



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2008–13
На правах рукописи

Гилицкий Юрий Владимирович

**ГАЗОВАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
С ВЫСОКИМИ ЗАГРУЗКАМИ**

01.04.23 – физика высоких энергий

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Протвино 2008

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино)

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук С.П. Денисов.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.А. Сенько, доктор физико-математических наук В.Н. Болотов.

Ведущая организация – Московский инженерно-физический институт (г. Москва)

Защита диссертации состоится « ____ » _____ 2008 г.
в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01
при Институте физики высоких энергий по адресу 142281 г. Протвино
Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Калориметры, используемые для измерения энергии частиц, стали неотъемлемой частью экспериментальных установок во всех крупных экспериментах последних десятилетий в области физики высоких энергий. Все достоинства данного класса приборов хорошо известны, широк спектр их реализаций, позволяющий достаточно быстро решать сложные задачи, выдвигаемые новыми экспериментами. Основным достоинством этих детекторов является улучшение их точностных характеристик с ростом энергии частиц и струй. Современные калориметры обладают, как правило, высокими быстродействием и сегментацией, что позволяет использовать информацию с них не только для измерения энергии, но и для идентификации частиц и определения их координат, а также формировать высокоселективный триггер на события с интересующей топологией, что важно в экспериментах с высокими нагрузками.

Но устойчивая тенденция роста числа каналов съема информации (до сотен тысяч), ужесточение противоречивых требований на повышение быстродействия и точности, а также использование их в сильных магнитных полях при высоких радиационных нагрузках из-за постоянного роста энергии и интенсивности ускорителей (например, в коллайдере LHC плановая светимость должна составлять $1.0 \times 10^{34} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ с последующим увеличением на порядок при энергии пучков 7 ТэВ и интервалом между взаимодействиями 25 нс) требуют поиска новых решений при создании калориметров.

Цель диссертационной работы состояла в разработке и исследовании характеристик газовых ионизационных калориметров для экспериментов с высокими нагрузками.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Создание и исследование характеристик адронных газовых ионизационных калориметров в едином газовом объеме.
2. Оптимизация шумовых характеристик газовых ионизационных калориметров с сосредоточенной емкостью детектора и кабельной связью с предварительным усилителем.
3. Создание и исследование характеристик газового ионизационного калориметра с модульной структурой и тяжелым фреоном-218 (C_3F_8) в качестве активной среды.
4. Оптимизация быстродействия и шумовых характеристик газовых ионизационных калориметров с распределенной емкостью детектора и кабельной связью с предварительным усилителем.

Научная новизна и практическая ценность

Впервые созданы и исследованы газовые адронные ионизационные калориметры с плоско-параллельной структурой электродов, которые имеют хорошие энергетическое, пространственное и временное разрешения. Высокая линейность и быстродействие позволяют применять их в экспериментах с большими интенсивностями пучков частиц.

Первое использование в калориметрии тяжелого фреона-218 в качестве активной среды детектора показало, что возможно снижение рабочего давления до нескольких атмосфер без потери быстродействия и уровня полезного сигнала по сравнению с «быстрыми» газовыми смесями на основе аргона, а стохастический член энергетического разрешения практически не зависит от избыточного давления.

Впервые подробно рассмотрены вопросы, связанные с применением кабельной связи между детектором и предварительным усилителем и продольным объединением ячеек в калориметре. Показано, что при использовании продольного объединения ячеек калориметра емкость детектора нельзя считать сосредоточенной, а каждый зазор имеет свой характеристический импеданс. Минимальная длительность отклика достигается при согласовании импеданса калориметра с передающей линией и входным сопротивлением предварительного усилителя. Применение кабельной связи позволяет вынести регистрирующую электронику из зоны с высокими потоками частиц и использовать калориметры в больших радиационных полях.

Апробация результатов и публикации

Диссертация написана на основе работ, выполненных в Отделе нейтринной физики ИФВЭ во время разработки, создания и исследования газовых ионизационных калориметров. Работы [1–4], составляющие основное содержание диссертации, опубликованы в виде препринтов ИФВЭ, в журналах «Приборы и Техника Эксперимента» и «Nuclear Instruments and Methods», в Трудах VI Международной конференции «Калориметрия в физике высоких энергий» (Рим, Италия, 1996) и VIII Международной конференции по проволочным камерам (Вена, Австрия, 1998).

Объем и структура диссертации

Работа изложена на 109 страницах, состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 59 рисунков, 4 таблицы и список цитируемой литературы из 57 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дана классификация калориметров и описаны физические процессы, определяющие их характеристики, а также приведены различные реализации калориметров в современных экспериментах и дан их сравнительный анализ. Также рассмотрены вопросы, связанные с работой калориметров при высоких радиационных нагрузках и оценены пределы радиационной стойкости различных типов калориметров.

