

Федеральное агентство по образованию  
Новосибирский государственный университет  
Физический факультет  
Кафедра физики элементарных частиц

**А. Ф. Бузулуцков**

**СОВРЕМЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
МЕТОДИКИ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Учебно-методическое пособие  
по курсу лекций для магистрантов

Новосибирск

2009

УДК 539.1.07

ББК 22.381.5

**Бузулуцков А. Ф.** Современные экспериментальные методики в физике высоких энергий: Учеб.-метод. пособие по курсу лекций для магистрантов / Новосиб. гос. ун-т Новосибирск, 2009. 30 с.

ISBN

*Пособие в краткой форме описывает современные экспериментальные методики, применяемые в физике высоких энергий для регистрации излучений. Рассмотрены физические процессы в детекторах элементарных частиц, их принципы работы, а также ключевые элементы технологии. По основным типам детекторов представлен исчерпывающий список литературы.*

ISBN

©Новосибирский государственный университет, 2009

©А. Ф. Бузулуцков, 2009

## Оглавление

Введение	4
1. Взаимодействие излучения с веществом	4
2. Физические процессы в газовых детекторах	4
3. Трековые детекторы	7
4. Излучение и регистрация световых сигналов	13
5. Идентификация частиц	17
6. Калориметры	19
7. Детекторы для низкофонных и астрофизических экспериментов	22
8. Экспериментальные методики двадцатого столетия	23
Список литературы	24

## **Введение**

Детекторы излучений. Классификация детекторов элементарных частиц.

## **1. Взаимодействие излучения с веществом**

### **1.1. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом**

Ионизационные потери. Формула Бете - Блоха. Пробег тяжелых заряженных частиц. Многократное (кулоновское) рассеяние. Дельта-электроны.

### **1.2. Прохождение электронов через вещество**

Тормозное излучение. Критическая энергия. Пробег электронов.

### **1.3. Взаимодействие фотонов с веществом**

Фотоэффект. Комptonовское рассеяние. Рождение пар. Фотоэлектронная эмиссия из твердых тел. ESCA-спектроскопия.

### **1.4. Флуктуации ионизационных потерь**

### **1.5. Связь между потерей энергии и ионизацией**

Первичная и полная ионизация. Фактор Фано. Характеристики газов.

## **2. Физические процессы в газовых детекторах**

### **2.1. Перенос зарядов в газах**

Диффузия ионов и электронов в отсутствии поля.

Дрейф ионов в электрическом поле. Подвижность ионов. Перезарядка ионов. Диффузия ионов (рис. 1).

Дрейф электронов в электрическом поле. Дрейфовая скорость (рис. 2). Характеристическая энергия. Диффузия электронов (рис. 3). Дрейф в магнитном поле. Эффект электроотрицательных газов.

### **2.2. Регистрация ионизации в газе**

Возбужденные молекулы в сильных электрических полях. Возбуждение молекул электронным ударом. Молекулярные ионы в инертных газах. Эффект Пеннинга. Резонансное излучение. Фотопоглощение и фотоионизация. Рекомбинация ионов и электронов.

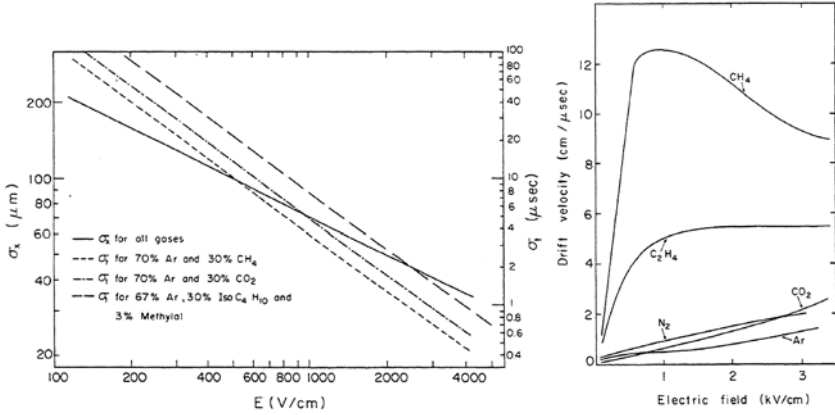


Рис. 1. Пространственная ( $\sigma_x$ ) и временная ( $\sigma_t$ ) диффузия положительных ионов при дрейфе на расстояние 1 см в зависимости от электрического поля в газе при нормальных условиях

Рис. 2. Дрейфовая скорость электронов в различных газах при нормальных условиях

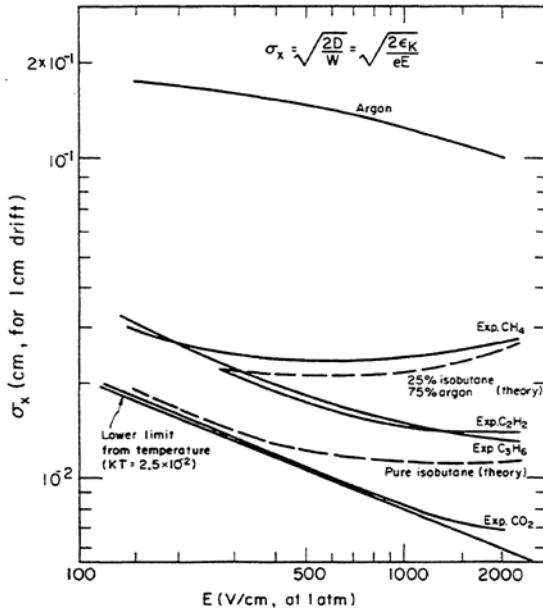


Рис. 3. Диффузия электронов при дрейфе на расстояние 1 см в зависимости от электрического поля в различных газах при нормальных условиях

