов МД-1 и КЕДР // Диссертация на соискание учёной степени к.ф.м.н. ИЯФ. Новосибирск, 1994.
- [77] *Aulchenko V. M. et al.* Study of the BELLE CsI calorimeter prototype with the BINP tagged photon beam // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V. 379. P. 491-494.
- [78] *Ahn H. S. et al.* Study of characteristics of the BELLE CsI calorimeter prototype with a BINP tagged photon beam // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 410. P. 179-194.
- [79] *Ikeda H. et al.* A detailed test of the CsI(TL) calorimeter for BELLE with photon beams of energy between 20-MeV and 5.4-GeV // Nucl. Instr. Meth. A. V. 441. P. 401-426.
- [80] *Adriani A. et al.* Performance of a prototype of the CMS central detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 367. P. 189-192.
- [81] *Sauli F.* GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 386. P. 531-534.
- [82] *Aulchenko V. M. et al.* Upgrade of the KEDR tagging system // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 494. P. 241-245.
- [83] *Aulchenko V. M. et al.* Triple-GEM detectors for KEDR tagging system // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 598. P. 112-115.
- [84] *Aulchenko V. M. et al.* Operation of the triple-GEM detectors in KEDR tagging system // To be published in Journal of Instrumentation.
- [85] *Brun R., et al.* GEANT 3.21, Detector Description and Simulation Tool // CERN Program Library Long Writeup W5013. CERN, Geneva. 1993.
- [86] *Brun R., Rademakers F.* ROOT: An object oriented data analysis frame work // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P.81-86.
- [87] *Anashin V. V. et al. (KEDR collaboration).* Results on  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\psi(3770)$  from KEDR // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 2008. V. 181-182.P. 353-357.
- [88] *Anashin V. V. et al. (KEDR collaboration).* Tau mass measurement at KEDR // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 2009. V. 189. P. 21-23.
- [89] *Anashin V. V. et al. (KEDR collaboration)* Measurement of  $\Gamma_{ee}(J/\psi) * B(J/\psi \rightarrow e^+e^-)$  and  $\Gamma_{ee}(J/\psi) * B(J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-)$  // Physics Letters B. 2010. V. 685. P. 134-140.
- [90] *Anashin V. V. et al. (KEDR collaboration).* Measurement of  $D^0$  and  $D^+$  meson masses with the KEDR detector // Physics Letters B. 2010. V. 686. P. 84-90.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>3</b>
1.1	Физическая программа . . . . .	3
1.2	Схема детектора . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-4М</b>	<b>5</b>
2.1	Измерение энергии пучка . . . . .	6
2.1.1	Метод резонансной деполяризации . . . . .	6
2.1.2	Комптоновский монитор энергии и энергетического разброса . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Магнитная система</b>	<b>12</b>
3.1	Основной соленоид . . . . .	12
3.2	Источник питания основного соленоида . . . . .	13
3.3	Компенсирующие соленоиды . . . . .	14
3.4	Ярмо . . . . .	14
3.5	Контроль магнитного поля . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Криогенная система</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Вершинный детектор</b>	<b>18</b>
5.1	Конструкция . . . . .	18
5.2	Пространственное разрешение . . . . .	20
5.3	Электроника . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Дрейфовая камера</b>	<b>21</b>
6.1	Конструкция . . . . .	21
6.2	Выбор ячейки и рабочего газа . . . . .	23
6.3	Импульсное разрешение . . . . .	24
6.4	Идентификация частиц . . . . .	25
6.5	Электроника . . . . .	26
6.6	Высоковольтное питание . . . . .	26
6.7	Газовая система и система измерения температуры . . . . .	26
<b>7</b>	<b>Черенковские счётчики АШИФ</b>	<b>27</b>
7.1	Аэрогель . . . . .	29
7.2	Переизлучатели спектра . . . . .	29
7.3	Фотоумножители . . . . .	30
7.4	Электроника . . . . .	30
7.5	Сборка счётчиков . . . . .	30
7.6	Тестирование счётчика на пучке . . . . .	30
7.7	Долговременная стабильность счётчиков . . . . .	30
7.8	Статус системы . . . . .	31
<b>8</b>	<b>Время-пролётная система</b>	<b>32</b>
8.1	Конструкция . . . . .	32
8.2	Электроника . . . . .	33
8.3	Физические параметры системы . . . . .	33

<b>9 Торцевой калориметр</b>	<b>35</b>
9.1 Кристаллы и счётчики . . . . .	36
9.2 Фототриоды . . . . .	37
9.3 Электронный тракт . . . . .	37
9.4 Калибровки калориметра и достигнутые параметры . . . . .	38
<b>10 Цилиндрический калориметр</b>	<b>39</b>
10.1 Конструкция . . . . .	39
10.2 Электроника . . . . .	41
10.3 Шумы электроники и радиоактивность . . . . .	42
10.4 Калибровка . . . . .	43
10.5 Параметры калориметра . . . . .	43
<b>11 Мюонная система</b>	<b>44</b>
11.1 Конструкция . . . . .	45
11.2 Технология изготовления . . . . .	46
11.3 Газовая смесь . . . . .	47
11.4 Электроника . . . . .	47
11.5 Калибровка и параметры системы, полученные в эксперименте . . . . .	48
<b>12 Монитор светимости</b>	<b>49</b>
12.1 Введение . . . . .	49
12.2 Аппаратура монитора светимости . . . . .	50
12.3 Оперативное измерение светимости . . . . .	51
<b>13 Система регистрации рассеянных электронов</b>	<b>53</b>
13.1 Введение . . . . .	53
13.2 Общее описание . . . . .	55
13.2.1 Принцип работы . . . . .	55
13.2.2 Конструкция координатных блоков . . . . .	57
13.2.3 Газовая смесь . . . . .	57
13.2.4 Регистрация сигналов . . . . .	57
13.3 Исследования на тестовом пучке . . . . .	58
13.4 Детекторы на основе трёх-каскадных ГЭУ . . . . .	60
13.5 Физические параметры . . . . .	62
<b>14 Триггер</b>	<b>64</b>
14.1 Алгоритм работы триггера . . . . .	64
14.2 Первичный триггер . . . . .	65
14.3 Вторичный триггер . . . . .	68
14.4 Мёртвое время триггера . . . . .	70
<b>15 Система сбора данных</b>	<b>70</b>
15.1 Схема системы сбора данных . . . . .	70
15.2 Электроника . . . . .	71
15.3 Программное обеспечение . . . . .	72
15.4 Контроль работы детектора . . . . .	74
<b>16 Моделирование</b>	<b>74</b>

<b>17 Основные параметры детектора</b>	<b>75</b>
<b>18 Заключение</b>	<b>75</b>
<b>19 Список литературы</b>	<b>76</b>