Из большого множества типов калориметров, созданных для различных экспериментов в физике высоких энергий, высокой радиационной стойкостью обладают далеко не все. Особенно высокой радиационной стойкостью обладают, в частности, кварцевые и ионизационные калориметры. Именно поэтому на коллайдере LHC в качестве переднего калориметра установки CMS используется кварцевый вариант, а в эксперименте ATLAS – жидкоаргонный, радиационная нагрузка которых за десять лет эксплуатации должна составить более 1 Град.

Одним из перспективных направлений в калориметрии являются детекторы на базе газовых ионизационных камер, так как подвижность носителей заряда в газах на порядок выше, чем в жидкостях. Газовые ионизационные калориметры обладают хорошим энергетическим и временным разрешением, а также высокой радиационной стойкостью.

Вторая глава посвящена вопросам разработки и измерения характеристик газового ионизационного адронного калориметра с плоскопараллель-

ной геометрией электродов (рис.1). Блок-схема регистрирующей электроники показана на рис. 2.

Зависимость энергетического разрешения газового ионизационного калориметра с 6.5 мм урановыми поглотителями при давлении рабочей смеси 95%Ar + 5%CF₄ 40 атмосфер и высоком напряжении 4 кВ от энергии адронов, измеренная на пучках ускорителя ИФВЭ, имеет вид

$$\sigma(E)/E = 3.3/E \oplus (0.69/\sqrt{E} + 0.016), \quad E \text{ в ГэВ.}$$

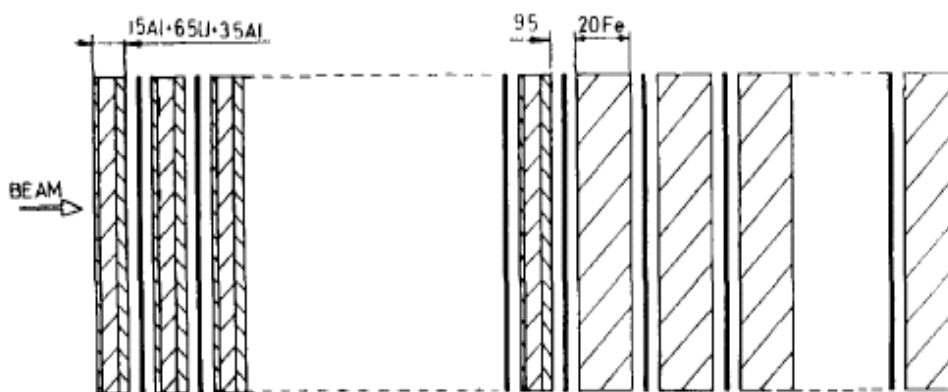


Рис. 1. Структура электродов калориметра с 60 урановыми поглотителями толщиной 6.5 мм каждый и 15 стальными поглотителями по 20 мм. Двойной газовый зазор составляет 2x4.25 мм. Поперечный размер равен 580x580 мм², размер каждой из трех ячеек — 420x140 мм².

Стохастический член в этой формуле имеет величину, характерную для адронных калориметров. Оказалось, что он не зависит от давления рабочего газа в интервале от 5 до 40 атмосфер. Малость постоянного члена свидетельствует о хорошей однородности детектора и близком к единице отношении e/h , где e и h — отклики калориметра на электромагнитный (e) и адронный (h) ливни одинаковой энергии. Ввиду важности величины e/h она была измерена непосредственно и оказалась равной 1.17 ± 0.03 . При добавлении в газовую смесь 10% метана e/h уменьшилось до 1.07 ± 0.03 . В специальных измерениях было показано, что величина e/h зависит от длительности строб-импульса АЦП и его положения относительно сигнала с калориметра и может оказаться даже меньше единицы.

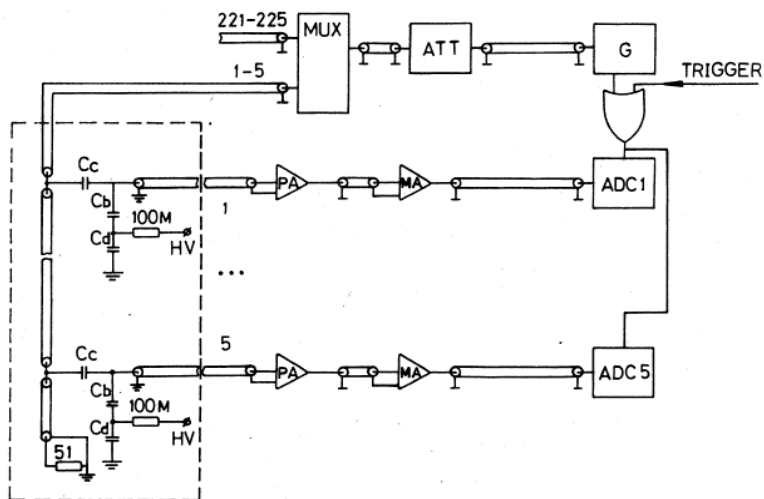


Рис. 2. Блок-схема регистрирующей и калибровочной электроники.