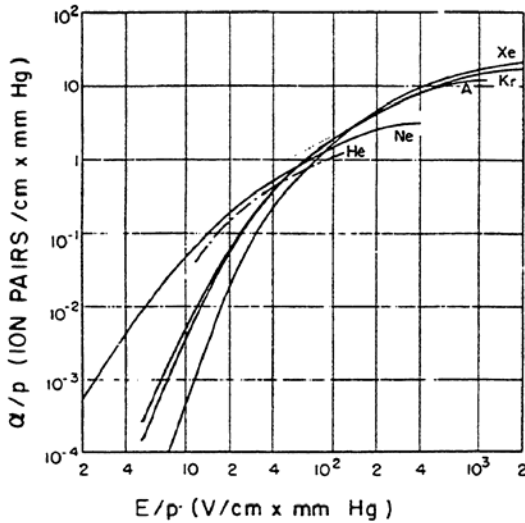


Рис. 4. Коэффициент ионизации (первый коэффициент Таунсенда) в зависимости от электрического поля в благородных газах

Газовое усиление в сильных электрических полях. Ионизация молекул электронным ударом. Коэффициент ионизации (рис. 4). Ассоциативная ионизация.

### 2.3. Пропорциональные счетчики

Режимы работы (рис. 5). Коэффициент усиления. Развитие сигнала во времени.

Флуктуации газового усиления. Эффективность ионизации. Распределение Пойя.

Насыщение лавины. Ограничение пропорциональности. Эффект пространственного положительного заряда.

Вторичная ионизация. Фотонные обратные связи. Ионные обратные связи. Ион-электронная эмиссия.

Гашение разряда.

Эффекты старения в проволочных детекторах.

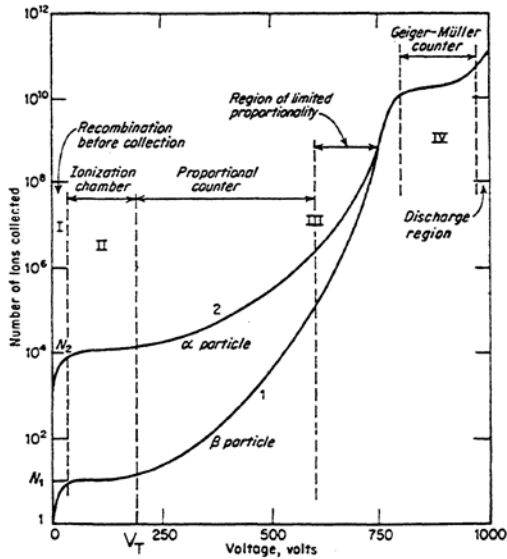


Рис. 5. Усилительные характеристики пропорционального счетчика и его режимы работы

### 3. Трековые детекторы

#### 3.1. Многопроволочные пропорциональные камеры (МПК, MWPC)

Электростатические и механические характеристики. Емкость проволоочки. Конфигурация поля (рис. 6). Влияние механических точностей. Влияние электростатических сил.

Особенности конструкции. Рамки. Линии поддержки и спейсеры.

Считывание сигнала. Дискретные системы. Линии задержки. Метод деления зарядов. Катодный сьем.

Характеристики МПК. Эффективность. Пространственное и временное разрешение. Загрузочная способность.

#### 3.2. Дрейфовые камеры (ДК)

Плоские ДК. Принципы работы и типы дрейфовых ячеек (рис. 7). Предельное пространственное разрешение (рис. 8). Решение лево-право неопределенности. Работа в самогасящемся стримерном (СГС) режиме.

Цилиндрические ДК.

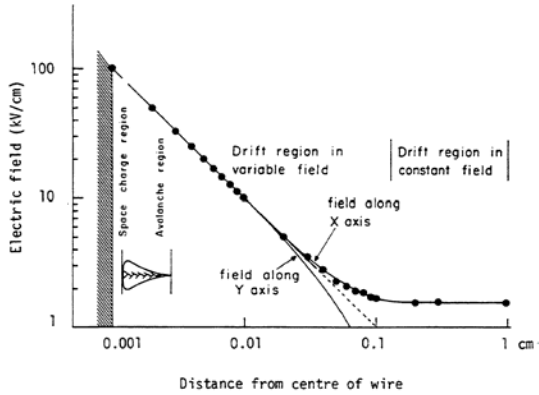


Рис. 6. Электрическое поле в многопроволочной пропорциональной камере в зависимости от расстояния до анодной проволоки вдоль оси перпендикулярной (X) и параллельной (Y) анодной плоскости. Показаны области дрейфа электронов и образования электронной лавины

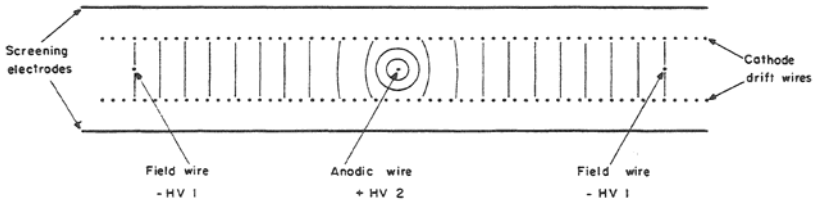


Рис. 7. Дрейфовая камера с распределенным потенциалом

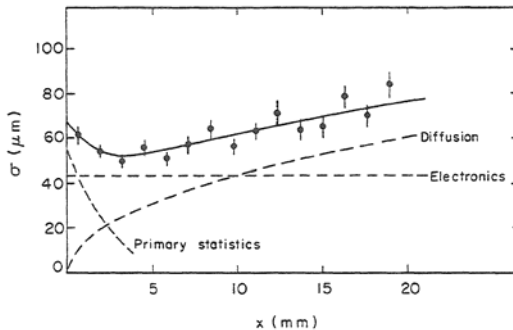


Рис. 8. Пространственное разрешение дрейфовой камеры в зависимости от дрейфового расстояния. Показаны вклады диффузии электронов, статистики рождения пар первичной ионизации и шумов электроники



### 3.3. Время-проекционные камеры (TRC)

Принцип действия (рис. 9). Дрейфовый объем и торцевой детектор. Калибровка TRC. Лазерная калибровка. Физические процессы в TRC. Дрейф электронов в магнитном и электрическом полях. Диффузия электронов в присутствии магнитного поля. Управляемый режим работы. Считывание на пэды. Примеры TRC (рис. 10).

