

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-2001-187

На правах рукописи
УДК 539.1.074: 621.382

КАРЖАВИН
Владимир Юрьевич

**РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ КАМЕР
С КАТОДНЫМ СЧИТЫВАНИЕМ
МЮОННОЙ СТАНЦИИ ME1/1 УСТАНОВКИ CMS**

Специальность: 01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 2001

Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор

Голутвин Игорь Анатольевич

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Мойсенз Петр Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Смирнов Виталий Анатольевич

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Сытин Александр Николаевич

Ведущая организация: Государственный научный центр Российской Федерации
Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва).

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2001г.

в _____ часов на заседании диссертационного совета _____ в Лаборатории физики
частиц Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФЧ ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2001г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кривохижин Василий Геннадьевич

Общая характеристика работы.

Актуальность. Компактный Мюонный Соленоид (CMS) является одним из двух крупнейших детекторов, создаваемых для работы на Большом Адронном коллайдере (LHC). Экспериментальная установка CMS состоит из разнообразных многоканальных детекторов с общим числом каналов регистрации 10^7 (в современных экспериментах количество каналов регистрации достигает 3×10^5).

Повышенные требования к характеристикам детектирующих систем, большое количество каналов и одновременно очень ограниченное место для размещения детекторов и электроники регистрации влекут за собой ряд серьезных требований к их разработке.

Многопроволочные пропорциональные камеры с катодным считыванием информации (CSC) выбраны в качестве базового детектора торцевой мюонной системы эксперимента CMS, так как они сочетают в себе все необходимые для решения физической задачи свойства:

- определение координаты частицы с высокой точностью;
- возможность работы в сильном магнитном поле (~ 4 Тесла);
- наличие быстрого сигнала, необходимого для формирования триггера первого уровня.

Координатная точность CSC мюонной станции ME1/1 играет определяющую роль в обеспечении необходимого энергетического разрешения мюонной системы установки CMS. Наиболее близкое в мюонной системе место расположения станции по отношению к внутреннему трекеру определяет высокие требования к эффективности и точности определения пространственной координаты для восстановления мюонного трека в точку взаимодействия.

Создание электронной аппаратуры, необходимой для проведения методических исследований характеристик прототипов детекторов позволило оптимизировать разрабатываемую конструкцию камер с учетом особенностей мюонной станции ME1/1.

Цель диссертационной работы:

- ◆ Оптимизация характеристик детектора и электроники регистрации информации с учетом физических особенностей мюонной станции ME1/1.
- ◆ Экспериментальное изучение загрузочной способности камер и быстродействия регистрирующей электроники. Изучение триггерных свойств CSC.
- ◆ Исследование основных характеристик детектора и электроники регистрации в оптимальном для мюонной станции ME1/1 режиме работы.
- ◆ Исследование радиационной стойкости электроники регистрации информации мюонной станции ME1/1.

Научная новизна работы. В диссертационной работе приведены новые результаты экспериментальных исследований характеристик прототипов детектора и электроники регистрации информации мюонной станции ME1/1 установки CMS:

- влияние магнитного поля на пространственную точность CSC;
- влияние δ -электронов и электромагнитного сопровождения индуцируемого мюонами в объеме камеры на пространственную точность детектора;
- временное разрешение CSC мюонной станции ME1/1;
- возможность идентификации трека заряженной частицы и определение момента рождения события с помощью информации, считываемой с анодных проволочек CSC;
- загрузочная способность электроники регистрации мюонной станции ME1/1;
- радиационная стойкость интегральной схемы многоканального усилителя-формирователя -дискриминатора для регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1.

Научно практическая ценность работы:

- Создана электронная аппаратура для проведения методических исследований характеристик прототипов детекторов мюонной станции ME1/1.

- Проведен ряд экспериментов по изучению характеристик прототипов детекторов и регистрирующей электроники мюонной станции ME1/1 в условиях, приближенных к реальным в установке CMS. Полученные экспериментальные данные позволили изучить влияние ряда физических факторов, приводящих к ухудшению свойств детектора и электроники регистрации, таких как:

- влияние электромагнитного сопровождения, индуцируемого мюонами;
- влияние магнитного поля на координатную точность детектора;
- влияние фоновых нагрузок.

- Определены основные параметры и концепция конструкции детекторов и электроники регистрации, соответствующие требованиям мюонной станции ME1/1.

- Изучено временное разрешение и триггерные свойства CSC. Показано, что быстрые сигналы, приходящие с анодных плоскостей, обеспечивают однозначное определение временного интервала взаимодействия пучков коллайдера: 1ый и 2ой сигналы могут быть использованы для указания момента взаимодействия, а мажоритарное совпадение сигналов с 6 плоскостей определяет принадлежность события к треку заряженной частицы. Время, необходимое для идентификации трека, может быть меньше, чем два интервала взаимодействия пучков коллайдера (50 нс).

- Совместно с НЦФЧВЭ, Минск разработаны и изготовлены специализированные большие интегральные схемы (ИС) электроники регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1:

КАТОД 1 - 16-ти канальный зарядочувствительный усилитель-формирователь для регистрации информации с катодных стрипов;

КАТОД 3 - 16-ти канальный формирователь-дискриминатор быстрого канала;

АНОД - 8-ми канальный усилитель-формирователь-дискриминатор для регистрации информации с анодных проволочек.

- Для исследования характеристик предсерийных прототипов камер P3 и P4 разработана и изготовлена многоканальная система электроники регистрации на базе нового комплекта ИС, которая позволила провести исследование характеристик детектора в экспериментальных условиях близких к реальным. Показано, что при рабочих условиях:

рабочий состав газовой смеси: Ar(30%)+CF₄(20%)+CO₂(50%),

газовое усиление детектора $G \sim (5-7) \times 10^4$,

магнитное поле $P=3$ Тесла,

детектор обеспечивает:

пространственную точность одной плоскости $\sigma \sim 75$ мкм,

временное разрешение анодного канала регистрации $\sigma \sim 3$ нс,

временное разрешение быстрого катодного канала регистрации $\sigma \sim 4$ нс,

точность определения центра заряженного кластера $1/2$ ширины стрипа.

