

С-41



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 539.1.074

13-89-453

**СИТАР Бранислав**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ  
ГАЗОВЫХ КООРДИНАТНЫХ ДЕТЕКТОРОВ:  
ДРЕЙФОВЫХ, ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ  
И КОРОННЫХ КАМЕР,  
ДЛЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук**

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник

В.Н.Ройнишвили

доктор физико-математических наук  
профессор

В.И.Рыкалин

доктор технических наук  
старший научный сотрудник

А.И.Филиппов

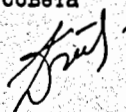
Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР (Москва).

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1989 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, - Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1989 г.

Ученый секретарь специализированного совета  
доктор физико-математических наук

 Д.А.Батузов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работ

Одним из основных звеньев современных спектрометрических комплексов для экспериментов по физике высоких энергий являются газовые координатные детекторы, с помощью которых измеряют импульс частиц, их угловое распределение, а иногда идентифицируют их природу (массу). Крупные установки на ускорителях нового поколения, таких как УНК, LEP, HERA, Tevatron и др., содержат большое количество разнообразных газовых координатных детекторов, прежде всего пропорциональных и дрейфовых камер. Такие камеры применяются в физическом эксперименте уже около 20-ти лет, тем не менее за последнее время происходит бурное развитие методики, связанной с этими детекторами. Ведутся работы по улучшению их параметров, прежде всего координатного разрешения, уменьшению стоимости единицы площади детектора, разрабатываются крупные камеры с большой площадью и объемом. На основе пропорциональных и дрейфовых камер (ДК) создают совершенно новые детекторы, такие как времяпроекционная камера, камеры с продольным дрейфом электронов, индукционные камеры, ДК, работающие в СГС-режиме, электролюминесцентные ДК и т.п., которые вносят новое качество в методику физического эксперимента /1-3/.

Не менее важным является трансформация новых идей и достижений методики газовых координатных детекторов из физики высоких энергий в другие области науки и техники. Появление таких детекторов в биологии, медицине, кристаллографии, экологии и во многих других отраслях науки приводит к качественному скачку в методике исследования и открывает совершенно новые возможности в развитии этих наук <sup>ж1</sup>.

### Цель работ

I. Разработка новых типов и модификаций газовых координатных детекторов, методики их применения в экспериментах по физике высоких энергий, в частности в экспериментах на пучках УНК. Некоторые детекторы и методические подходы разрабатывались для экспериментов по физике адронов в области энергий 5-15 ГэВ на установке "Гиперон", работающей на У-70 в ИФВЭ.

<sup>ж1</sup> Пешехонов В.Д. ЭЧАЯ, 1986, т.17, вып.5, с.1030.

2. Разработка новых газовых координатных детекторов на основе пропорциональных, дрейфовых и коронных камер и методики их применения в экспериментах по ядерной физике, биологии, медицине, гидрогеологии, в исследовании структуры материалов и других областях науки и техники.

Научная новизна:

- Разработана времяпроекционная камера (ВПК) с оригинальным съемом информации вдоль сигнальных проволочек с помощью линий задержки, обеспечивающим хорошее пространственное разрешение ( $\sim 1$  мм) и однозначное определение координат трека при существенно меньшей стоимости, чем в других методах (например, в методе катодных площадок). ВПК представляют собой вершину современной техники больших координатных детекторов, позволяющих наряду с координатными измерениями идентифицировать релятивистские заряженные частицы по их ионизационному эффекту. В странах-участницах ОИЯИ в настоящее время ни одна ВПК в эксперименте не работает. Описание нашей ВПК вошло в качестве примера оригинального подхода в рапортерский доклад на XXIV Международной конференции по физике высоких энергий в Мюнхене <sup>ж2</sup>.

- Разработана электронная аппаратура нового типа для съема информации с ВПК и ШДК с малым мертвым временем (64 нс), регистрирующая до 256 сигналов в течение 16 мкс. Основные модули этой аппаратуры - многостоповый ВЦП <sup>/5/</sup> с временным разрешением 1 нс и быстродействующий параллельный АЦП <sup>/6/</sup> с временем квантования сигнала 64 нс - принадлежат к лучшим мировым образцам.

- Разработана камера с продольным дрейфом электронов для счета кластеров первичной ионизации <sup>/7,8/</sup>. Наша камера была первой с параметрами, соответствующими большому идентификатору частиц, в которой была реализована в данных условиях максимально достижимая в настоящее время эффективность счета кластеров.

- Впервые исследована трансформация от пуассоновского распределения первичной ионизации к распределению Ландау полной ионизации методом счета кластеров. Новые сведения о диффузионном распаде кластеров при их дрейфе очень важны для теории переноса электронов в газе, а также для оптимизации работы дрейфовых камер.

- Впервые дрейфовые камеры нового типа - безэлектродные ДК - были успешно применены на пучке частиц ускорителя <sup>/10/</sup>. Проведенные исследования показали, что некоторые характеристики БДК существенно отличаются от характеристик электродных ДК. Правильным использованием этих специфических свойств удалось достигнуть хорошего пространствен-

ного разрешения 0,2-0,4 мм, высокой эффективности ( $> 95\%$ ) в интенсивных пучках до  $5 \cdot 10^5$  част./с на проволочку. Наши работы по БДК вошли в рапортерский доклад на XXII Международной конференции по физике высоких энергий в Лейпциге <sup>ж3</sup>.

- Разработаны и впервые применены в физическом эксперименте большие безэлектродные ДК с чувствительной площадью  $1 \times 1 \text{ м}^2$  <sup>/12/</sup>. Показаны высокие эксплуатационные качества БДК в условиях физического эксперимента. Таким образом, в арсенале экспериментаторов появился новый "экономный" координатный детектор.

- Предложен новый способ улучшения пространственного разрешения ливневого годоскопического детектора (ЛГД) с помощью дополнительного активного конвертора (АК) и широкоазорной дрейфовой камеры <sup>/13/</sup>. Устройство, включающее в себя конвертор, ШДК, формирователь сигналов и многостоповый ВЦП, признано изобретением <sup>/15/</sup>. Предложенным способом достигнуто рекордное пространственное разрешение  $\sigma = 2$  мм при регистрации ливня от позитрона с энергией 3 ГэВ.