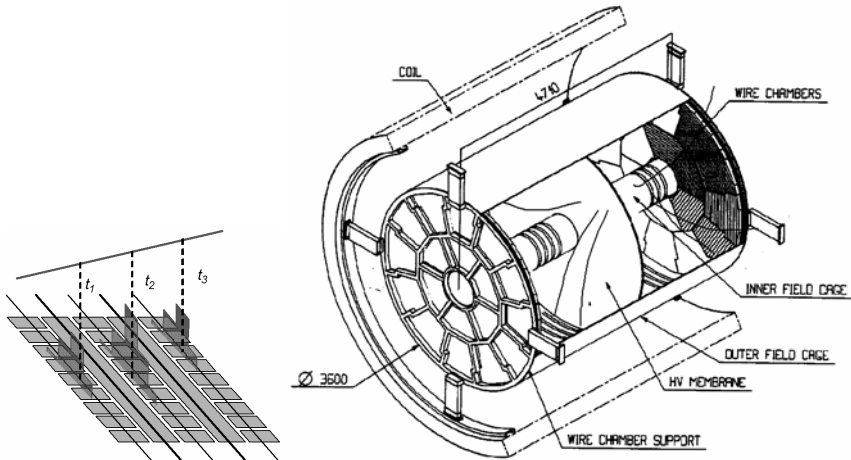


Рис. 9. Принцип действия время-проекционной камеры

Рис. 10. Время-проекционная камера эксперимента ALEPH в ЦЕРН

### 3.4. Микроструктурные газовые детекторы (МСГД, MPGD)

Микростриповые газовые камеры. Конфигурация поля (рис. 11). Усиление и пространственное разрешение. Загрузочная способность и старение. Пробои под воздействием сильноионизирующих частиц. Полупроводящие покрытия и пассивация катодов.

Плоскопараллельная камера с микросеткой (Микромегас, Micromegas) (рис. 12).

Другие типы МСГД: Micro-Gap, Micro-Dot, Micro-Pin, Micro-CAT, Well, Micro-Groove, Micro-Wire.

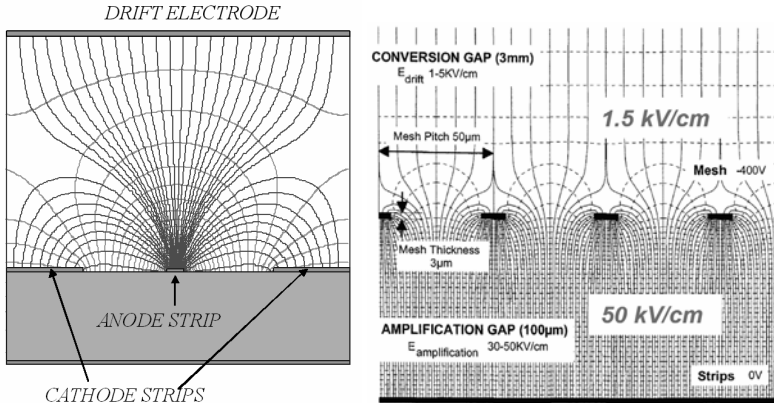


Рис. 11, 12. Конфигурация электрического поля в микростриповой газовой камере и МСГД «Микромегас»

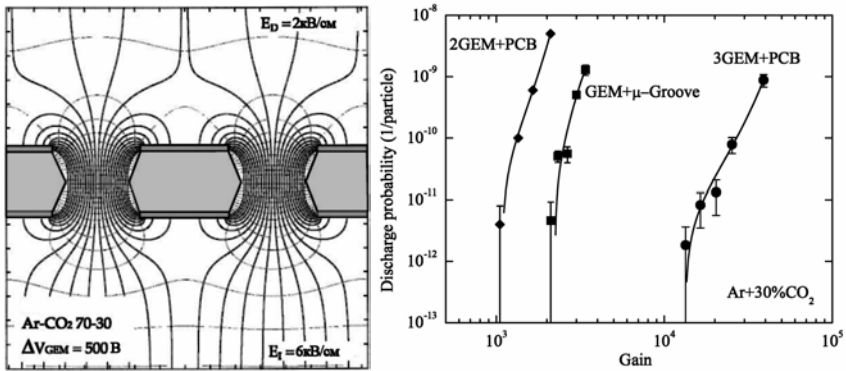


Рис. 13. Конфигурация электрического поля в газовом электронном умножителе

Рис. 14. Вероятность пробоя в зависимости от усиления в трехкаскадном ГЭУ и двухкаскадных структурах при облучении пи-мезонами с 300 МэВ/с

### 3.5. Газовые электронные умножители (ГЭУ, GEM)

Принцип работы и геометрия. Конфигурация поля (рис. 13). Усиление. Эффект диаметра дырок. Каскадные ГЭУ. Физические процессы в ГЭУ. Фотонные обратные связи. Ионные обратные связи. Эффекты развития лавины в дырке. Эффекты зарядки ионами.

Пробои под воздействием сильноионизирующих частиц (рис. 14). Пространственное и временное разрешение. Загрузочная способность и старение.

Работа в чистых благородных газах и при высоких давлениях (рис. 15). Работа при криогенных температурах. Двухфазные лавинные детекторы.

Другие структуры с отверстиями: толстые ГЭУ (THGEM), капиллярные пластины (CP), пластины с микроотверстиями и стрипами (MHSP).