- Результаты экспериментальных исследований показали, что характеристики детекторов удовлетворяют требованиям CMS. Начато серийное изготовление детекторов.

- Экспериментально изучена радиационная стойкость интегральной схемы (ИС) АНОД предназначенной для регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1 установки CMS.

Автор защищает:

• Результаты методических работ по исследованию характеристик электроники регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1.

- Результаты исследования возможности идентификации трека заряженной частицы и определение момента рождения события с помощью информации, считываемой с анодных проволок CSC.
- Результаты экспериментальных исследований грузочной способности электроники регистрации мюонной станции ME1/1.
- Разработку многоканальной системы регистрации информации с катодных стрипов на основе ИС КАТОД1 и КАТОД3.
- Результаты экспериментального исследования радиационной стойкости ИС АНОД усилителя-формирователя -дискриминатора для регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1 установки CMS.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации изложены в 4 работах, список которых приведен в конце автореферата. Результаты исследований неоднократно докладывались на общелабораторных семинарах в ЛФЧ ОИЯИ, на семинарах коллаборации CMS в ЦЕРН, а также на следующих международных совещаниях и конференциях:

1. CMS Trigger Meeting, Document, Bad-Aussee, Austria, 2-5 March, 1994.
2. First Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 11-15 1995.
3. Second Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 16-17, 1996.
4. Third Annual RDMS CMS Collaboration Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, December 16-17, 1997.
5. CMS Endcap Muon Meeting, CERN, Geneva, Switzerland, June 14, 1998.
6. CMS Endcap Muon Meeting, Gainesville, Florida, USA, February 18-19, 2000.

Содержание работы.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы.

Во введении подчеркнута актуальность исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, определены основные положения, вынесенные на защиту.

В первой главе приведено краткое описание и основные характеристики Большого Адронного Коллайдера LHC. Рассмотрено назначение создаваемых для работы на LHC экспериментальных установок. Дано краткое описание Компактного Мюонного Соленоида (CMS) (Рис.1).

Вторая глава посвящена описанию мюонной станции ME1/1. Изложены принцип работы, конструкция CSC камер. Приведены параметры и особенности условий работы CSC мюонной станции ME1/1.

Для достижения требуемого разрешения по импульсу всей торцевой мюонной системы, станция ME1/1 должна обеспечить хорошее пространственное разрешение (~75 мкм), эффективное восстановление и отбор треков для сопряжения трековой информации мюонной системы и центрального трекера. Камеры мюонной станции ME1/1 должны работать в аксиальном магнитном поле соленоида ~3.5

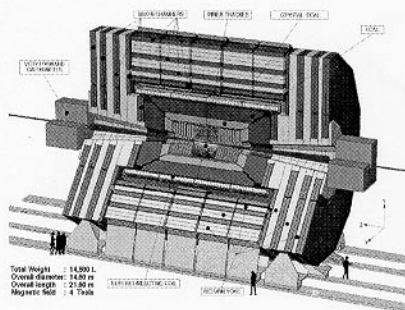


Рис. 1. Общий вид установки CMS.

Тесла. Станция должна обеспечить требуемые физические параметры при загрузках заряженными частицами вплоть до 1.5 Гц/см^2 . С точки зрения радиационного воздействия, мюонная станция MEI/1 также находится в более суровых условиях, по сравнению с остальными детекторами мюонного спектрометра.

Третья глава посвящена описанию электроники регистрации информации с CSC мюонной станции MEI/1. Приведено описание и сформулированы требования к электронике считывания информации с катодных стрипов и анодных проволочек.

Электроника считывания должна выполнять следующие основные задачи:

- регистрировать зарядовую информацию с катодных стрипов, необходимую для идентификации локального сегмента трека в камере и определения точной координаты мюона;
- хранить регистрируемую координатную информацию в течение времени, необходимого для выработки триггера первого уровня - 3,2 мкс, что соответствует 128 временным интервалам взаимодействия пучков коллайдера;
- выработать локальное решение триггера (на уровне детектора), передаваемое затем в систему триггера первого уровня для выработки глобального решения;
- по быстрой информации с анодных проволочек определять временную привязку регистрируемой координаты мюона к моменту рождения события;
- при наличии положительного решения триггера первого уровня передавать координатную информацию, регистрируемую с катодных стрипов и временную информацию, регистрируемую с анодных проволочек в систему сбора данных.

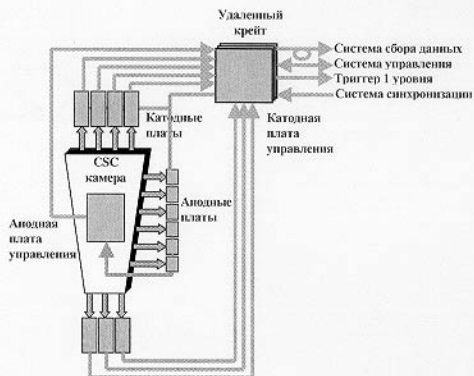


Рис.2. Функциональная схема электроники регистрации информации с CSC.

На рис.2 показана функциональная схема электроники считывания информации с CSC мюонной станции MEI. Непосредственно на камере размещены 796-канальных катодных и 18 16-канальных анодных плат. Платы управления, выполняющие функцию интерфейса между электроникой, расположенной на камере, и системой сбора данных, располагаются в удаленном (~12 м) крейте, за исключением анодной платы управления, которая помещена на камеру, чтобы исключить задержку сигнала на кабеле. Платы управления передают считываемые с детектора данные и триггерную информацию в центральную систему сбора данных и систему триггера первого уровня.

Для достижения требуемого пространственного разрешения мюонной станции MEI/1 (75 мкм на плоскость), заряд q , наведенный на стрипе, должен измеряться с точностью $\Delta q/Q < 1\%$, что определяет очень высокие требования к параметрам усилителя. Собственные шумы усилителя-формирователя в основном определяются: входной емкостью стрипа, геометрическими размерами входного транзистора и временем формирования сигнала. Для обеспечения оптимального времени восстановления измерительного канала и хорошего двухимпульсного разрешения, значение времени формирования сигнала усилителя выбрано $T_f = 100 \text{ нс}$. Анализ шумовых характеристик различных типов транзисторов, позволил сделать вывод, что применение 1,5 мкм биполярной технологии позволит получить эквивалентный

входной шум головного каскада усилителя, не превышающий 5000 электронов, при емкости стрипа $C_{стр} \leq 200$ пФ.