- Впервые измерено поперечное распределение ионизационных потерь энергии на разных глубинах развития ливня в свинцовом стекле. Наши точные измерения подтвердили двухэкспоненциальный характер поперечного распределения и его переход в одноэкспоненциальный на больших глубинах развития ливня. Экспериментальные распределения согласуются с расчетными, полученными методом Монте-Карло <sup>/16/</sup>.

- Разработан детектор пробега ионов на основе пропорциональных камер, с помощью которого достигнуто рекордное разрешение - 0,1% <sup>/18/</sup> по плотности измеряемого объекта.

- Предложен и экспериментально реализован новый метод нейтронной радиографии <sup>/20/</sup> на основе дрейфовой проекционной камеры низкого давления, зарегистрированный как изобретение <sup>/19/</sup>. Метод обеспечивает рекордное среди бесфильмовых методов нейтронной радиографии пространственное разрешение (0,2-0,3 мм), а также дает возможность работать в условиях сильной радиационной загрузки. Созданная дрейфовая проекционная камера <sup>/21/</sup> является первым прибором этого типа, примененным в другой области, не в физике высоких энергий.

- Предложен и разработан новый тип газового координатного детектора - многопроволочная коронная камера (КК) <sup>/22/</sup>, являющаяся аналогом пропорциональной камеры. Наши разработки и исследования КК признаны основополагающими <sup>ж4</sup>.

<sup>ж3</sup> Fischer H.G. Proc. XXII Int. Conf. on High En. Phys., Leipzig, 1984, p.376.

<sup>ж4</sup> Aoyama T., Watanabe T. Nucl. Instr. and Meth., 1982, v.197, p.357.

<sup>ж2</sup> Dainton J.B. Proc. XXIV Int. Conf. on High En. Phys., Munich, 1988, p.1229.

- Экспериментально обнаружен локальный характер дополнительного разряда от сильноионизирующей частицы в коронной камере /25/. Этим удалось объяснить наблюдаемую в КК пропорциональность между ионизационными потерями энергии частицы и амплитудой сигнала.

- Предложена и разработана первая двухмерная коронная камера /25/. Показано, что с ее помощью можно получать двухмерные изображения объектов.

Практическая ценность работы заключается в использовании разработанных нами газовых координатных детекторов и методов их применения в экспериментах по физике высоких энергий и в исследованиях в смежных областях, а также в возможности их широкого применения в новых исследованиях.

- Проведенный автором анализ новых достижений в области теории переноса электронов в газах /1,3/ позволяет более оптимально использовать общие закономерности при конструировании и применении новых газовых детекторов.

- Разработанная времяпроекционная камера является универсальным координатным детектором, позволяющим также проводить идентификацию частиц. Поэтому имеется целый ряд предложений по ее использованию в экспериментах в пучках адронов и нейтрино, в релятивистской ядерной физике, в физике тяжелых ионов.

- Разработанная электроника съема информации с больших дрейфовых камер, содержащая многоступенчатый ВПП и быстродействующий параллельный АЦП, внедрена в экспериментах в ОИЯИ, внедряет ее в Университете в Братиславе (ЧССР), ИЭФ САН, Кошице (ЧССР), интересуются ею в ФИАН СССР, МГУ, ИЯИ АН УССР и т.д.

- Проведенные нами исследования по измерению первичной ионизации методом счета кластеров являются существенным шагом на пути к созданию больших идентификаторов релятивистских заряженных частиц, работающих на основе этого метода. Работы над созданием таких идентификаторов продолжают в ОИЯИ, ИФВЭ, ЦЕРНе, Брукхейвене и других лабораториях.

- Безэлектродные дрейфовые камеры с чувствительной площадью  $1 \times 1 \text{ м}^2$  применялись в составе установки "Гиперон" на У-70 при регистрации высокоэнергетических электромагнитных ливней /16/. С их помощью пространственное разрешение электромагнитного калориметра улучшено в 3-4 раза, разрешение близких ливней - в 4-5 раз. БДК является перспективным "экономным" координатным детектором в качестве составных частей крупных калориметров, детекторов мюонов в экспериментах по физике высоких энергий, а также при создании крупных установок по исследованию космического излучения - такой проект обсуждался в ФГТ.

- БДК оказываются очень перспективными для создания координатных детекторов нетрадиционной формы (цилиндрических, сферических и т.д.) для биологических, медицинских и других исследований.

- Разработанная нами двухмерная пропорциональная камера со съемом информации с помощью линий задержки является одним из первых в мире детекторов этого типа /17/. В дальнейшем именно такие детекторы получили широкое распространение в биомедицинских исследованиях.

- Предложенный и разработанный новый метод нейтронной радиографии на основе дрейфовой проекционной камеры /19-21/ предоставляет уникальные возможности для прецизионной нейтронографии: рекордное пространственное разрешение, работа на линии с ЭВМ, эффективная работа при сильной радиационной нагрузке. Эти свойства необходимы в различных задачах, особенно при инспекции облученных ТВЭЛов, применяемых в АЭС.

- Предложенный и созданный новый газовый координатный детектор - коронная камера находит применение в нейтронной физике /23/, а также при измерении экстремально низких концентраций альфа-активных изотопов в гидрогеологических, геофизических и экологических исследованиях /23,26/.

#### Автор защищает:

Решение вопросов регистрации заряженных частиц в дрейфовых и пропорциональных камерах с целью оптимизации их работы, достижения предельных параметров, разработки новых типов газовых координатных детекторов и методов их применения в физическом эксперименте, а именно:

1. Разработку крупного координатного детектора - времяпроекционной камеры и системы сбора информации с нее, позволяющего проводить трехмерную реконструкцию треков в многочастичных событиях, а также идентификацию частиц по многократному измерению ионизационных потерь энергии.

2. Разработку устройства на основе камеры с продольным дрейфом электронов для счета кластеров первичной ионизации в условиях работы большого идентификатора на пучке частиц.

3. Разработку и внедрение в практику физического эксперимента нового типа "экономного" координатного детектора - безэлектродной дрейфовой камеры.

4. Метод точного определения координаты оси высокоэнергетического электромагнитного ливня, основанный на применении конвертора и широкоазимутной дрейфовой камеры, и использование этого метода в эксперименте по физике высоких энергий.

5. Методы и детектирующие устройства для биомедицинских исследований: двумерную пропорциональную камеру, способную работать в интенсивных потоках фотонов, и детектор остановки заряженных частиц для ионной радиографии.

6. Метод и детектирующее устройство для нейтронной радиографии на основе дрейфовой проекционной камеры, обеспечивающий рекордное среди бесфильмовых методов нейтронографии пространственное разрешение.