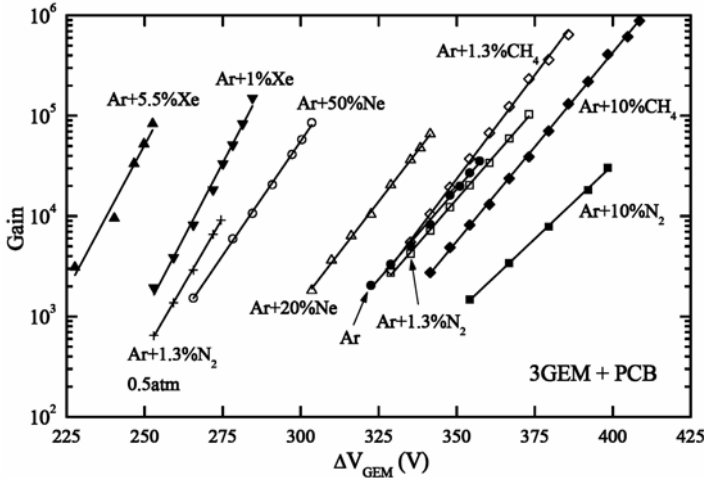


Рис. 15. Усилительные характеристики трехкаскадного газового электронного умножителя в газовых смесях на основе благородных газов

### 3.6. Полупроводниковые детекторы (ППД)

Элементы физики полупроводников. Принципы работы ППД. Кристаллические счетчики.

Детекторы с p-n-переходом. Обедненная область. Поле и емкость p-n-перехода. Технология изготовления.

Поверхностно-барьерные детекторы. Диффузионно-дрейфовые детекторы.

Микростриповые детекторы (рис. 16). Координатное разрешение и шумы. Последние достижения. Двухслойные двухкоординатные детекторы (рис. 17). Детекторы с двойным металлическим слоем.

Детекторы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС, ССД). Кремниевые дрейфовые детекторы.

Эффекты облучения ППД.

Детекторы на основе материалов с большим Z (Ge, GaAs и др.).

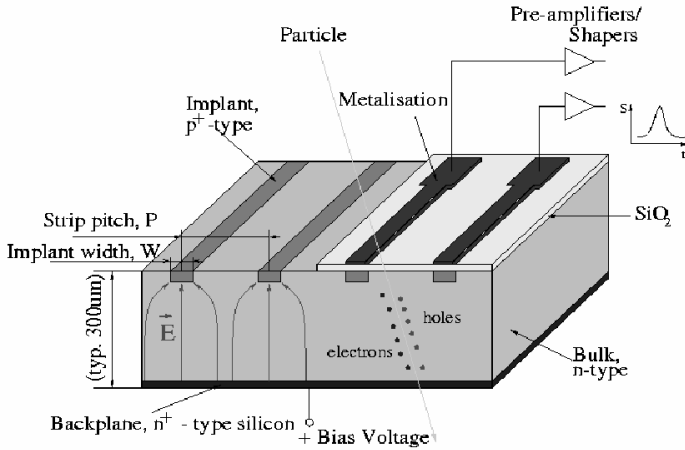


Рис. 16. Структура кремниевого микрострипового детектора

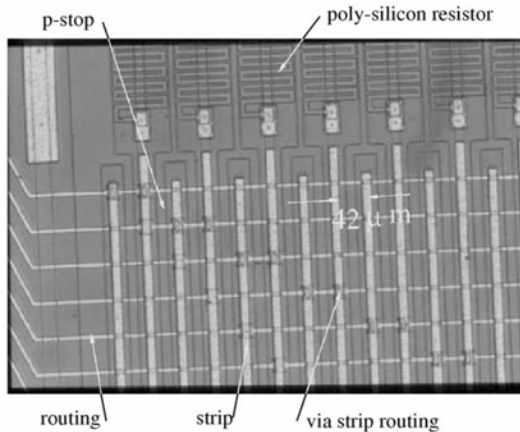


Рис. 17. Фотография двухслойной омической стороны кремниевого двухкоординатного микрострипового детектора эксперимента DELPHI в ЦЕРН. Видны полисиликоновые резисторы, считывающие стрипы, р-стоп стрипы и разводка

## 4. Излучение и регистрация световых сигналов

### 4.1. Вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ, РМТ)

Принцип работы ФЭУ (рис. 18). Фотоэмиссионные материалы (рис. 19). Сурьмяно-щелочные фотокатоды. Фотокатоды с отрицательным сродством к электрону. Фотокатоды для ультрафиолетовой области (рис. 20).

Диодные структуры. Вторичная электронная эмиссия. Технология изготовления.

Энергетическое разрешение. Избыточный шум (Excess Noise Factor). Однофотоэлектронные спектры и темновой ток. Эффект сильного электрического поля.

ФЭУ на микроканальных пластинах (МКП, МСР). Гибридные ФЭУ.