Основные задачи электроники считывания информации с анодных проволочек состоят в следующем:

- определение момента рождения события и идентификация трека заряженной частицы;
- измерение радиальной координаты мюона, необходимой для восстановления мюонного трека в точку взаимодействия на этапе принятия решения триггера 1-го уровня, а также для последующего анализа данных.

ИС усилителя-формирователя сигналов с анодных проволочек должна иметь низкий шум: $ENC < 5000$ электронов (< 1 фК). Время формирования импульса должно быть ~ 30 нс, а временное разрешение анодной электроники должно быть не хуже 3 нс. Эффективный порог срабатывания дискриминатора должен быть в пределах $10+20$ фК.

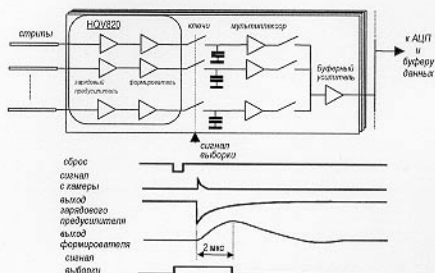


Рис. 3. Функциональная схема и временная диаграмма работы чтения информации с катодных стрипов

Четвертая глава посвящена результатам экспериментальных исследований характеристик первых прототипов детектора и электроники считывания информации с целью выбора основных параметров и концепции конструкции мюонной станции ME1/1.

Для исследования характеристик прототипа была разработана электроника считывания информации со стрипов на базе предусилителя фирмы LeCroy HQV820. На рис.3 показана функциональная схема чтения информации с катодных стрипов организовано на основе однократной схемы выборки информации с последующей оцифровкой. Для считывания информации с анодных проволочек был применен усилитель ГАРАНТИЯ, разработанный в ИФВЭ, Протвино.

Исследование характеристик камеры было проведено в пучке мюонов высоких энергий на канале H2 (ЦЕРН). Измеренное пространственное разрешение плоскости камеры $\sigma_x < 60$ мкм, соответствующее необходимой для восстановления пространственной координаты в мюонной станции ME1/1 точности, позволило сделать вывод о правильном выборе физических параметров камеры таких как: ширина стрипа и анод-катодное расстояние, диаметр и шаг анодной проволочки а также рабочая газовая смесь.

Наличие магнитного поля ($\sim 3,5$ Тесла) приводит к смещению направления дрейфа электронов к анодным проволочкам, т.е. к деградации пространственного разрешения CSC. Эффект влияния радиальной составляющей магнитного поля компенсируется наклоном анодных проволочек на соответствующий угол Лоренца (α_L) по отношению к центральному стрипу. На

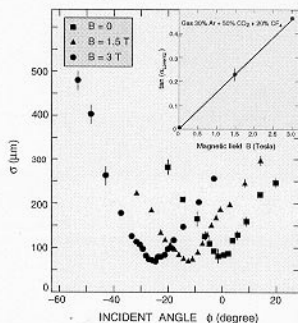


Рис.4. Зависимость пространственной точности камеры от угла регистрируемых мюонов для трех значений магнитного поля.

рис.4 представлены результаты измерений: зависимость пространственной точности камеры от угла регистрируемых мюонов для трех значений магнитного поля и зависимости тангенса угла α_L от величины магнитного поля. Измеренное значение угла Лоренца для MEI/1 камер, составило $\alpha_L = 29^\circ$.

Экспериментальное исследование характеристик прототипа P0 с космическими частицами позволило впервые оценить вероятность образования δ -электронов в объеме CSC: $11,8\% \pm 1,2\%$ на одну плоскость камеры. Оценка вероятности поглощения δ -электронов в одном слое камеры составила $78,8\% \pm 12\%$.

Эффект электромагнитного сопровождения, генерируемого высокоэнергетическими мюонами, проходящими сквозь материал поглотителя, исследовался на пучке H2, ЦЕРН. Измерена вероятность образования в CSC вторичных треков от электромагнитного сопровождения: $10,3 \pm 0,2\%$ для энергий мюона 200 ГэВ/с и $11,6 \pm 0,2\%$ для энергий мюона 300 ГэВ/с.

Исследования показали, что многослойные камеры позволяют сохранить высокую точность и эффективность в условиях электромагнитного сопровождения мюонов. В большинстве случаев только 1-2 слоя камеры поражены электромагнитным сопровождением. Моделирование показало, что наличие 6 плоскостей в мюонных камерах наиболее оптимально с точки зрения реконструкции трека с электромагнитным сопровождением мюона.

Конструкция полномасштабного прототипа P2 мюонной станции MEI/1 была существенно модернизирована: количество катодных плоскостей увеличено с 4х до 6, введена радиальная форма стрипов. Анодные проволочки наклонены по отношению к оси центрального стрипа на угол $\alpha_L = 29^\circ$, необходимый для компенсации эффекта магнитного поля.

Для экспериментального исследования характеристик прототипа P2 было разработано и изготовлено новое поколение электроники регистрации информации с CSC, включающее анодные и катодные платы считывания, блоки приема и оцифровки информации, а также триггерные блоки.

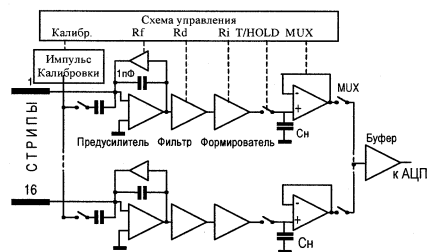


Рис.5. Блок схема аналогового процессора GASPLEX

Таблица 1.