7. Предложение и практическую реализацию нового газового координатного детектора сильноионизирующих частиц – многопроволочной коронной камеры.

Экспериментальные работы проводились в Университете в Братиславе (ЧССР) в 1974–1977 гг., в Университете в Дархеме (Англия) в 1975 г. и в ОИЯИ в 1977–1988 гг.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях по физике высоких энергий в Лейпциге (1984), Беркли (1986), Мюнхене (1988), на международных конференциях в Дубне (1978, 1987), Высоких Татрах (1975), Братиславе (1985), на научных семинарах в ЛЯП, ЛВЭ и ЛЯР ОИЯИ, на сессиях Ученого совета ОИЯИ, на научных семинарах в ДЭЗИ (ФРГ), в университетах в Зигене (ФРГ), Дархеме (Англия), Братиславе (ЧССР).

Публикации. Результаты работы опубликованы в монографии /1/, обзорных статьях /2,3/, авторских свидетельствах /15,19/ и публикациях в научных журналах и препринтах /4–26/.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, содержит 295 страниц, включая 143 рисунка, 19 таблиц и список литературы из 181 наименования.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проводится систематический анализ процессов, происходящих в газе координатного детектора при регистрации ионизирующего излучения, который стал основой части монографии /1/ и обзорных статей /2,3/. На основе новых экспериментальных данных и теоретических подходов предлагаются способы улучшения параметров детекторов, описываются новые методы их применения. Приведенные теоретические подходы являются основой для интерпретации экспериментальных результатов, полученных в работе.

Вторая глава посвящена методике новых дрейфовых детекторов для физики высоких энергий – описываются разработанная времяпроекционная камера, электроника съема информации, а также метод счета кластеров первичной ионизации в камере с продольным дрейфом электронов.

Разработан крупный газовый координатный детектор – времяпроекционная камера /4/, позволяющий проводить трехмерную реконструкцию многих треков в большом чувствительном объеме – 450 литров, а также идентифицировать частицы на основе многократного измерения (в 80-ти слоях) ионизационных потерь энергии. Схема ВПК приведена на рис.1.

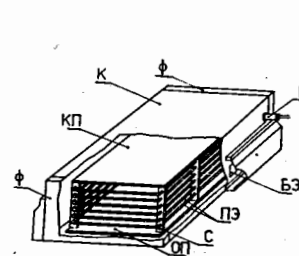


Рис.1. Схема ВПК: К – контейнер, Ф – крышки, Р – высоковольтный разъем, ОП – плата, ПЭ – полеформирующие электроды, С – стойки, КП – катод, БЭ – электроника.

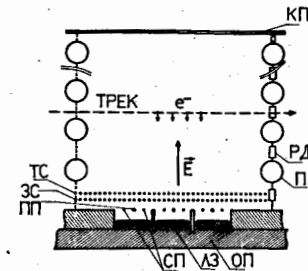


Рис.2. Разрез модуля ВПК: ЛЗ – линия задержки, СП – сигнальные проволочки, ПП, ЗС – полеформирующие (заземленные) проволочки, ТС – триггерная сетка, РД – делитель.

ВПК относится к новому поколению газовых координатных детекторов, которые применяются в крупных установках на современных коллайдерах, а также в экспериментах на выведенных пучках. Прибор полностью подготовлен к пуску.

На рис.2 показан разрез модуля ВПК. Электроны с траекторий заряженных частиц дрейфуют в однородном электрическом поле, в объеме, ограниченном высоковольтным (КП) и полеформирующими (ПЭ) электродами, в направлении сигнальных проволочек (СП). Вертикальная координата точек на траектории определяется по времени дрейфа электронов, координата вдоль траектории – по номеру сработавшей проволочки и координата вдоль сигнальных проволочек – с помощью линий задержки (ЛЗ). В испытаниях модуля ВПК на пучке частиц достигнуты расчетные параметры – высокая эффективность восстановления треков частиц, пространственное разрешение 0,2–0,5 мм по дрейфу электронов (рис.3) и 1–1,5 мм по линиям задержки /4/.

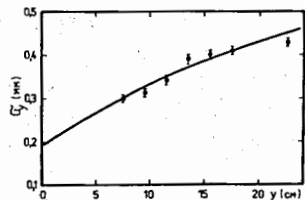


Рис.3. Пространственное разрешение  $\sigma_y$  как функция длины дрейфа электронов  $y$ .

Разработана электронная аппаратура нового типа для съема информации с ВПК и широкоазорных дрейфовых камер (рис.4), способная зарегистрировать большое количество сигналов (до 256) в каждом событии. Аппаратура отличается малым мертвым временем – 64 нс и большим интервалом регистрации сигналов – 16 мкс. Основными частями аппаратуры являются многостоповый время-цифровой преобразователь (М-ВЦП) с временным разрешением 1 нс<sup>15/</sup> и быстродействующий параллельный амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП) с периодом квантования сигналов 64 нс<sup>16/</sup>.

Описывается камера с продольным дрейфом электронов для счета кластеров первичной ионизации<sup>17,8/</sup>. Кластером называется сгусток электронов, возникший на траектории частицы в одном акте ионизации атомов газа. Большинство кластеров (~80%) – одиночные электроны, регистрация которых накладывает высокие требования на электронику съема информации.

Разрез камеры для счета кластеров показан на рис.5. Электроны (кластеры) медленно дрейфуют вдоль траектории частицы к плоскости сигнальных проводочек (в центре камеры), на которых возникает серия сигналов, которые можно сосчитать быстрым счетчиком. Новый метод идентификации релятивистских заряженных частиц на основе счета кластеров был предложен Валентой. Созданная им камера служила лишь для иллюстрации принципиальной возможности счета кластеров, однако эта камера не подхо-

Рис.5. Разрез камеры для счета кластеров.

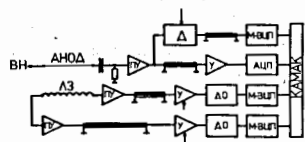


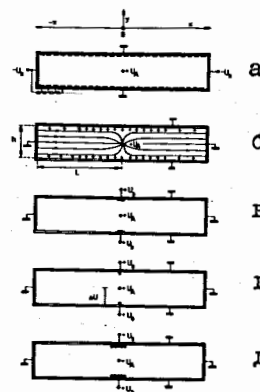
Рис.4. Блок-схема канала электроники: ЛЗ – линия задержки, ПУ – предусилитель, Д – дискриминатор, У – регулируемый усилитель, ДО – детектор нулевого уровня, М-ВЦП – многостоповый ВЦП, АЦП – быстродействующий параллельный АЦП.