РА – предварительный усилитель с током головного транзистора 0.5 мА, включенного по схеме с общей базой; МА – основной усилитель; G – калибровочный генератор; АТТ и МUX – управляемые аттенуатор и аналоговый мультиплексор 45х1; АDС – аналого-цифровой преобразователь. Емкость детектора $C_d=290$ пФ; разделительная емкость $C_b=2200$ пФ; калибровочная емкость $C_c=1$ пФ. Пунктиром указаны элементы, расположенные в газовом объеме детектора.

Особое внимание во второй главе уделено оптимизации характеристик регистрирующей электроники (см. рис. 3–5). В частности, найдено, что при кабельном соединении между детектором и предварительным усилителем с «холодным» согласованием уровень шумов определяется током через головной элемент усилителя с фиксированным входным сопротивлением и не зависит от схемы его включения, что позволяет вынести регистрирующую электронику из радиационно опасной зоны без потери быстродействия и ухудшения шумовых характеристик детектора.

Введение обратной связи по входу усилителя позволяет обеспечить не только оптимальный ток головного транзистора при фиксированном входном сопротивлении, но и значительно расширить его динамический диапазон. Это дало возможность понизить уровень шумов одного канала калориметра с емкостью ячейки 290 пФ с 12.4 до 8 ке.

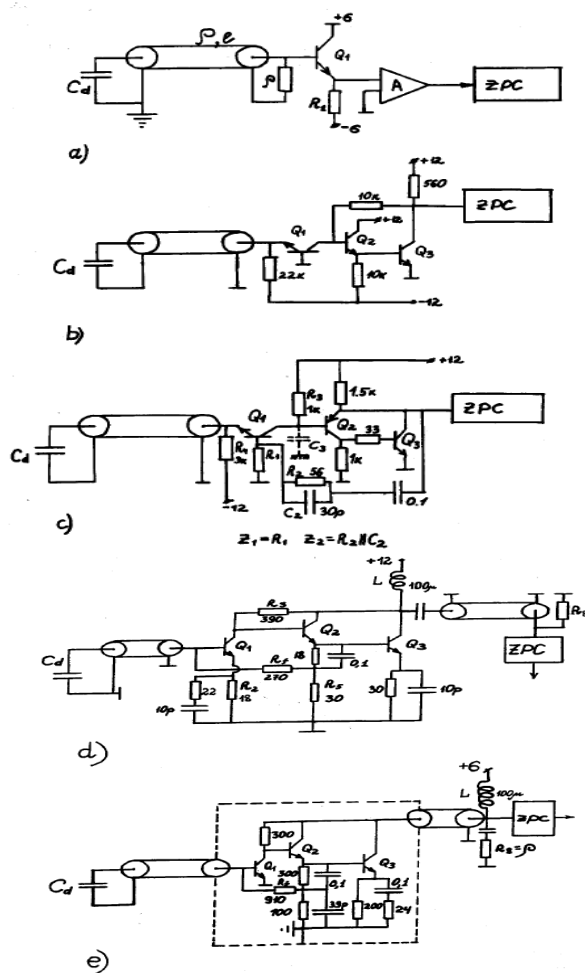


Рис. 3. Упрощенные принципиальные схемы токовых предварительных усилителей с фиксированным входным сопротивлением: **а** – схема с головным элементом с общим коллектором при $I_{c1} = 3.7$ мА и входным резистором, равным волновому сопротивлению передающей линии; **б** – схема с головным транзистором с общей базой и входным сопротивлением 50 Ом; **в** – конфигурация с головным элементом с общей базой при $I_{c1} = 3.7$ мА и обратной связью; **г** – схема с головным элементом с общим эмиттером с двумя цепями обратной связи при $I_{c1} = 20$ мА; **д** – схема с головным элементом с общим эмиттером с двумя цепями обратной связи при $I_{c1} = 3.7$ мА.

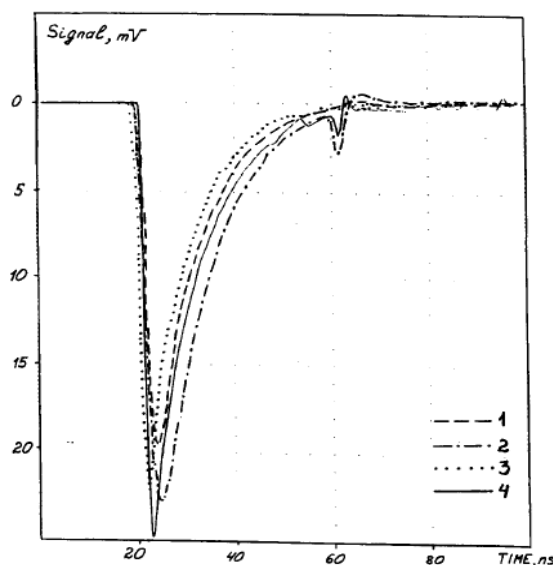


Рис. 4. Выходные сигналы различных конфигураций токовых усилителей после цепи компенсации полюса нулем передаточной характеристики: **1** – конфигурация с общей базой при $I_c=0.5$ мА без обратной связи по входу (рис. 3b); **2** – конфигурация с общей базой при $I_c=3.7$ мА с обратной связью по входу (рис. 3c); **3** – конфигурация с общим эмиттером при $I_c=20$ мА с глобальной и локальной обратной связью по входу (рис. 3d); **4** – конфигурация с общим эмиттером при $I_c=3.7$ мА с глобальной и локальной обратной связью по входу (рис. 3e).