Время нарастания сигнала	< 40 нс
Входной импеданс	< 500 Ом
Миним. шум ($S_{вх} = 0$)	$580 \text{ e} (\text{r.m.s})$
Наклон шум. хар-ки	$15 \text{ e} / \text{пФ}$
Входная емкость Max	50 пФ
Время формирования	$400 \div 650 \text{ нс}$
Скорость чтения	2мГц
Коеф. преобразования	$10\text{mV} / \text{фК}$
Динамический диапазон	0 - 200 фК
Потребление по питанию	$10\text{mB} / \text{кан.}$
Количество каналов	16

Считывание информации с катодных стрипов было организовано на основе аналогового процессора GASPLEX. Параметры микросхемы GASPLEX приведены в таблице 1. GASPLEX - это малощумящий процессор аналогового сигнала, специально разработанный для работы с газовыми детекторами. Блок-схема аналогового процессора GASPLEX показана на рис.5. После зарядо-чувствительного усилителя, оптимизированного на работу с детекторами, имеющими большую емкость, стоит фильтр, компенсирующий логарифмическую форму зарядового сигнала и тем самым повышающий быстродействие канала. Время восстановления базовой линии канала регистрации эквивалентно: $T=5,6 \text{ мкс.}$

Анодная электроника была разработана на базе зарядового предусилителя-формирователя MSD-2, LABEN. Основные характеристики микросхемы MSD-2 представлены в таблице 2.

Таблица 2.

	С _д =0 пФ	С _д =100 пФ
Эквив. шум, г.м.с (е)	1300	2800
Коеф. преобразов. (мВ/мкА)	35	25
Время нарастания (нс)	3	8
Быстродействие (МГц)	35	20
Входное сопротивл. (Ом)	120	
Потребление (мВт / канал)	15	
Положит. питание, V _{сс} (В)	3,5 ÷ 10	
Отрицат. питание, V _{ее} (В)	-2 ÷ -1	
Количество каналов	4	

Основное достоинство схемы, определившее ее выбор: малые шумы ENC~3000 е при входной емкости С_{дет}~100 пФ. Время формирования сигнала Т_ф=40 нс при

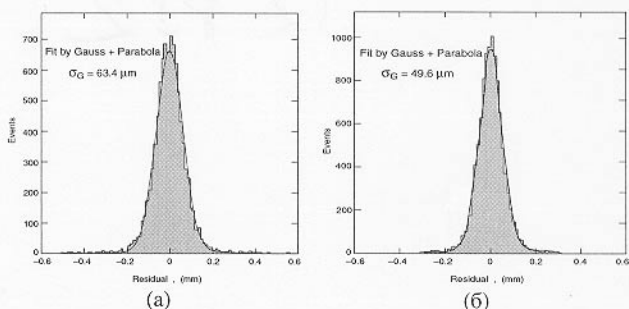


Рис. 6. Пространственное разрешение полномасштабного прототипа сектора мюонной станции ME1 измеренное с помощью космических частиц в магнитном поле 3 Тесла (а) и измеренное в пучке мюонов с энергией 200 ГэВ (б).

нарастании переднего фронта сигнала Т_п=8 нс соответствует требованиям к быстродействию анодной электроники.

Точность реконструкции мюонного трека в одной плоскости камеры $\sigma \sim 50$ мкм (Рис.6 (б)), измеренная в пучке мюонов с энергией 200 ГэВ, говорит о правильном выборе технологии изготовления камер и характеристик электроники считывания с катодных стрипов. Координатная точность, измеренная с помощью космических частиц в магнитном поле 3 Тесла (Рис.6 (а)), показывает правильность работы метода компенсации эффекта магнитного поля.

Стабильная работа электроники регистрации с анодных провололок позволила получить экспериментальные данные для анализа временных свойств детектора. Временное разрешение $\sigma \sim 2$ нс (Рис.7) шести плоскостей камеры (объединенных по "или") получено при эффективности работы анодной электроники близкой к 100 %.

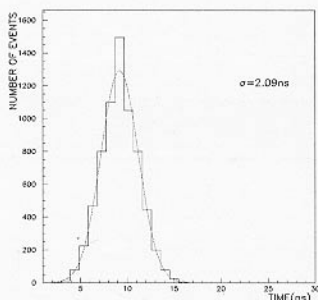


Рис.7. Временное разрешение шести плоскостей камеры.

Полученные экспериментальные данные дали основу для моделирования свойств камеры в зависимости от ее геометрических параметров. Результаты проведенных исследований позволили принять концептуальные решения по конструкции камер мюонной станции ME1/1 и приступить к разработке предсерийных прототипов.

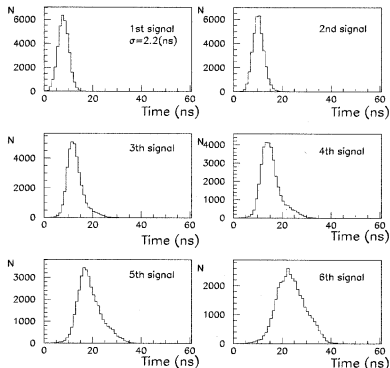


Рис.8. Временное распределение первых 6 последовательно приходящих сигналов с анодных проволочек всех плоскостей камеры.

камеры. Значения оснований спектров для 99% событий составляют: для 1^{го} сигнала, приходящего с 6 плоскостей - 14 нс, для 2^{го} - 17 нс, для 3^{го} - 24 нс, для 4^{го} - 28 нс, для 5^{го} - 33нс, для 6^{го} - 38нс. Анализ временных распределений показывает возможность однозначной привязки к времени взаимодействия пучков в коллайдере, при этом: первые два сигнала, приходящие с 6 плоскостей, могут служить временной меткой событий, а мажоритарное совпадение сигналов с 6 плоскостей определяет принадлежность события к треку заряженной частицы. На рис.9 показана эффективность мажоритарных совпадений в зависимости от длительности стробирующего сигнала. Мажоритарная схема совпадений позволяет идентифицировать принадлежность событий, регистрируемых в CSC, к мюонному треку с эффективностью около 100% во временном стробе: 32 нс для совпадений 4/6, 38 нс для совпадений 5/6 и 44 нс для совпадений 6/6. Таким образом, идентификация трека может быть осуществлена за время, меньшее чем 2BX (50нс).