дит как основа для большого идентификатора частиц. Наши работы явились развитием методики счета кластеров с целью создания крупномасштабного идентификатора частиц. Исследования на пучке частиц показали, что эффективность счета кластеров в разработанной нами камере (соответствующей по конструкции большому идентификатору) не уступает лучшим мировым достижениям. При испытаниях получены также новые данные о процессах диффузионного распада кластеров в процессе их дрейфа.

В третьей главе описывается новый тип "экономного" координатного детектора – безэлектродная дрейфовая камера.

В крупных установках на современных ускорителях применяются в большом количестве крупногабаритные координатные детекторы. Решающим фактором при проектировании установки помимо высокого координатного разрешения становится стоимость единицы площади детектора, включая электронику. Поэтому экспериментаторы стараются применять "экономные" детекторы, например широкоазорные дрейфовые камеры, СГС-трубки и т.д. Автор с коллективом решил эту проблему при помощи безэлектродных широкоазорных дрейфовых камер (ЩДК), в которых имеются только анод и катод, а отсутствуют полеформирующие электроды<sup>10/</sup>. Однородное электрическое поле в них формируется оседанием положительного заряда на диэлектрических стенках камеры. Безэлектродные ЩДК отличаются небольшим количеством информационных каналов и простой, легкой конструкцией без массивных рам, из чего вытекает невысокая стоимость камер.

Рис.6. Схема электродной (а) и безэлектродных (б,в) дрейфовых камер; г,д – модуль безэлектродной дрейфовой камеры с размерами  $1 \times 1 \text{ м}^2$ .  $U_A$  – анодное напряжение,  $U_D$  – напряжение на стабилизирующих электродах.



До наших работ существовали только прототипы безэлектродных камер, работающих на космических лучах и малоинтенсивных источниках излучения с невысокой координатной точностью ( $\geq 1 \text{ мм}$ ). Нами был разработан ряд безэлектродных ДК различных модификаций (рис.6). В результате серии исследований на пучке частиц<sup>19-12/</sup> были выработаны новые подходы к конструкции и эксплуатации безэлектродных ЩДК, вследствие чего были достигнуты свойства безэлектродных ЩДК, ни в чем не уступающие свойствам "электродных" ЩДК: разрешение 0,2-0,4 мм при длине

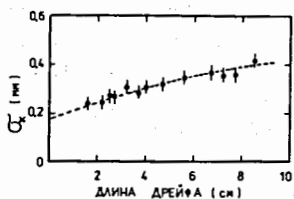


Рис.7. Зависимость пространственного разрешения  $\sigma_x$  от длины дрейфа в ПДК; линия соответствует зависимости  $\sigma_x = \sqrt{a^2 x + b^2}$ , где  $a = 124 \text{ мкм} \cdot \text{см}^{-1/2}$  и  $b = 170 \text{ мкм}$ .

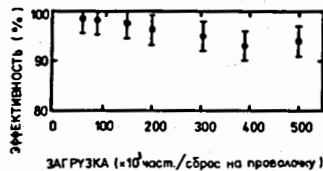


Рис.8. Зависимость эффективности работы камеры "д" от загрузки.

дрейфа электронов до 100 мм (рис.7), высокая линейность отношения "время дрейфа - координата" и эффективная работа в потоках до  $5 \cdot 10^5$  частиц/с на проволочку (рис.8). Таким обра-

зом, был получен новый "экономный" координатный детектор.

Создана система больших безэлектродных ПДК с чувствительной площадью  $1 \times 1 \text{ м}^2$  (рис.9), которая включена в состав действующего оборудования на установке "Гиперон"/II, I2/.

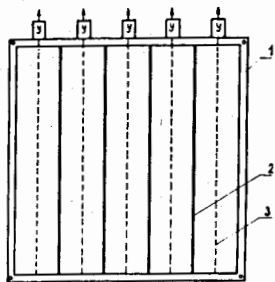


Рис.9. Схема безэлектродной дрейфовой камеры с площадью  $1 \times 1 \text{ м}^2$ . 1 - рама, 2 - перегородка, 3 - сигнальная проволока.

Четвертая глава посвящена применению ПДК при регистрации высокоэнергетических электромагнитных ливней.

В экспериментах при высоких энергиях (100-1000 ГэВ) незаменимую роль играет калориметрия. Как известно, энергетическое разрешение калориметров с ростом энергии  $E$  улучшается как  $1/\sqrt{E}$ . Наряду с этим необходимо улучшать их координатное разрешение и разрешение близлежащих ливней, потому что при высоких энергиях множественность заряженных частиц и фотонов растет, а углы их разлета уменьшаются.

Пространственное разрешение улучшается с применением тонкой структуры калориметров - с большим количеством измерительных элементов на единице площади. Такой подход, однако, приводит к большому числу каналов электроники и, соответственно, значительной стоимости прибора.

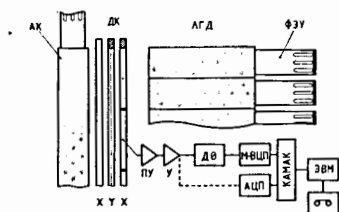


Рис.10. Разрез части калориметра и электроника съема информации с ДК. ПУ - предусилитель, У - усилитель, ДВ - детектор нулевого уровня.

Другой, более экономичный способ заключается в применении активного конвертора (АК) и координатного детектора, весьма точно измеряющего координату ствола ливня. В настоящей диссертации предлагается использовать в качестве координатного детектора дрейфовые камеры (ДК) /13,15/. Была проведена серия исследований системы: активный конвертор + дрейфовая камера + ливневый годоскопический детектор (АК+ДК+ЛГД) (рис.10), на испытательной установке /13,14/. Измерения показали, что такая система обеспечивает рекордное пространственное разрешение  $\sigma = 2 \text{ мм}$  при энергии позитрона 3 ГэВ (рис.11).

Проведенные нами измерения поперечного распределения плотности ионизации в электромагнитном ливне показали, что система АК+ДК его весьма четко воспроизводит и измеренные распределения совпадают с расчетными /14,16/. Было установлено, что поперечное распределение плотности ионизации имеет двухэкспоненциальный характер и на большой глубине ( $\geq 4 \text{ р.д.}$ ) наблюдается его эволюция в одноэкспоненциальный.