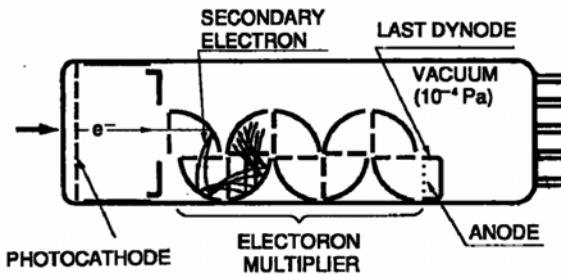


Рис. 18. Принцип работы ФЭУ

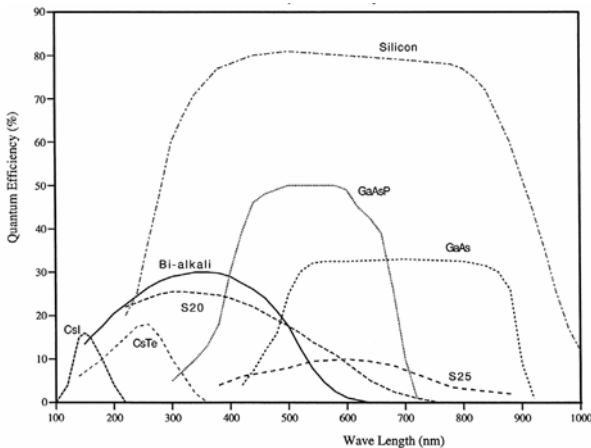


Рис. 19. Квантовый выход различных фотокатодов и кремниевого фотодиода

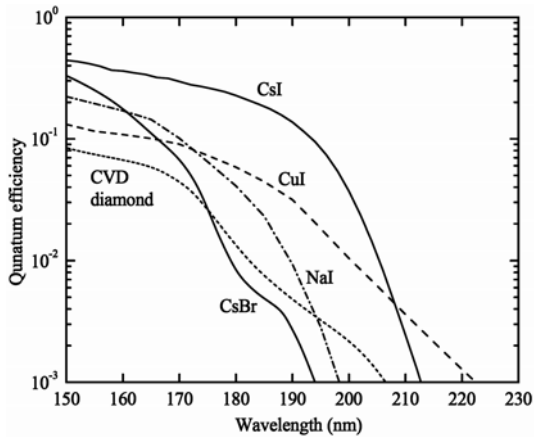


Рис. 20. Квантовый выход различных фотокатодов для ультрафиолетовой области

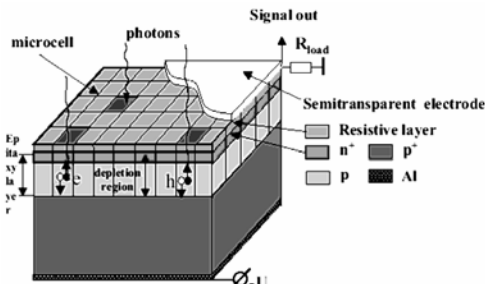


Рис. 21. Структура SiPM

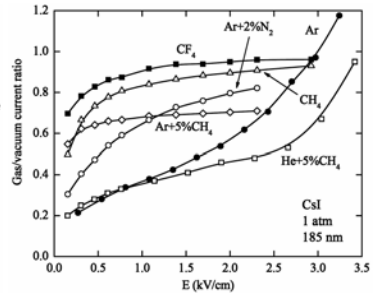


Рис. 22. Эффект обратного рассеяния фотоэлектронов в газовом ФЭУ. Показано отношение фототоков CsI фотокатода в газе и вакууме в различных газах в зависимости от электрического поля

#### 4.2. Полупроводниковые фотодиоды

Фотодиоды. Лавинные фотодиоды. Многопиксельные гейгеровские фотодиоды (SiPM) (рис. 21). Светодиоды.

#### 4.3. Газовые ФЭУ

Фотоэлектронная эмиссия в газ. Обратное рассеяние фотоэлектронов (рис. 22). Газовые ФЭУ на основе ГЭУ, капиллярных пластин и Микроме-га. Композиционные пленочные фотокатоды. Защита фотокатодов.

#### 4.4. Органические сцинтилляторы

Механизм сцинтилляций. Зависимость световыхода от плотности ионизации. Формула Биркса. Однокомпонентные сцинтилляторы (рис. 23). Сместители спектра («шифтеры», WLS) (рис. 23). Многокомпонентные сцинтилляторы (пластики). Жидкие сцинтилляторы.

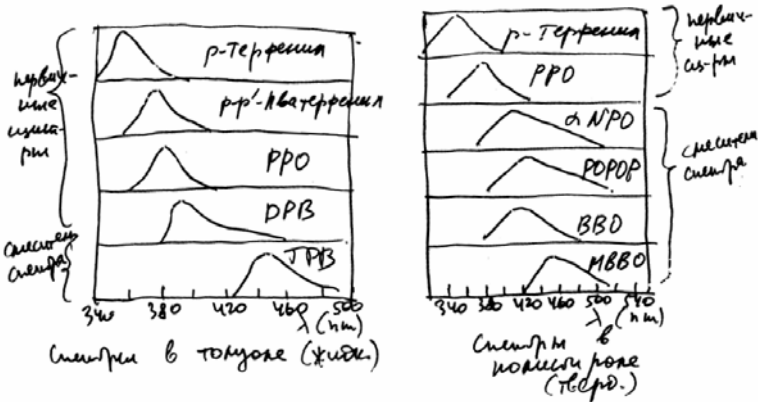


Рис. 23. Спектры излучения органических сцинтилляторов

#### 4.5. Сцинтилляционные счетчики

Оптика сцинтилляторов. Световоды. Оптические волокна. Методы светосбора. Временное разрешение.

#### 4.6. Кристаллические неорганические сцинтилляторы

Механизм сцинтилляций. Щелочно-галогидные сцинтилляторы (табл. 1). Быстрые сцинтилляторы (табл. 1). Кросс-люминисценция. Радиационные повреждения в кристаллических сцинтилляторах.

#### 4.7. Сцинтилляции в неорганических газах и жидкостях

Благородные газы. Механизм сцинтилляций. Спектры излучения и временные свойства (рис. 24). Пропорциональные сцинтилляции в электрическом поле. Сцинтилляции в благородных жидкостях. Другие газы ( $CF_4$ , TEA, TMAE).

Таблица 1

Свойства кристаллических неорганических сцинтилляторов

Crystal	Density g/cm <sup>3</sup>	Refractive index	Radiation Length cm	Moliere Radius cm	$\lambda_{\max}$ nm	Light yield %NaI(Tl)	Decay time ns	dLY/dT %/°C	Melting point °C
NaI(Tl)	3.67	1.85	2.59	4.13	410	100	230	~0	651
CsI(Tl)	4.51	1.79	1.86	3.57	560	165	1250	0.3	621
CsI	4.51	1.95	1.86	3.57	420 310	3.6 1.1	30 6	-0.6	621
BaF <sub>2</sub>	4.89	1.50	2.03	3.10	300 220	36 3.4	630 0.9	-2 ~0	1280
CeF <sub>3</sub>	6.26	1.62	1.70	2.41	300	7.3	30	0.14	
BGO (Bi <sub>3</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub> )	7.13	2.15	1.12	2.23	480	21	300	-1.6	1050
PWO (PbWO <sub>4</sub> )	8.3	2.20	0.89	2.00	425 420	0.29 0.083	30 6	-1.9	1123
LSO (Lu <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce)	7.40	1.82	1.14	2.07	420	84	42	~0	2050
GSO (Gd <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> :Ce)	6.71	1.85	1.38	2.23	440	30	60	-0.1	1950