Результаты исследований характеристик тяжелого фреона-218 как активного вещества в газовых ионизационных калориметрах с модульной структурой (рис. 6, 7) приведены в **третьей главе** (см. рис. 8–10). Измерения показали, что скорость дрейфа электронов в фреоне-218 сравнима со скоростью дрейфа в так называемых «быстрых», но значительно менее плотных газовых смесях, а уровень собственной электроотрицательности данного фреона в области режима ионизационной камеры мал. При чистоте фреона-218 0.9999 средний пробег дрейфующих электронов составляет 22.5 мм при давлении 1 атм (рис. 8), что значительно превышает зазор между электродами, равный 3 мм, и обеспечивает почти 100%-ный сбор ионизационного заряда.

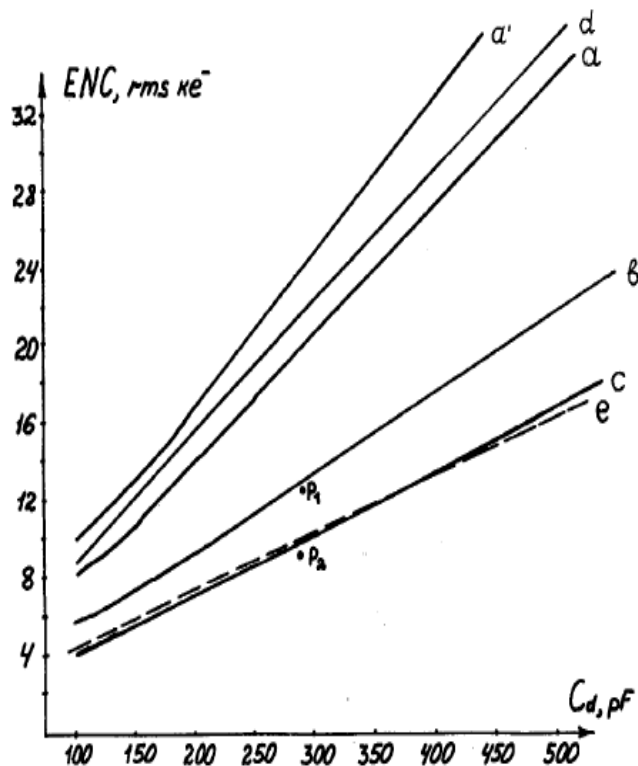


Рис. 5. Зависимость эквивалентного шумового заряда от емкости детектора при фиксированной длине кабеля 4 м с волновым сопротивлением 50 Ом и с выходным сигналом фиксированной длительности (см. рис. 4). Кривая **a** – эмиттерный повторитель с входным резистором 50 Ом и последующим идеальным усилителем; кривая **a'** – эмиттерный повторитель с входным резистором 50 Ом и последующим реальным транзистором с общим эмиттером; кривая **b** – конфигурация с общей базой при $I_c = 0.5$ мА без обратной связи по входу; кривая **c** – конфигурация с общей базой при $I_c = 3.7$ мА с обратной связью по входу; кривая **d** – конфигурация с общим эмиттером при $I_c = 20$ мА и двумя цепями обратной связи по входу; кривая **e** – конфигурация с общим эмиттером при $I_c = 3.7$ мА и двумя цепями обратной связи по входу. Точки P_1 и P_2 соответствуют измерениям на калориметрической ячейке для конфигураций, представленных кривыми **b** и **c**.

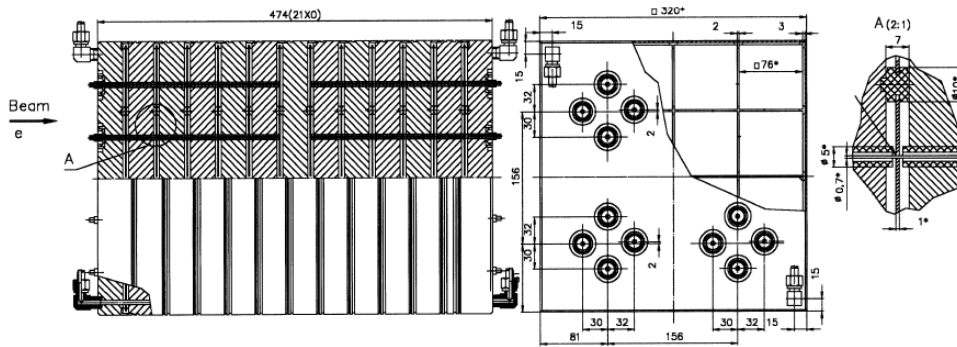


Рис. 6. Конструкция модуля газового ионизационного калориметра с 30-мм стальными поглотителями и сдвоенным газовым зазором по 3 мм.