Устройство, предложенное автором с коллегами, содержащее АК, ДК, формирователь и времязифровой преобразователь, которое способно быстро (в течение нескольких микросекунд) измерить координату ствола ливня, признано изобретением /15/.

На основе опыта, приобретенного в тестовых испытаниях, созданы 4 дрейфовые камеры с размером чувствительной площади  $1 \times 1 \text{ м}^2$  /16/ и применены в составе большого электромагнитного калориметра с апертурой  $2 \text{ м}^2$  на пучке частиц (рис.12). Испытания этого калориметра в ус-

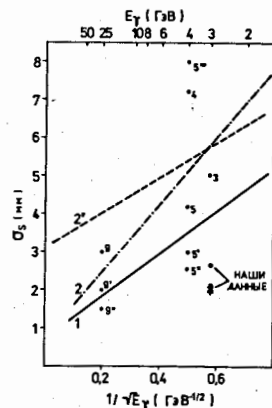


Рис.11. Пространственные разрешения электромагнитных калориметров с конвертором и координатным детектором в зависимости от энергии  $E_\gamma$ .

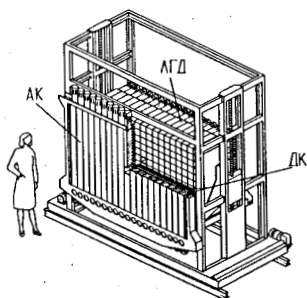


Рис.12. Электромагнитный калориметр установки "Гиперон".

ловиях физического эксперимента (рис.13) показали, что дополнение ЛГД системой АК+ДК позволило улучшить пространственное разрешение примерно в 4 раза ( $\sigma = 3$  мм при  $E = 1-5$  ГэВ) (рис.14) и разрешение близлежащих ливней в 4-5 раз по сравнению с разрешением ЛГД.

Наши исследования указывают на большие перспективы применения широкоазорных ДК для регистрации высокоэнергетических ливней. По нагрузочной способности они не уступают широко применяемым стримерным (СГС) трубкам, причем превосходят их по координатной точности. С учетом небольшого количества сигнальных проволочек (в наших камерах 5 проволочек/1 м<sup>2</sup>) ДК экономнее СГС-трубок. ДК можно применять в крупных установках по физике высоких энергий в составе электромагнитных и адронных калориметров, детекторов мюонов и т.п.

В пятой главе описываются новые разработки, проведенные автором в рамках процесса трансформации методики эксперимента по физике высоких энергий в другие области науки. Разработан ряд новых или модифицированных устройств: двухмерная пропорциональная камера для биомедицинских экспериментов, детектор пробега частиц для ионной радиологии, дрейфовая проекционная камера для нейтронной радиологии.

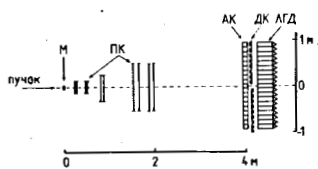


Рис.13. Схема установки. М - мишень.

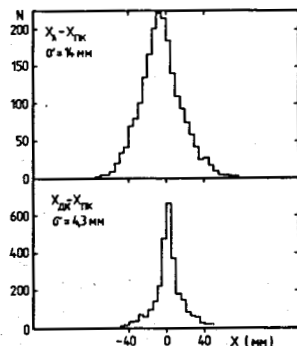


Рис.14. Распределение значений  $X_{Л} - X_{ПК}$  и  $X_{ДК} - X_{ПК}$ , где  $X_{ПК}$  - координата влета  $e^+$  в ЛГД, определенная с помощью ПК;  $X_{Л}$  - определенная в ЛГД и  $X_{ДК}$  - измеренная в ДК.

Описывается двухмерная пропорциональная камера для биологических и медицинских исследований на источнике синхротронного излучения (ИСИ). Исследования на ИСИ открывают совершенно новые направления в биологии и медицине, например т.н. динамические исследования биологических структур или рентгеновская дифракция протеинов.

Новое качество в экспериментах на ИСИ возникает прежде всего из-за большой интенсивности потока фотонов. С другой стороны, это накладывает жесткие требования на применяемые детекторы, которые должны обладать:

- высокой эффективностью регистрации фотонов,
- хорошим пространственным разрешением,
- устойчивостью при работе в интенсивных потоках фотонов,
- возможностью работать на линии с ЭМ,
- высокой линейностью изображения,
- большой чувствительной площадью.

Оказывается, что только многопроволочная пропорциональная камера (ПК) одновременно выполняет приведенные требования и тем самым становится оптимальным двухкоординатным детектором фотонов с энергией 3-10 кэВ.

Созданная двухмерная ПК со съемом информации с катодов с помощью линий задержки /17/ может эффективно работать в интенсивных потоках фотонов  $5 \cdot 10^4$  фот./с·см<sup>2</sup>, что позволяет применять ее в различных биомедицинских исследованиях, в частности на источнике синхротронного излучения.



Рис.15. Схема детектора установки.

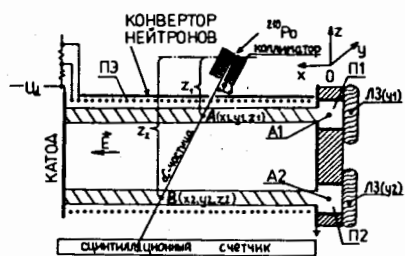
По предложению автора разработан детектор пробега частиц на основе многопроволочных пропорциональных камер. В качестве катодов применяются алюминиевые фольги толщиной 175 мкм, расстояние между ними 12 мм (рис.15). Детектор применялся в экспериментах по радиологии на пучке альфа-частиц с энергией 200 МэВ/нуклон. Детектор обеспечивает рекордное разрешение по плотности измеряемого объекта -  $0,1\% / 18/$ .

В шестой главе рассматривается новый метод нейтронной радиологии на основе дрейфовой проекционной камеры низкого давления, признанный изобретением /19/. Новый метод обеспечивает рекордное среди бесфилмовых методов нейтронной радиологии пространственное разрешение /20/.

Схема дрейфовой проекционной камеры (ДПК) показана на рис.16. Тепловые нейтроны падают на тонкий борный конвертор (обогащенный изотопом <sup>10</sup>B), в котором происходит реакция  $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^7\text{Li}$ .