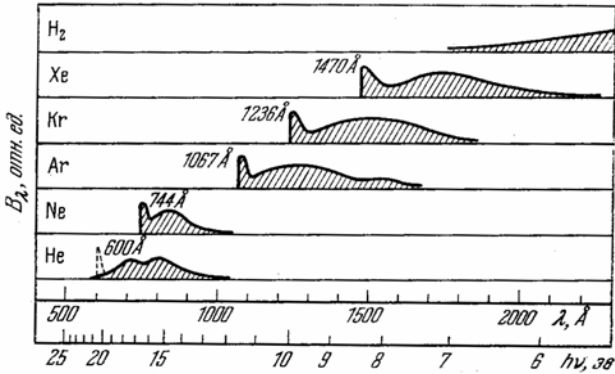


Рис. 24. Спектры излучения благородных газов в газовом разряде



## 5. Идентификация частиц

### 5.1. Черенковские счетчики

Черенковское излучение. Основные свойства. Излучение в различных областях спектра. Первые черенковские счетчики. Радиаторы.

Газовые черенковские счетчики. Зависимость показателя преломления от давления. Дифференциальные счетчики. Пороговые счетчики. Пороговая кривая и разрешение счетчика.

Аэрогельные счетчики (рис. 25).

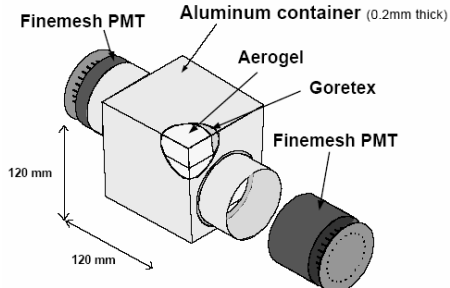


Рис. 25. Аэрогельный счетчик эксперимента BELLE в КЕК

### 5.2. Детекторы колец черенковского излучения (RICH-детекторы)

Оптические схемы. RICH-детекторы с зеркальной (рис. 26) и ближней фокусировкой (рис. 27). DIRC-детекторы (рис. 28).

Зеркала. Зеркальные покрытия и их защита.

Детекторы фотонов. Детекторы фотонов на основе вакуумных фотоприемников. Детекторы фотонов на основе CsI фотокатода. Детекторы фотонов на основе паров ТЕА и ТМАЕ. Многоступенчатые лавинные камеры. ТРС.

### 5.3. Счетчики времени пролета (TOF)

Принцип работы. TOF на основе сцинтилляционных счетчиков. TOF на основе плоских камер с резистивными электродами (RPC).

### 5.4. Детекторы ионизационных потерь

Зависимость разрешения от параметров детектора. Метод счета кластеров ионизации.

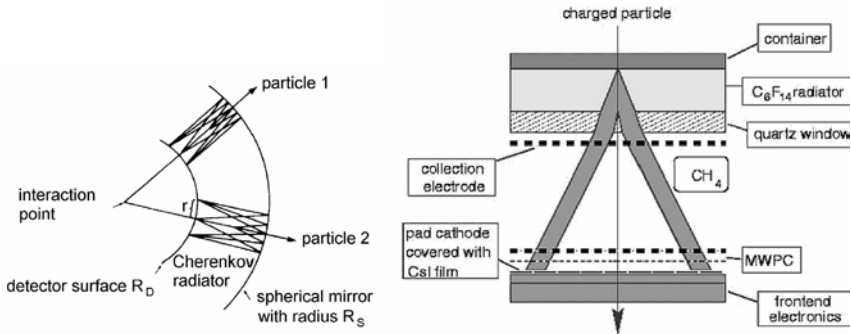


Рис. 26. Принцип действия RICH-детектора с зеркальной фокусировкой

Рис. 27. RICH-детектор с ближней фокусировкой с газовым фотодетектором на основе CsI фотокатода эксперимента ALICE в ЦЕРН

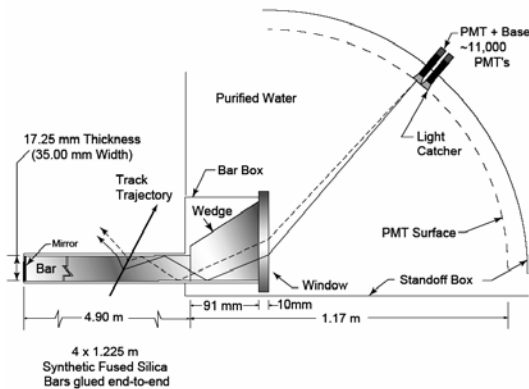


Рис. 28. DIRC-детектор эксперимента BaBar в SLAC

### 5.5. Детекторы переходного излучения (TRD)

Свойства переходного излучения. Методы регистрации в TRD. Сравнение различных методов идентификации частиц.

### 5.6. Мюонные детекторы

### 5.7. Нейтронные детекторы

Реакции конверсии нейтронов (рис. 29). Сцинтилляционные детекторы нейтронов. Газовые детекторы нейтронов на основе  $^3\text{He}$  и  $\text{BF}_3$ .

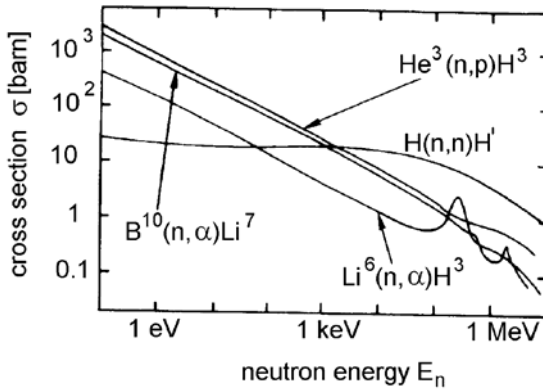


Рис. 29. Сечения различных реакций конверсии нейтронов

## 6. Калориметры

### 6.1. Электромагнитные ливни

Критическая энергия, радиационная длина, полная длина треков. Продольное развитие ливня (рис. 30). Максимум ливня. Поперечное развитие ливня (рис. 31). Мольеровский радиус. Флюктуации ливня. Предельное энергетическое разрешение. Флюктуации ливня в сэмплинг-калориметрах. Утечки ливня.