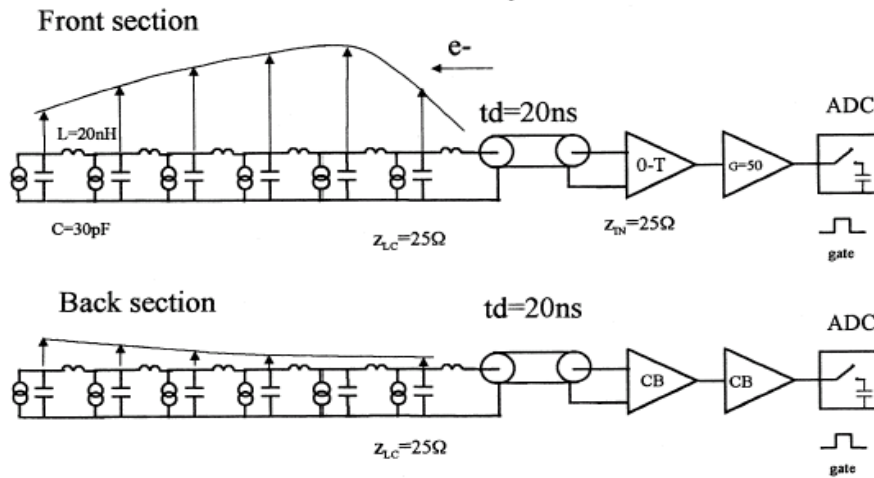


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема электроники считывания ячейки детектора. Кривые показывают распределение амплитуд сигналов от электромагнитного ливня в зазорах по глубине ячейки калориметра.

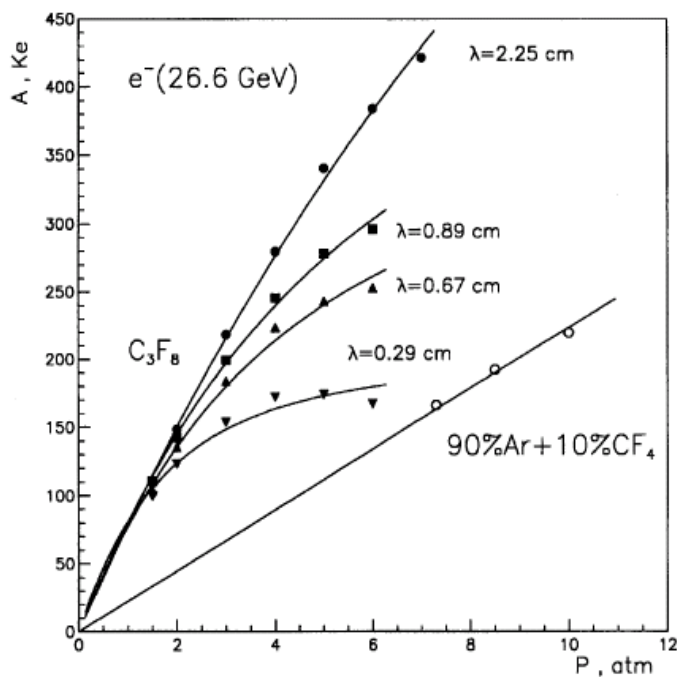


Рис. 8. Зависимость среднего отклика калориметра для электронов с энергией 26.6 ГэВ от давления рабочего газа. Средняя длина свободного пробега электронов в C_3F_8 с чистотой от 99 до 99.99%, приведенная к атмосферному давлению, измерена при отношении высокого напряжения к давлению 830 В/атм для зазора 3 мм.

Рис. 9 демонстрирует слабую зависимость отклика калориметра от длительности измерений, что связано с малой длительностью сигналов. Как следует из рис. 10, стохастический член энергетического разрешения не зависит от давления C_3F_8 в диапазоне от 2 до 7 атмосфер.

В части, касающейся электроники, показано, что согласование детектора и передающей линии до предварительного усилителя позволяет получить отклик минимальной длительности при использовании объединения ячеек по глубине калориметра (рис. 11, 12). Зависимости уровня шума от длительности измерений представлены на рис. 13 и 14.