Экспериментальное изучение быстродействия измерительного катодного канала проводилось на стенде для исследования характеристик детекторов с помощью космических частиц, созданном в ЛФЧ ОИЯИ (рис.10). Рентгеновская трубка (ХТ) применялась в качестве источника некоррелированного фона с энергией частиц $E_{\gamma} = 8$ КэВ. Сцинтилляционные счетчики

Пятая глава посвящена изучению быстродействия электроники считывания информации с CSC. Экспериментальные результаты получены при исследовании параметров полномасштабного прототипа P2 CSC мюонной станции ME1/1 в пучке мюонов с энергией 220 ГэВ (H2, ЦЕРН).

Для идентификации мюонов в мюонном триггере CMS требуется измерять их импульс и определять время рождения события, соответствующее пересечению пучков коллайдера (BX). Информация о временной привязке к моменту взаимодействия пучков сопровождается каждое событие и при предварительной обработке дает возможность "сшивать" восстановленные в различных детекторах установки треки. На рис.8 представлены временные распределения первых 6-ти последовательно приходящих сигналов с анодных проволочек всех плоскостей

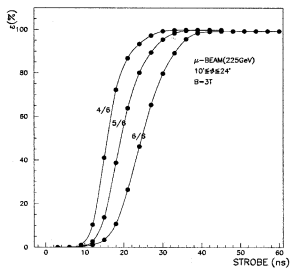


Рис.9. Эффективность мажоритарных совпадений в зависимости от длительности стробирующего сигнала.

S1, и S2 выделяли космические мюоны, проходящие через 40 см железный поглотитель. Через специальное майларовое окно чувствительной зоны, облучалась верхняя (тестируемая) плоскость камеры. Для измерения значения загрузки гамма фона H (кГц/стрип), контролировалась частота дискриминированного выходного сигнала схемы. Влияние времени восстановления катодного канала считывания на вероятность возникновения фоновых событий оценивалось с помощью формулы [1]:

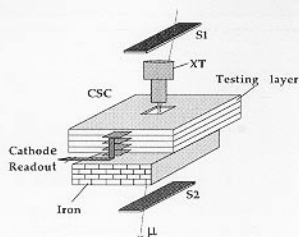


Рис.10. Схема исследования параметров измерительного катодного канала в условиях некоррелированного фона.

$$R = 1 - e^{-tH} \quad [1]$$

где R -вероятность фоновых событий с частотой H в интервале времени t .

Принимая t как среднее эффективное время восстановления катодного канала регистрации, можно вычислить значение t , как функцию фоновой загрузки для различных значений вероятности фоновых событий (см. Рис.11). Видно, что работать на уровне 10 % вероятности фоновых событий с загрузкой 100 кГц/стрип возможно с электроникой, имеющей эффективное время восстановления не хуже ~ 1 мкс.

Экспериментально исследовано быстродействие триггерного канала электроники считывания информации с катодных стрипов. Временные спектры сигналов с анодных проволочек и быстрого катодного канала имеют похожую форму с полной шириной по основанию $T=60$ нс, что показывает возможность применения быстрой катодной информации для идентификации времени рождения события ВХ.

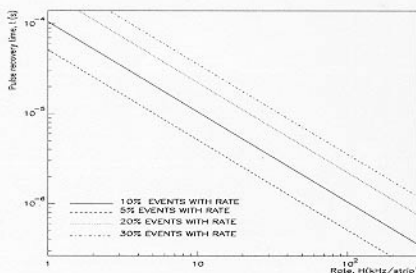


Рис. 11. Вычисленное значение времени восстановления катодной электроники t , как функции фоновой загрузки H , для различных значений вероятности фоновых событий R .

Исследованы характеристики алгоритма определения центра заряженного кластера. Показаны: высокая эффективность 97%, точность $\sim 1/4$ ширины стрипа и хорошая нагрузочная способность алгоритма. Существенной деградации параметров алгоритма не наблюдалось при интенсивности фонового излучения до 500 кГц/канал (фактор 5 по сравнению с ожидаемым значением загрузок в реальных условиях эксперимента).

Шестая глава посвящена исследованию характеристик предсерийных прототипов P3 и P4 камер мюонной станции MEI/1 с электроникой регистрации на основе разработанной совместно с НЦФЧВЭ и изготовленной в Минске серии специализированных больших интегральных схем. Параметры микросхем были оптимизированы с учетом специфических параметров камер мюонной станции MEI/1, влияющих на величину и форму распределения заряда в детекторе, таких как: размер газового промежутка, диаметр проволоочки, расстояние между проволочками, шаг стрипов.

КАТОД 1-16-ти каналный зарядочувствительный предусилитель-формирователь для регистрации информации с катодных стрипов. Основные характеристики ИС КАТОД 1 приведены в таблице 3. Блок-схема канала микросхемы КАТОД 1 приведена на рис.12.

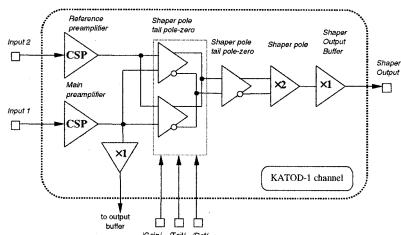


Рис. 12. Блок-схема канала ИС КАТОД 1.

Таблица 3

Количество каналов	16
Коэффициент преобразования	(1±5) мВ/фК
Шум (ENC г.м.с)	2400+12 э/пФ
Время формир.	(Cд=150пФ) 100 нс
Время базовой линии сигнала	600нс
Наводка с канала на канал	< 1 %
Нелинейность (0÷1,5 В)	1 %;
Потребление по питанию	25мВт/кан

КАТОД 3-16-ти каналный формирователь-дискриминатор быстрого катодного канала. Основные характеристики ИС КАТОД 3 приведены в таблице 4. Блок-схема канала микросхемы КАТОД 3 показана на рис.13.

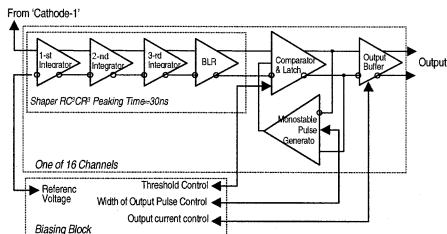


Рис.13. Блок-схема канала ИС КАТОД 3.