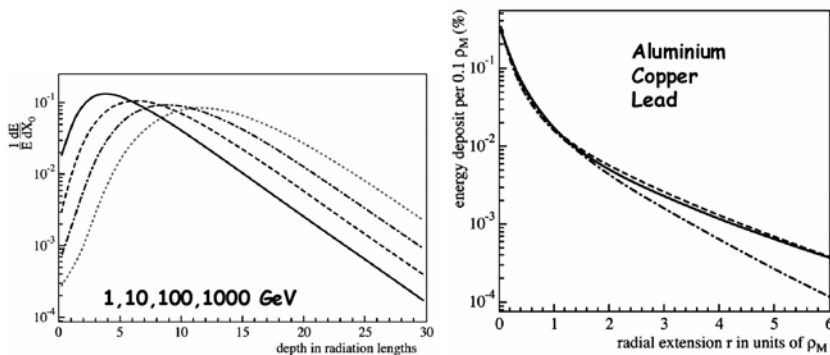
Рис. 30. Продольный профиль электромагнитного ливня при энергии 1, 10, 100 и 1000 ГэВ. На каждый порядок по энергии ливень сдвигается глубже на  $2X_0$ 

Рис. 31. Поперечный профиль электромагнитного ливня в алюминии (сплошная линия), меди (пунктир) и свинце (штрих-пунктир)

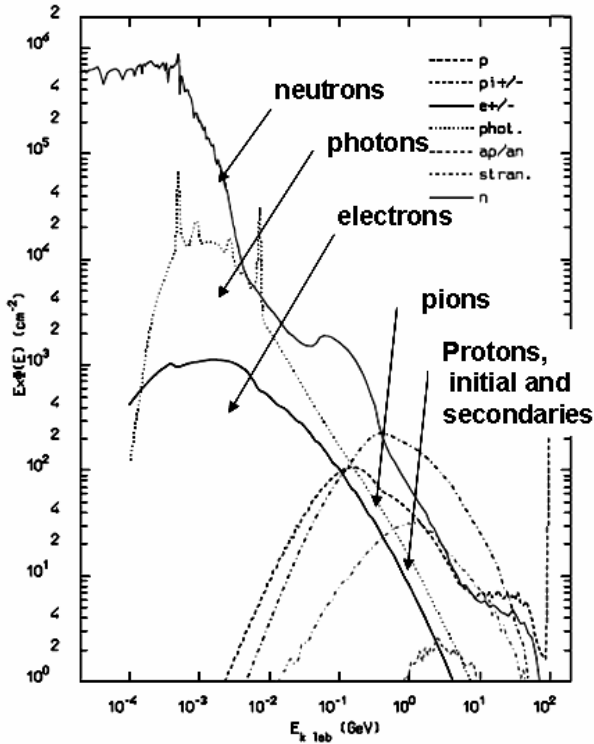


Рис. 32. Состав адронного ливня для протона с энергией 100 ГэВ в свинце

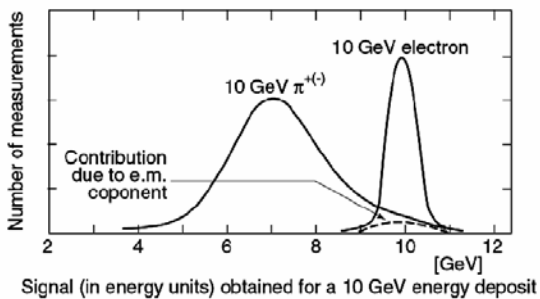


Рис. 33. Отклик некомпенсированного адронного калориметра с  $e/h = 1,4$  на адроны и электроны

## 6.2. Адронные ливни

Особенности адронного ливня (рис. 32). Невидимая энергия. Продольное и поперечное развитие ливня. Флюктуации ливня. Отношение  $e/h$  и энергетическое разрешение (рис. 33). Компенсация калориметров.

## 6.3. Однородные твердотельные калориметры

Черенковские калориметры. Сцинтилляционные кристаллические калориметры. Энергетическое и пространственное разрешение. Примеры калориметров в физике высоких энергий. Pile-up эффект.

## 6.4. Сэмплинг-калориметры

Сцинтилляционные сэмплинг-калориметры. Сэндвич-калориметры (рис. 34). Калориметры на сцинтиллирующих волокнах. Spaghetti, Shashlyk и Tile-калориметры (рис. 35). Газовые сэмплинг-калориметры: на пропорциональных камерах и стримерных трубках; на сжатых газах. Кремниевые сэмплинг-калориметры. Возможности разделения электронов и адронов.

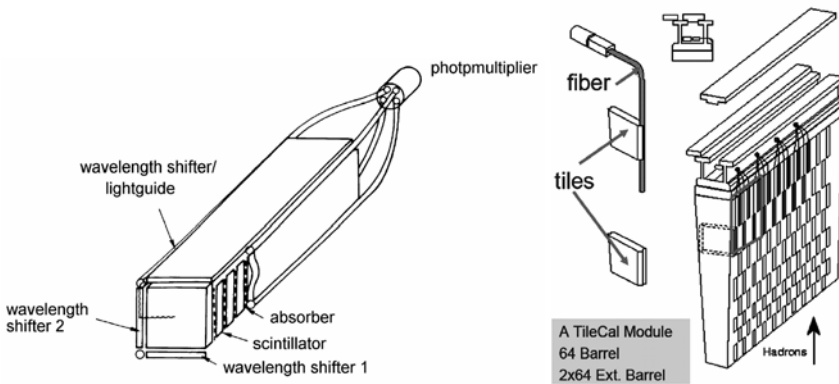


Рис. 34. «Сэндвич»-калориметр

Рис. 35. Tile-калориметр

## 6.5. Жидкостные калориметры

Криогенные жидкостные калориметры. Свойства благородных жидкостей (табл. 2). Калориметры на жидком аргоне. Калориметры на жидком криптоне и ксеноне. Калориметры на теплых органических жидкостях. Сцинтилляционные жидкостные калориметры.