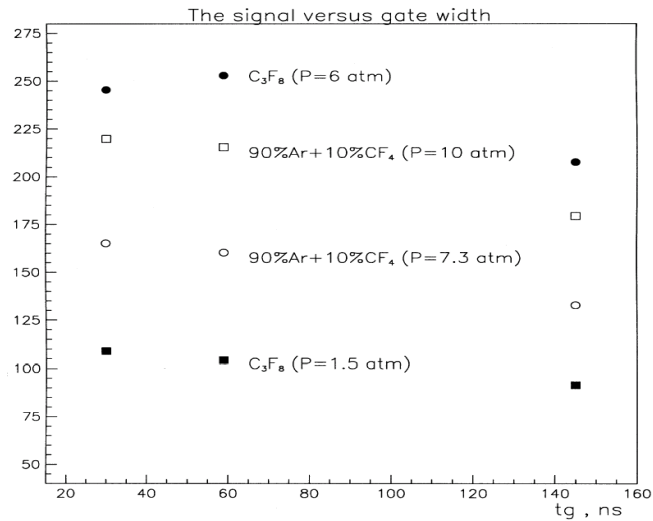


Рис. 9. Зависимость отклика калориметра на электроны с энергией 26.6 ГэВ от длительности измерений при максимальной скорости дрейфа для различных давлений фреона-218 и смеси 90% Ar + 10% CF₄.

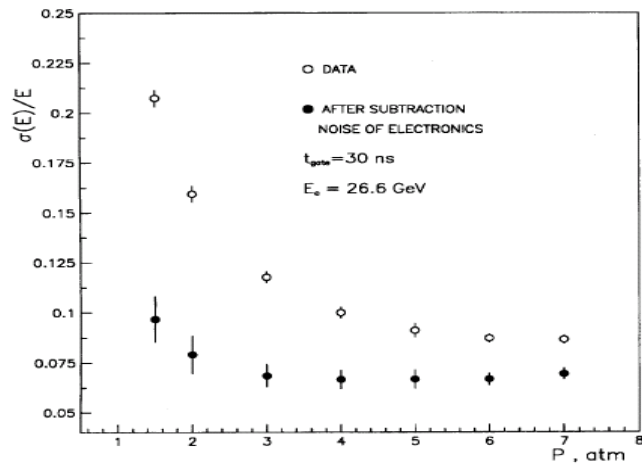


Рис. 10. Зависимость энергетического разрешения калориметра для электронов с энергией 26.6 ГэВ от давления фреона-218 с учетом шума усилителей и после его вычитания при длительности измерений 30 нс и постоянной скорости дрейфа ($E/P = \text{const}$).

Полученные результаты позволяют утверждать, что тяжелые фреоны являются перспективной рабочей средой в газовых ионизационных калориметрах и их использование дает возможность значительно снизить рабочее давление при создании «быстрых» детекторов, которые работают в условиях больших нагрузок. Показано также, что в случае объединения ячеек калориметра по глубине емкость детектора нельзя рассматривать как сосредоточенную суммарную емкость зазоров.

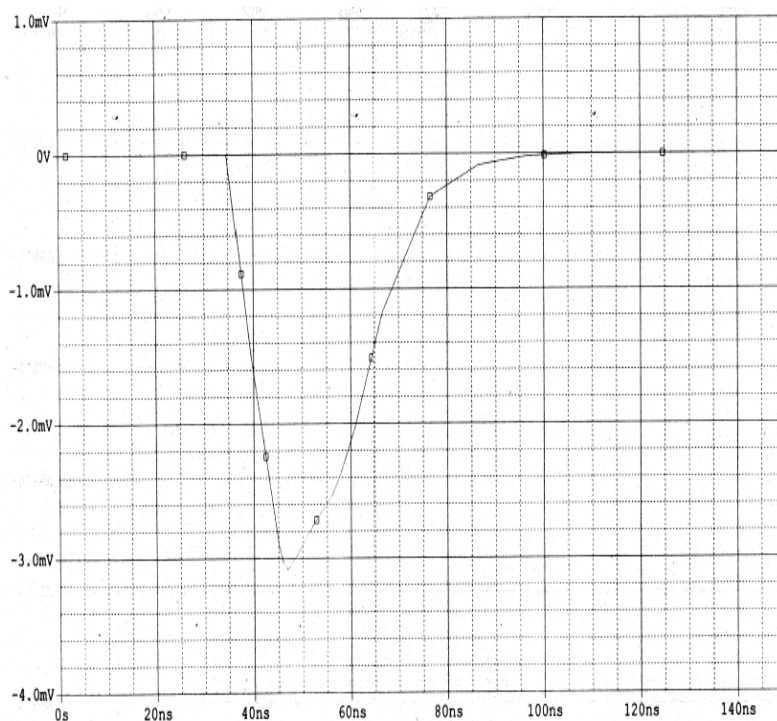


Рис. 11. Расчетная форма импульса от электромагнитного каскада в передней секции модуля с характеристическим импедансом 25 Ом, соединенной с 4-м передающей линией с волновым сопротивлением 50 Ом при скорости дрейфа электронов 0.1 мм/нс.