Таблица 4

Количество каналов	16
Шум (ENC г.м.с)	7000 э
Время формирования	30 нс
Время распротр. сигнала	15 нс
Длительность вых. сигнала	30 ÷80 нс
Порог дискриминатора	2 ÷50 мВ
Потребление по питанию	30мВт/кан

АНОД -8-ми каналный предусилитель-формирователь-дискриминатор для регистрация информации с анодных проволочек. Основные характеристики ИС АНОД приведены в таблице 5. Блок-схема канала ИС АНОД приведена на рис.14.

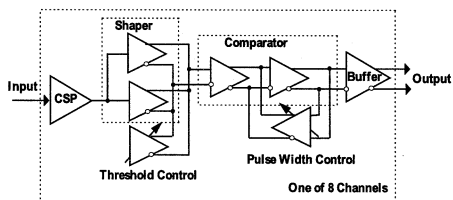


Рис.14. Блок-схема канала ИС АНОД.

Таблица 5

Количество каналов	8
Коэффициент преобраз.	10 мВ/фК
Шум (ENC г.м.с)	1600+20 э/пФ
Время формирования	15 нс
Время распротр. сигнала	7нс
Длительность вых. сигнала	30 ÷150 нс
Двухимпульсн. разрешение	100нс
Порог дискриминатора	5÷50 мВ
Потребление по питанию	25мВт/кан.

На рис.15 (а) показано характерное распределение заряда на катодных стрипах прототипа РЗ. Пик кривой соответствует величине заряда ~ 150 фК. Уровень шумов (рис.15 (б)) измерительного канала ИС КАТОД-1 составил $\sigma=0,8$ фК.

Исследования характеристик электроники регистрации на основе первой итерации специализированных больших интегральных схем КАТОД-1 и КАТОД-3 показали:

- при нагрузках ~ 100 кГц/канал пространственная точность камеры, измеренная с помощью электроники регистрации на основе ИС КАТОД-1, составляет ~ 70 мкм, при эффективности восстановления треков близкой к 100%;
- эффективность реконструкции треков быстрым катодным каналом на основе ИС КАТОД-3 (с точностью $\pm 0,5$ ширины стрипа) составила $\sim 98\%$ в отсутствии фона и $\sim 87\%$ при фоновых нагрузках ~ 400 кГц/канал.

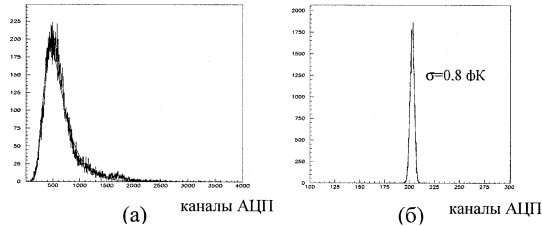


Рис.15 (а) - распределение заряда на катодных стрипах прототипа Р3;
(б) - уровень шумов измерительного канала ИС КАТОД-1.

Исследования прототипа Р3 на стенде GIF с высокоинтенсивным гамма источником ($\Phi > 2 \times 10^6$ $\gamma/\text{см}^2$) дали возможность оценить нагрузочную способность анодной электроники в условиях некоррелированного фона, ожидаемого в установке CMS. Деградикация временных свойств детектора и электроники считывания информации с анодных проволочек исследовалась в зависимости от интенсивного некоррелированного фона, производимого гамма источником. Набор поглощающих фильтров с диапазоном $1 \div 10^4$ обеспечивал изменение интенсивности фонового излучения в пределах от 10^6 до 10^2 частиц/с/см², перекрывая при этом ожидаемый предел нагрузок для области расположения мюонной станции ME1/1.

Полученные результаты (Рис.16) демонстрируют хорошую нагрузочную способность камеры и электроники считывания. Временное разрешение сигналов с камеры начинает деградировать при фоновых нагрузках (> 100 Гц/см²), превышающих ожидаемые ($\Phi_\gamma \sim 7 \times 10^4 \div 7 \times 10^3$ Гц/см²).

Прототип CSC Р4 был исследован в мюонном пучке (H2, ЦЕРН), при наличии магнитного поля ~ 3 Тесла. Катодная информация считывалась с помощью 96-канальной системы разработанной на базе ИС КАТОД-1 и КАТОД-3. Для регистрации информации с анодных проволочек была разработана 24 канальная плата, на основе ИС АНОД.

Основные задачи исследований заключались в проверке характеристик работы детектора в экспериментальных условиях, близких к реальным. Экспериментальные результаты, характеризующие работу прототипа Р4 и электроники считывания информации, в зависимости от значений высокого напряжения на камере (HV) и газового усиления детектора (Gas gain), представлены на рис.17.

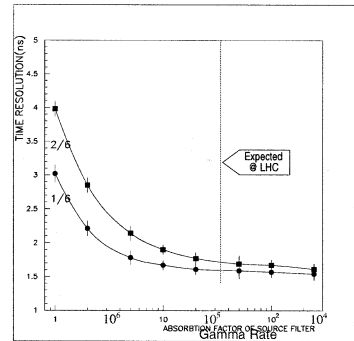


Рис.16. Временное разрешение двух первых сигналов, приходящих с 6-ти плоскостей в зависимости от интенсивности фона

Основные характеристики детектора измеренные при оптимальном для камер станции ME1/1 газовом усилении $G \sim (5+7) \times 10^4$ удовлетворяют условиям CMS:

- координатная точность плоскости детектора $\sigma = 70+85$ мкм в нижней части камеры (ширина стрипа $l=4,8$ мм) и $\sigma=80+100$ мкм в верхней части камеры (ширина стрипа $l=5,6$ мм);
- временное разрешение анодного канала $\sigma \sim 3$ нс и быстрого катодного канала $\sigma \sim 4$ нс, соответствуют высокой эффективности регистрации (по аноду $\epsilon \sim 100\%$ и по быстрому катоду $\epsilon \sim 96\%$).

Результаты изучения загрузочной способности детектора и электроники считывания информации показывают, что при фоновых нагрузках до $\Phi < 100$ кГц/стрип пространственное разрешение плоскости детектора соответствует $\sigma \sim 75$ мкм, а при увеличении нагрузок до $\Phi < 500$ кГц/стрип (фактор 5) разрешение незначительно деградирует $\sigma \sim 100$ мкм, оставаясь при этом в пределах допустимого. Эффективность восстановления трека по 4-м плоскостям при нагрузках $\Phi < 100$ кГц/стрип, составляет $\sim 96\%$. Эффективность определения центра кластера с помощью быстрого катодного канала эквивалентна $\sim 95\%$.