Рис.16. Схема ДПК, герметичный газовый контейнер не показан. П1, П2 – пропорциональные счетчики; А1, А2 – анодные проволоочки; ЛЗ – линия задержки;  $U_d$  – дрейфовое напряжение; ПЭ – полеформирующие электроды; заштрихованная область – дрейфовый промежуток, с которого собираются электроны на анодах.



Альфа-частицы с энергией 1,47 МэВ вылетают в дрейфовый объем. Давление газа в ДПК подбирается таким, чтобы альфа-частица сумела пролететь дрейфовый объем и зарегистрироваться в сцинтиляционном счетчике на противоположной стороне ДПК. Для этого необходимо работать при пониженном давлении (1–6 кПа).

С помощью полеформирующих электродов (ПЭ на рис.16) в камере создается однородное электрическое поле с напряженностью  $E$ . Электроны, образовавшиеся на треке альфа-частицы, дрейфуют в направлении пропорциональных счетчиков П1 и П2. Трек "проецируется" на плоскость  $(y, z)$ , поэтому прибор был назван дрейфовой проекционной камерой.

Координаты  $x_1, x_2$  точек А, В на треке частицы определяются на основе измерения времени дрейфа электронов до анодных проволоочек  $A_1$  и  $A_2$ . Время пролета частицы фиксируется сигналом со сцинтиляционного счетчика, размещенного внутри газового объема ДПК.

Определение  $y$ -координат точек А и В проводится с помощью линий задержки  $LZ_1$  и  $LZ_2$ , которые являются частью катодов счетчиков П1 и П2.

По координатам точек  $A(x_1, y_1, z_1)$  и  $B(x_2, y_2, z_2)$  реконструируется трек альфа-частицы, точка пересечения которого с плоскостью конвертора считается точкой конверсии нейтрона  $P(X, Y)$ . Координаты  $X, Y$  в плоскости конвертора определяются выражениями

$$X = \frac{x_1 z_2 - x_2 z_1}{z_2 - z_1}, \quad Y = \frac{y_1 z_2 - y_2 z_1}{z_2 - z_1}.$$

Дрейфовая проекционная камера позволяет обеспечить измерение координат  $x, y$  с пространственным разрешением  $\sigma = 100-200$  мкм, в итоге координаты точки конверсии нейтрона  $X, Y$  определяются с точностью 200–300 мкм<sup>[21]</sup>. Разработанная ДПК также может работать в условиях сильной радиационной загрузки.

Основные преимущества нового метода нейтронной радиографии – высокое пространственное разрешение, работа на линии с ЭВМ и возможность применения в сильном гамма-фоне – важны при решении сложных задач, таких как контроль ТВЭЛов после определенного срока их работы в реакторе АЭС. ТВЭЛы очень дорогостоящие, поэтому продление срока их эксплуатации на основе проверки методом нейтронной радиографии приносит большой экономический эффект.

В седьмой главе описывается новый тип газового координатного детектора – многопроволочная коронная камера<sup>[22]</sup>. Коронные камеры (КК) являются аналогом пропорциональных камер (ПК).

Коронные камеры выполняют роль координатного детектора так же, как и ПК, но отличаются от них тем, что регистрируют только сильноионизирующие частицы и могут работать в радиационной обстановке, намного превышающей обстановку, допустимую для ПК. Кроме того, КК сохраняют все преимущества коронных счетчиков: большие сигналы на выходе, длинное плато счетной характеристики, термостойкость. Исследовалось несколько разновидностей КК в целях установления их предельных параметров, определяющих пространственное разрешение: шаг намотки сигнальных проволоочек, их диаметр, расстояние анод-катод<sup>[22]</sup>. Многопроволочные коронные камеры представляют собой новый тип координатного детектора, предназначенного для работы в тяжелых радиационных условиях, например вблизи реакторов или других ядерных установок.

Разработан целый ряд коронных камер<sup>[23-25]</sup>, которые применялись на пучке нейтронов<sup>[23]</sup>, а также при измерении сверхнизких концентраций альфа-активных изотопов в природных образцах<sup>[23,26]</sup>. Схема

одной из камер приведена на рис.17. Наши работы признаны основополагающими в развитии методики коронных камер (см. ссылку #4).

Впервые проводились исследования размеров дополнительной лавины от сильноионизирующей частицы вдоль сигнальной проволоочки коронной камеры. Экспериментально обнаружено, что эта лавина сильно ограничена так же, как и в пропорциональной камере (рис.18). На основе обнару-

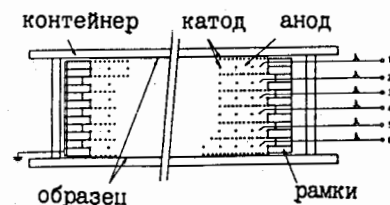


Рис.17. Схема многослойной коронной камеры.

женного локального характера лавины удается объяснить механизм дополнительной лавины от сильноионизирующей частицы в КК, а также пропорциональность сигнала и ионизационных потерь энергии частицы<sup>[25]</sup>. Эти исследования привели автора к созданию двухмерной коронной

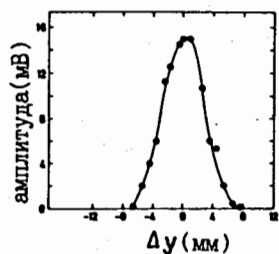


Рис.18. Распределение заряда на катоде КК при облучении коллимированным ( $\varnothing$  100 мкм) пучком альфа-частиц.

камеры, пространственное разрешение которой не должно уступать разрешению ПК, где вдоль сигнальной проволочки достигается разрешение 20–30 мкм. Автором была разработана и успешно исследована первая двумерная коронная камера <sup>125</sup>. Такие камеры могут быть применены в координатных измерениях в условиях большой радиационной загрузки, например при нейтронной радиографии сильно облученных образцов.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. Проведен систематический анализ физических процессов, проходящих в газе пропорциональных и дрейфовых камер. Главные результаты этого анализа обобщены и сформулированы в книге "Ионизационные измерения в физике высоких энергий" <sup>1/</sup> и обзорных статьях <sup>2,3/</sup>, опубликованных при участии автора.

2. Разработана времяпроекционная камера, позволяющая проводить трехмерную реконструкцию треков частиц в большом чувствительном объеме  $35 \times 80 \times 160$  см<sup>3</sup>, причем на каждом треке можно восстановить 80 точек. Для измерения координаты вдоль сигнальных проволочек применяется оригинальный способ на основе линий задержки, позволяющий однозначно определять координаты трека каждой частицы в многотрековых событиях. В испытаниях трехслойного модуля ВПК на пучке частиц достигнуто расчетное разрешение: 0,2–0,5 мм по дрейфу электронов, 1–1,5 мм по линиям задержки. ВПК эффективно работает в магнитном поле 1,5 Тл и при нагрузках до  $5 \cdot 10^5$  частиц/с на проволочку.