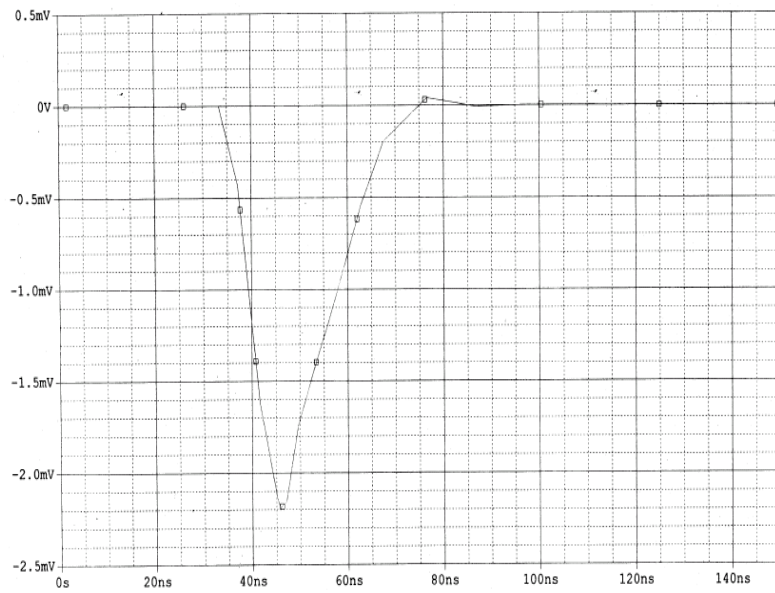


Рис. 12. Расчетная форма импульса от электромагнитного каскада в передней секции модуля, согласованной с передающей линией и предварительным усилителем ($Z=25 \text{ Ом}$) при скорости дрейфа электронов 0.1 мм/нс .

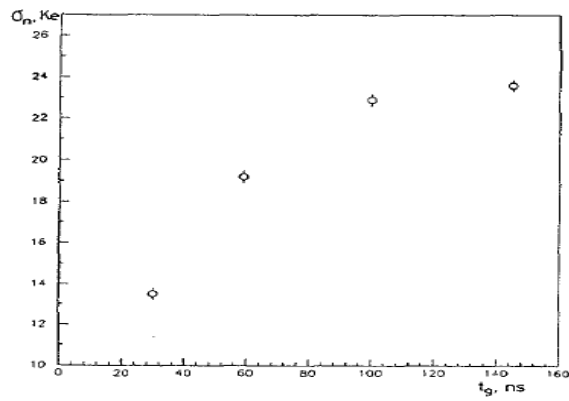


Рис. 13. Зависимость эквивалентного шумового заряда от времени измерений для двух каналов по глубине калориметра с характеристическим импедансом 25 Ом и передающей линией с волновым сопротивлением 50 Ом .

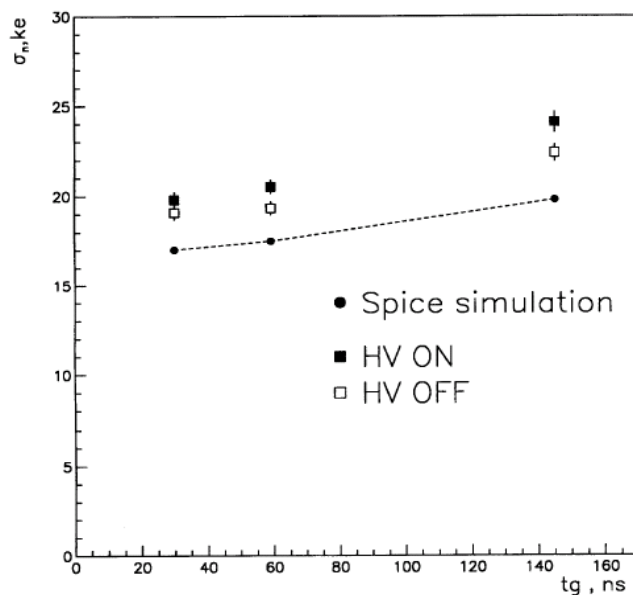


Рис. 14. Зависимость эквивалентного шумового заряда двух каналов по глубине калориметра от длительности измерений при согласовании детектора, передающей линии и усилителя ($Z=25$ Ом).

В Заключение перечислены основные результаты диссертационной работы. Они состоят в следующем:

1. Разработаны и исследованы газовые ионизационные калориметры с плоскопараллельной структурой электродов. В частности, для калориметра с урановыми пластинами толщиной 6.5 мм, наполненного смесью 95% Ar + 5% CF₄ при давлении 40 атмосфер, энергетическое разрешение имеет вид

$$\sigma(E)/E = 3.3/E \oplus (0.69/\sqrt{E} + 0.016), \text{ где } E \text{ в ГэВ,}$$

причем стохастический член практически не зависит от давления в интервале от 5 до 40 атмосфер.