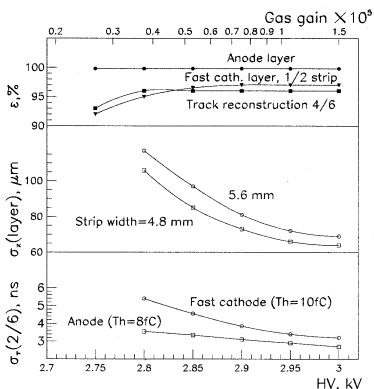


Рис. 17. Характеристики работы прототипа P4 с электроникой регистрации на основе изготовленной серии специализированных ИС.

Седьмая глава посвящена исследованию радиационной стойкости ИС АНОД.

Электроника регистрации, располагаемая непосредственно на детекторах, должна обладать радиационной стойкостью, соответствующей экспериментальным условиям мюонной станции ME1/1. Ожидаемый флюенс нейтронов в объеме детектора составляет:

$$\Phi_{n \geq 100 \text{ КэВ}} = 8,2 \times 10^{11} \text{ н / см}^2 \text{ (нейтроны с энергией больше 100 КэВ);}$$

$$\Phi_{n \geq 20 \text{ МэВ}} = 2,2 \times 10^{11} \text{ н / см}^2 \text{ (нейтроны с энергией больше 20 МэВ).}$$

Интегральная доза облучения за 10 лет эксплуатации LHC ($T=5 \times 10^7$ с) при максимальной светимости коллайдера $L=10^{34}$ составит $TID \sim 2,9$ крад.

Эксперимент проведен в пучке PS-T8 ускорителя PS, на специальном стенде IRRAD2 (ЦЕРН), предназначенном для исследования радиационной стойкости электронных компонентов в пучке нейтронов со спектром, аналогичным ожидаемому на LHC. Исследовались следующие основные радиационные повреждения, характерные для экспериментальных условий на LHC:

- 1) Дegradация характеристик ИС вследствие эффекта смещения перехода (Displacement). Проявление эффекта наиболее вероятно при облучении нейтронами с энергией $E_n \geq 100$ КэВ;
- 2) Дegradация характеристик ИС, связанных с интегральной дозой облучения (TID).
- 3) Радиационные повреждения, связанные с эффектами одиночных событий (SEE), при облучении нейтронами с энергией $E_n \geq 20$ МэВ:
 - изменение состояния перехода (SEU);
 - эффект защелкивания (SEL).

В процессе облучения контролировались основные аналоговые характеристики ИС АНОД такие как: напряжение и ток источника питания, референсное напряжение, коэффициент преобразования, шумы, и т.д. Значительной деградации

характеристик во время облучения не наблюдалось, вплоть до максимального значения нейтронного флюенса $\Phi_{E_n > 100 \text{КэВ}} \approx 6 \times 10^{12} \text{ н/см}^2$, который соответствует фактору безопасности SF~8 для рабочих условий мюонной станции ME1/1. При этом ионизационная доза облучения была превышена в ~7 раз (SF=7). Примеры поведения аналоговых характеристик ИС АНОД в процессе облучения представлены на рис. 18- 19.

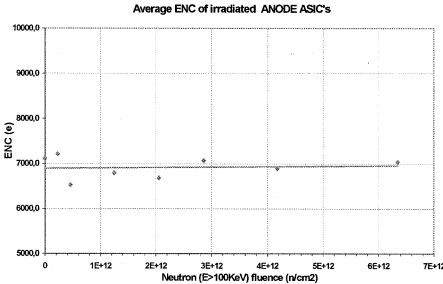


Рис. 18. Зависимость шумов ИС АНОД от нейтронного флюенса.

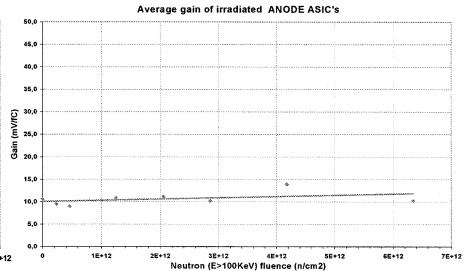


Рис. 19. Среднее значение коэффициента преобразования усилителя ИС АНОД в зависимости от нейтронного флюенса.

Радиационных повреждения, связанные с эффектами одиночных событий (SEE), изучены для нейтронов с энергией $E_n \geq 20 \text{ МэВ}$. Результаты эксперимента показали абсолютное отсутствие SEL эффекта, вплоть до максимального флюенса нейтронов с энергией $E_n > 20 \text{ МэВ}$, эквивалентного $\Phi = 6 \times 10^{11} \text{ н/см}^2$.

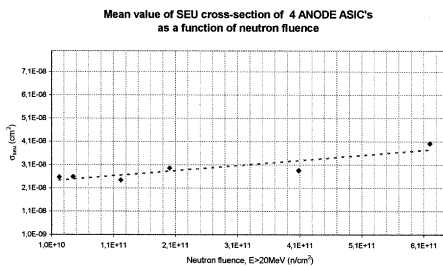


Рис. 20. Зависимость среднего значения сечения (σ) SEU эффекта от флюенса нейтронов.

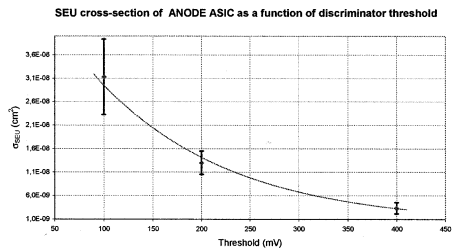


Рис.21. Зависимость сечения (σ) SEU эффекта от напряжения управления порогом дискриминатора.

Чувствительность прибора к SEU эффектам характеризуется зависимостью сечения (σ) от интенсивности облучения. На рис.20 представлена зависимость среднего значения сечения σ для 4-х облученных ИС (всего 32 канала) от величины нейтронного флюенса.