3. Разработана и применена в физическом эксперименте электронная аппаратура съема информации с времяпроекционных камер и широкозазорных дрейфовых камер, отличающаяся малым мертвым временем (64 нс) и способностью регистрировать до 256 сигналов в течение 16 мкс. Аппаратура включает в себя многостоповый времяцифровой преобразователь с временным разрешением 1 нс и быстродействующий параллельный АЦП с временем квантования сигнала 64 нс. Разработанная электроника принадлежит к числу лучших мировых образцов, она применяется в экспериментах в ОИЯИ, ее внедряют также в других институтах СССР и за рубежом.

4. Впервые измерена первичная ионизация методом счета кластеров в камере с продольным дрейфом электронов в условиях, соответствующих условиям большого идентификатора релятивистских заряженных частиц. Метод счета кластеров представляет большой интерес при разработке центральных детекторов установок на коллайдерах, радиальные размеры которых сильно ограничены.

Впервые исследована методом счета кластеров трансформация от пуассоновского распределения первичной ионизации в распределение Ландау ионизационных потерь энергии. Полученные данные представляют новые сведения о диффузионном распаде кластеров при их дрейфе в газе.

5. Дрейфовые камеры нового типа – безэлектродные ДК впервые применены на пучке ускорителя. Модификации их конструкции и новый подход к эксплуатации БДК привели к существенному улучшению их параметров, которые не уступают параметрам электродных камер: эффективность  $\approx 100\%$ , загрузочная способность  $5 \cdot 10^5$  частиц/с на проволочку, пространственное разрешение 0,2–0,4 мм при длине дрейфа электронов до 100 мм.

Разработана первая система больших безэлектродных ДК с чувствительной площадью  $1 \times 1$  м<sup>2</sup>, очень легкой прочной конструкции без массивных рам (полный вес камеры  $1 \times 1$  м<sup>2</sup> около 5 кг), которая работает в экспериментах на установке "Гиперон".

6. Предложен и экспериментально обоснован метод улучшения пространственного разрешения ливневого годоскопического детектора (ЛГД), основанный на применении дополнительного активного конвертора (АК) и широкозазорных дрейфовых камер (ЩДК), обеспечивающий рекордное пространственное разрешение 2 мм при энергии позитрона 3 ГэВ. Устройство, содержащее конвертор, ЩДК, формирователь сигналов и многостоповый ВЦП, зарегистрировано как изобретение.

Крупный ЛГД установки "Гиперон" с апертурой 2 м<sup>2</sup> дополнен активным конвертором и системой четырех ЩДК размером  $1 \times 1$  м<sup>2</sup>. В условиях физического эксперимента система АК+ЩДК+ЛГД обеспечивает пространственное разрешение 3 мм при энергии ливней 1–5 ГэВ, что в 3–4 раза лучше разрешения нашего ЛГД. Разрешение близких ливней  $\approx 34$  мм, что в 4–5 раз лучше, чем в нашем ЛГД.

7. Впервые измерено поперечное распределение ионизационных потерь энергии на разных глубинах развития ливня в свинцовом стекле, часто используемом в черенковских детекторах полного поглощения. Экспериментально подтвержден двухэкспоненциальный характер поперечного распределения и его переход в одноэкспоненциальное на больших глубинах развития ливня. Экспериментальные данные совпадают с расчетными. Полученные данные применяются при калибровке крупных ЛГД.

8. Разработана и исследована двухкоординатная пропорциональная камера со съемом информации с катодов с помощью линий задержки для исследований динамических процессов в биологических образцах, обеспечивающая качественное изображение образцов в условиях высокой радиационной загрузки  $5 \cdot 10^4$  фотонов/с.см<sup>2</sup>.

9. Предложен, создан и изучен детектор остановки (ДО) заряженных частиц на основе пропорциональных камер, обеспечивающий рекордное разрешение по плотности исследуемого образца - 0,1%. ДО внедрен в установку по радиографии на пучке альфа-частиц с энергией 200 МэВ на нуклон синхрофазотрона ОИЯИ с целью медицинской диагностики с предельно низкой поглощенной дозой в объекте.

10. Предложен и экспериментально обоснован новый метод нейтронной радиографии, признанный изобретением, основанный на применении дрейфовой проекционной камеры низкого давления, обеспечивающий рекордное - 0,2-0,3 мм пространственное разрешение среди бесфильмовых методов нейтронной радиографии, а также эффективную дискриминацию слабоионизирующих частиц ( $\leq 10^{-6}$ ), что позволяет работать в условиях большой радиационной загрузки.

11. Предложен и разработан новый тип газоразрядного координатного детектора - многопроволочная коронная камера, предназначенная для измерения координат траекторий сильноионизирующих частиц в нейтронной физике, физике тяжелых ионов, физике низких активностей, при поиске редких распадов и т.д.

Разработаны и впервые исследованы характеристики целого ряда коронных камер, в том числе и двухкоординатной со съемом информации с катодов. Наши работы признаны основополагающими в развитии коронных камер.

12. Экспериментально обнаружен локальный характер дополнительной лавины от сильноионизирующей частицы вдоль сигнальной проволочки коронной камеры, что позволяет объяснить наблюдаемую пропорциональность амплитуды сигнала на выходе КК и ионизационных потерь энергии частицы и достигнуть очень хорошего пространственного разрешения ( $\leq 0,1$  мм) вдоль проволочки КК.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Будагов Ю. А., Мерзон Г.И., Ситар Б., Чечин В.А. Ионизационные измерения в физике высоких энергий. - М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Мерзон Г.И., Ситар Б., Будагов Ю.А. Идентификация релятивистских частиц по ионизации в газе. - ЭЧАЯ, 1983, т.14, вып.3, с.648.
3. Ситар Б. Новые направления в развитии дрейфовых камер. - ЭЧАЯ, 1987, т.18, вып.5, с.1080.
4. Будагов Ю.А., Глаголев В.В., Омеляненко А.А., Семенов А.А., Глинка В., Повинец П., Ситар Б., Кладива Э., Семан М., Шпалек Й., Артыков А.М. Испытания модели времяпроекционной камеры со съемом информации с помощью линий задержки. - ОИЯИ, Р13-88-927, Дубна, 1988.
5. Budagov Yu.A., Seman M., Semenov A.A., Sitar B., Špalek J. Multi-hit drift time digitizer with one-nanosecond resolution. - Nucl. Instr. and Meth., 1985, v.A234, p.302.