2. Другой важной характеристикой калориметров является отношение e/h откликов на электроны и адроны. Для калориметра с 6.5-мм урановыми поглотителями и рабочим газом 95% Ar + 5% CF₄ при давлении 40 атмосфер получено близкое к единице значение $e/h=1.17\pm 0.03$. При добавлении в рабочий газ метана, содержащего атомы водорода, это отношение уменьшилось до 1.07 ± 0.03 . По-

казано, что e/h зависит от длительности стробимпульса АЦП и его положения относительно сигнала с калориметра и может оказаться даже меньше единицы. Возможность получения близкого к 1 значения e/h является важным достоинством ионизационных газовых калориметров.

3. Ключевой проблемой при создании газовых ионизационных калориметров является уровень шума регистрирующей электроники при высоком ее быстродействии. Проведенный анализ характеристик быстрых токовых усилителей с фиксированным входным сопротивлением 50 Ом для адронных калориметров с сосредоточенной емкостью показал, в частности, что уровень шума определяется током головного элемента, не зависит от схемы его включения и может быть доведен до 8 ке при емкости ячейки 290 пФ.

4. Прямой способ понижения давления рабочего газа без потери амплитуды сигнала – применение газов с высокой плотностью. К таким газам относится фреон C_3F_8 , плотность которого в 4.4 раза выше, чем у смеси $Ar+CF_4$, при примерно одинаковой скорости дрейфа электронов. Выполненные измерения показали низкий уровень собственной электроотрицательности этого газа при используемых в ионизационном режиме напряженностях электрического поля: средний пробег электрона в C_3F_8 при атмосферном давлении и чистоте 0.9999 составляет 2.25 см, что значительно превышает ширину газового промежутка в исследованных калориметрах.

5. Разработан и исследован газовый ионизационный калориметр с модульной структурой и плоскопараллельной геометрией электродов. Энергетическое разрешение для электронов с энергией 26.6 ГэВ у сборки из двух модулей, каждый из которых содержит шесть 30-мм стальных конверторов и заполнен фреоном C_3F_8 , оказалось близким к 7% после вычитания шума электроники, что согласуется с результатами моделирования. Эта величина почти не зависит от давления рабочего газа в интервале от 2 до 7 атмосфер.

6. Продемонстрировано, что объединение ячеек по глубине калориметра при условии согласования детектора с каналом регистрации позволяет достичь длительности выходного сигнала 40 нс при скорости дрейфа электронов в рабочем газе ~ 0.1 мм/нс, характерной для «быстрых» газов, включая фреон C_3F_8 и смеси $Ar+CF_4$, без потери амплитуды сигнала.

7. Показано, что в случае объединения ячеек калориметра по глубине емкость детектора нельзя рассматривать как сосредоточенную суммарную емкость зазоров для расчетов шумовых характеристик детектора.

Список литературы

- [1] First investigation of the gas ionization electromagnetic calorimeter using heavy freon C_3F_8 .
Yu.V. Gilitsky, S.P. Denisov, A.Yu. Dushkin, V.N. Mikhailin, V.A. Onuchin, A.P. Soldatov, V.V. Sytnik, I.V. Shein (Serpukhov, IHEP). 1997.
Instrum. Exp. Tech. 40: 595-599, 1997.
Приборы и Техника Эксперимента, 40N5, стр. 12-16, 1997.
- [2] Use of heavy freons in gas ionization calorimetry.
S.P. Denisov, A.Yu. Dushkin, Yu.V. Gilitsky, V.N. Mikhailin, V.A. Onuchin, I.V. Shein A.P. Soldatov, V.V. Sytnik (Serpukhov, IHEP) . IFVE-96-74, IHEP-96-74, Sep 1996. 7 pp.
Presented at the 6th International Conference on Calorimetry in High-energy Physics (ICCHEP 96), Rome, Italy, 8-14 Jun 1996.
Published in "Frascati 1996, Calorimetry in high energy physics" 165-170.
- [3] A fast gas ionization calorimeter filled with C_3F_8 for operation at high counting rates and hard radiation environment.
S. Denisov, A. Dushkin, N. Fedyakin, Yu. Gilitsky, M. Lyudmirsky, A. Spiridonov, V. Sytnik (Serpukhov, IHEP & Moscow State U.).
Presented at the 8th Vienna Wire Chamber Conference (WCC 98), Vienna, Austria, 23-27 Feb. 1998.
Published in Nucl. Instrum. and Meth. A419: 590-595, 1998.
- [4] Analysis of noise, speed and dynamic range of fast low-noise preamplifiers for termination of transmission lines. N. Fedyakin and Yu. Gilitsky.
Nucl. Instrum. and Meth., A346, P. 292, 1994.

Рукопись поступила 2 октября 2008 г.

Ю.В. Гилицкий.
Газовая калориметрия для экспериментов с высокими нагрузками.

Редактор Н.В. Ежела.

Подписано к печати 06.10.2008. Формат 60 × 84/16. Офсетная печать.
Печ.л. 1,06. Уч.–изд.л. 0,85. Тираж 100. Заказ 62. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2008-13, И Ф В Э, 2008