Сечение SEU эффекта было измерено для различных значений порогов дискриминатора ИС АНАОД. На рис.21 представлена зависимость сечения (σ) от напряжения управления порогом дискриминатора.

Экспериментальные результаты, полученные при облучении ИС АНОД, показывают, что частота регистрируемых SEU эквивалентна ~ 2 SEU/мин на канал и слабо зависит от флюенса нейтронов вплоть до максимального $\Phi = 6 \times 10^{11} \text{ н / см}^2$. Сравнивая полученную величину с ожидаемым уровнем фоновых загрузок в области мюонной станции ME1/1 ~ 100 кГц/канал, можно утверждать, что влияние SEE эффектов на работу ИС АНОД незначительно.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработано и изготовлено несколько поколений электроники регистрации информации с CSC, которыми оснащен ряд прототипов камер, испытанных в пучках заряженных частиц в ЦЕРНе и в космических лучах на экспериментальном стенде в ЛФЧ ОИЯИ.

2. С помощью созданной электронной аппаратуры впервые экспериментально показана адекватность характеристик первых прототипов CSC требованиям к детектору торцевой части мюонного спектрометра. Экспериментально получены рекордные характеристики работы CSC: пространственное разрешение $\sigma \sim 50$ мкм и временное разрешение $\sigma \sim 2$ нс. Исследовано влияние ряда физических факторов на работу детектора в условиях, близких к реальным в установке CMS:

- под действием магнитного поля, смещается направление дрейфа электронов к анодным проволокам, что приводит к деградации пространственного разрешения CSC. Показано, что частично компенсировать эффект можно поворотом анодных проволочек на угол α (угол Лоренца) относительно радиальной оси стрипов (для CSC мюонной станции ME1/1 $\alpha_L \sim 29^\circ$);
- измеренная вероятность образования вторичных треков в CSC от электромагнитного сопровождения составила: $10,3 \pm 0,2\%$ для энергий мюона 200 ГэВ/с и $11,6 \pm 0,2\%$ для энергий мюона 300 ГэВ/с. Исследования показали, что многослойные камеры позволяют сохранить высокую точность и эффективность в условиях электромагнитного сопровождения мюонов. В большинстве случаев только 1-2 слоя камеры поражены электромагнитным сопровождением.

3. Экспериментально исследована возможность идентификации трека заряженной частицы и определение момента рождения события с помощью информации, считываемой с анодных проволочек CSC. Впервые показано, что быстрые сигналы, приходящие с анодных плоскостей, обеспечивают однозначное определение временного интервала взаимодействия пучков коллайдера: 1ый и 2ый сигналы могут быть использованы для указания момента взаимодействия, а мажоритарное совпадение сигналов с 6 плоскостей определяет принадлежность события к треку заряженной частицы. Время, необходимое для идентификации трека, может быть меньше, чем два интервала взаимодействия пучков коллайдера (50 нс).

4. Совместно с НЦФЧВЭ, Минск разработаны и изготовлены специализированные большие интегральные схемы (ИС) электроники регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1:

КАТОД 1 - 16-ти каналный зарядочувствительный усилитель-формирователь для регистрации информации с катодных стрипов;

КАТОД 3 - 16-ти каналный формирователь-дискриминатор быстрого канала;

АНОД - 8-ми каналный усилитель-формирователь-дискриминатор для регистрация информации с анодных проволочек.

5. Впервые экспериментально исследованы временные характеристики быстрого и медленного каналов электроники чтения информации с катодных стрипов в условиях

больших фоновых загрузок, имитирующих реальные условия работы электроники считывания в установке CMS.

- При загрузках ~ 100 кГц/канал пространственная точность камеры, измеренная с помощью электроники регистрации на основе ИС КАТОД-1, составила $\sigma \sim 70$ мкм, при эффективности восстановления треков близкой к 100%;
- эффективность реконструкции треков быстрым катодным каналом (с точностью $\pm 0,5$ ширины стрипа) на основе ИС КАТОД-3 составила $\sim 98\%$ в отсутствии фона и $\sim 87\%$ при фоновых загрузках ~ 400 кГц/канал.

6. На базе изготовленной в Минске серии специализированных интегральных схем, разработана и изготовлена многоканальная система считывания информации с CSC. Испытание электроники регистрации с предсерийными прототипами CSC проведено в пучках заряженных частиц и на стенде с космическими частицами. Экспериментальные результаты показали полное соответствие характеристик детектора требованиям CMS, что позволило начать серийное изготовление камер.

7. Экспериментально исследована радиационная стойкость интегральной схемы АНОД -многоканального усилителя-формирователя -дискриминатора для регистрации информации с CSC мюонной станции ME1/1 установки CMS. Показано, что для условий облучения соответствующих реальным в области расположения мюонной станции ME1/1, радиационная стойкость ИС АНОД удовлетворяет требованиям CMS.

Диссертация основывается на следующих опубликованных работах:

1. S.Albajar, et al., Electromagnetic secondaries in the detection of high energy muons, CERN-PPE 94-204, Geneva, pp. 1-20, 1994, Nucl.Inst. and Meth. A364, (1995)473-487.
2. I.A. Golutvin, N.V. Gorbunov, V.Yu. Karjavin, et al., The rate Capability of the CSC Readout Electronics, Письма в ЭЧАЯ №4[107]-2001.
3. И.А.Голутвин, И.М.Граменицкий, А.В. Зарубин, В.Ю.Каржавин, и др., Временное разрешение камер с сегментированным катодом мюонной станции ME1/1 компактного мюонного соленоида и идентификация момента взаимодействия пучков коллайдера, Письма в ЭЧАЯ №4[107]-2001.
4. И.А.Голутвин, Н.В. Горбунов, В.Ю.Каржавин, и др., Исследование радиационной стойкости интегральной схемы "Анод", Сообщение ОИЯИ, P13-2001-152.
5. И.А.Голутвин, Н.В. Горбунов, В.Ю.Каржавин, и др., Интегральная схема "КАТОД-1" для считывания информации со стрипов катодной стриповой камеры., Сообщение ОИЯИ, P13-2001-151

Рукопись поступила в издательский отдел
6 сентября 2001 года.

Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 10.09.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 1,58
Тираж 100. Заказ 52852.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области