6. Будагов Ю.А., Зинов В.Г., Семан М., Семенов А.А., Ситар Б., Шпалек Й. Модуль квантования сигналов на основе быстродействующего параллельного аналого-цифрового преобразователя в стандарте КАМАК. - ПТЭ, 1987, № 1, с.59.
7. Будагов Ю.А., Глинка В., Семенов А.А., Сергеев С.В., Ситар Б., Фещенко А.А., Шпалек Й. Измерение первичной ионизации методом счета кластеров. - ПТЭ, 1984, № 1, с.62.
8. Будагов Ю.А., Глинка В., Нагайцев А.П., Омеляненко А.А., Омеляненко М.Н., Семенов А.А., Ситар Б., Шпалек Й. Измерение числа кластеров в камере с продольным дрейфом электронов до 10 см. - ОИЯИ, I3-84-337, Дубна, 1984.
9. Будагов Ю.А., Нагайцев А.П., Омеляненко А.А., Семенов А.А., Чириков-Зорин И.Е., Глинка В., Ситар Б., Шпалек Й., Артыков А.М. Широкоазорная дрейфовая камера с полеформирующими электродами на стеклотекстолите. - ОИЯИ, Р1-84-546, Дубна, 1984.
10. Budagov Yu.A., Nagaitsev A.P., Omelyanenko A.A., Semenov A.A., Sergeev S.V., Hlinka V., Povinec P., Sitar B., Špalek J., Artykov A.M. Electrodeless drift chamber in a flux of more than  $10^5$  particles per second per wire. - Nucl.Instr. and Meth., 1985, v.A238, p.245.
11. Sitar B. Drift chambers. - Proc. 8 Conf. of Czechoslov.Phys., Bratislava, 1985.
12. Budagov Yu.A., Glagolev V.V., Korolev V.M., Omelyanenko A.A., Semenov A.A., Sergeev S.V., Hlinka V., Janik R., Povinec P., Sitar B., Kladiwa E., Seman M., Špalek J., Jordanov A.B., Artykov A.M., Omelyanenko M.N. How to use electrodeless drift chambers in experiments at accelerator. - Nucl.Instr. and Meth., 1987, v.A255, p.493.
13. Budagov Yu.A., Omelyanenko A.A., Semenov A.A., Sergeev S.V., Sitar B., Špalek J., Tsenov R. Measurement of electromagnetic shower position with an electrodeless drift chamber. - Nucl.Instr. and Meth., 1985, v.A238, p.74.
14. Bitsadze G.S., Budagov Yu.A., Glagolev V.V., Korolev V.M., Omelyanenko A.A., Semenov A.A., Sergeev S.V., Hlinka V., Sitar B., Kladiwa E., Špalek J., Blik A.M., Solovev A.S., Jordanov A.B., Tsenov R.V., Minashvili I.A., Artykov A.M. Accuracy of electromagnetic shower position determination by a wide-gap drift chamber. - Nucl.Instr. and Meth., 1986, v.A251, p.61.
15. Будагов Ю.А., Омеляненко М.Н., Омеляненко А.А., Семенов А.А., Ситар Б., Шпалек Й. Устройство для определения координаты вершины ливня от высокоэнергетического гамма-кванта. - А.с. СССР № 1216750. Бюллетень ОИ, № 9, 1986.

16. Бицадзе Г.С., Будагов Ю.А., Глаголев В.В., Ломакин Ю.Ф., Малюков С.Н., Омельяненко А.А., Русакович Н.А., Семенов А.А., Харжеев Ю.Н., Глинка В., Повинец П., Ситар Б., Кладива Э., Семан М., Шпалек Й., Йорданов А.Б., Литов Л.Б., Ценов Р.В., Артыков А.М., Маниев В.М., Минашвили И.А., Салуквадзе Р.Т., Хубуа Д.И., Захарченко А.Н. Координатное разрешение годоскопического электромагнитного калориметра апертурой  $2 \text{ м}^2$  с активным конвертором и дрейфовыми камерами. - ОИЯИ, Р13-88-928, Дубна, 1988.
17. Sitar B., Stubbs R.J., Breare J.M. Two-dimensional readout of a multiwire proportional chamber using a helical delay line. - Nucl. Instr. and Meth., 1976, v.134, p.267.
18. Заневский Ю.В., Пешехонов В.Д., Ситар Б., Тяпкин И.А. Детектор остановки заряженных частиц на основе пропорциональных камер. - ОИЯИ, 13-88-489, Дубна, 1988.
19. Ситар Б., Яник Р. Детектор для нейтронной радиографии. - А.с. ЧССР, № 206289 от 22.06.79 г.
20. Моучка Л., Пешехонов В.Д., Ситар Б., Ситарова Л. Дрейфовая проекционная камера для нейтронной радиографии. - ОИЯИ, 13-11873, Дубна, 1978.
21. Janik R., Moučka L., Peshekhonov V.D., Sitar B. Low-pressure drift chamber with a built in scintillator. - Nucl.Instr. and Meth., 1980, v.178, p.71.
22. Sitar B., Stubbs R.J., Breare J.M. Multiwire corona chambers with small wire spacing. - Nucl.Instr. and Meth., 1976, v.135, p.57.
23. Oravec J., Usačev S., Holý K., Sitar B., Chrapan J. Large multiwire corona counter. - Nucl.Instr. and Meth., 1975, v.129, p.451.
24. Sitar B., Usačev S., Janik R., Chrapan J., Oravec J. Large  $1 \times 0.5 \text{ м}^2$  multiwire corona chamber. - Nucl.Instr. and Meth., 1975, v.129, p.457.
25. Sitar B., Stubbs R.J., Breare J.M. Localisation of the discharge in the corona counter and possibility of building a counter with two-dimensional read-out. - Nucl.Instr. and Meth., 1976, v.133, p.375.
26. Усачев С., Оравец Я., Храпан Я., Ситар Б. Использование коронных счетчиков для детектирования естественных альфа-источников. - Acta F.R.N.U.C. Physica, 1975, v.XVI, p.155.

Рукопись поступила в издательский отдел  
19 июня 1989 года.