## 6.6. Калибровка калориметров

## Свойства благородных жидкостей

Property ↓ Liquid →	LAr	LKr	LXe
Z	18	36	54
Boiling point [K]	87.3	119.8	165.0
Density in liquid phase [g cm <sup>-3</sup> ]	1.40	2.41	2.95
Radiation length [cm]	14.0	4.7	2.40
Molière radius [cm]	8.0	5.5	4.2
Nuclear interaction length for protons [cm]	84	61	57
Ionization properties			
Energy needed per electron-ion pair [eV]	24	17	15
Drift speed (mm/μs at 10 kV/cm)	5	3.8	2.6
Scintillation properties			
Emission spectrum, λ <sub>peak</sub> [nm]	128	147	174
Decay time [ns]			
Fast component	5.0-6.3	2.0	2.2
Slow component	860-1090	80-91	27-34
Relative light yield in fast/slow component			
Fast component	8% (57%)	1%	5% (31%)
Slow component	92% (43%)	99%	95% (69%)
Refractive index at 170 nm	1.29	1.40	1.60

## 7. Детекторы для низкофоновых и астрофизических экспериментов

### 7.1. Детекторы нейтрино

Детекторы солнечных нейтрино. Детекторы космических нейтрино. Детекторы реакторных нейтрино.

### 7.2. Детекторы темной материи

Сцинтилляционные кристаллические детекторы. Криогенные твердотельные детекторы. Криогенные двухфазные детекторы (рис. 35). ТРС на отрицательных ионах. Пузырьковая камера.

### 7.3. Детекторы космических лучей

### 7.4. Детекторы двойного бета-распада

### 7.5. Детекторы аксионов

### 7.6. Детекторы в медицине и прикладных исследованиях

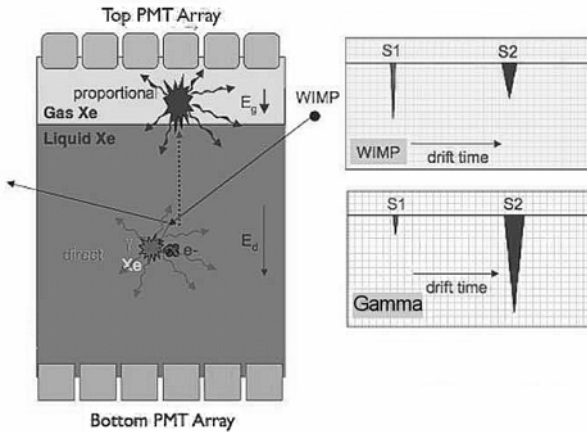


Рис. 35. Принцип действия двухфазного детектора для поиска темной материи

## 8. Экспериментальные методики двадцатого столетия

### 8.1. Искровые и стримерные камеры

Механизм пробоя. Структура и яркость следов частиц. Параметры высоковольтного импульса. Конструкция. Считывание.

### 8.2. Конденсационные камеры: Вильсона и диффузионные

Образование капель в пересыщенном паре. Нейтральные и заряженные капли. Рост капель. Ионные капли в инертных газах. Конструкция камер.

### 8.3. Пузырьковые камеры

Образование пузырьков в перегретой жидкости. Тепловая и ионная теории. Принцип работы и конструкция. Рабочие жидкости.

### 8.4. Ядерные эмульсии

Состав эмульсий. Фотографический процесс. Теория фотографического процесса. Проявление. Характеристики следов частиц.

### 8.5. Мишени

Жидководородные мишени. Внутренние мишени.

## Список литературы

### Все типы детекторов

1. Experimental Techniques in High Energy Physics / Ed. by T. Ferbel. Singapore: World Scientific, 1991.
2. Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli. Singapore: World Scientific, 1993.
3. Меликов Ю. В. Экспериментальная техника в ядерной физике. М.: МГУ, 1973.
4. Клайнкнехт К. Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
5. Групен К. Детекторы элементарных частиц. Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999.
6. Grupen C., Shwartz B. Particle Detectors. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
7. Онучин А. П. Экспериментальные методы ядерной физики. Новосибирск: НГТУ, 2009.
8. Акимов Ю. К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
9. Фюнфер Э., Нейерт Г. Счетчики излучений. М.: Гос. изд-во лит. в области атомной науки и техники, 1961.
10. Review of Particle Physics // The European Physical Journal C. 2000. V. 15.

### Физические процессы в газовых детекторах

1. Sauli F. Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. Preprint CERN 77-09, 1977.
2. Будагов Ю. А., Меерзон Г. И., Ситар Б., Чечин В. А. Ионизационные измерения в физике высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. Sitar B., Merson G. I., Chechin V. A., Budagov Yu. A. Ionization Measurements in High Energy Physics. Berlin: Springer, 1993.
4. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1980.
5. Волков Н. Г., Христофоров В. А., Ушакова Н. П. Методы ядерной спектроскопии. М.: Энергоатомиздат, 1990.

### Пропорциональные и дрейфовые камеры

1. Sauli F. Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers. Preprint CERN 77-09, 1977.
2. Заневский Ю. В. Проволочные детекторы элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1978.



3. *Алексеев Г. Д., Круглов В. В., Хазинс Д. М.* Самогасящийся стримерный режим // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1982. Т. 13. С. 703.

#### **Цилиндрические дрейфовые камеры**

1. *Будагов Ю. А., Меерзон Г. И., Ситар Б., Чечин В. А.* Ионизационные измерения в физике высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988.

#### **Время-проекционные камеры**

1. *Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli.* Singapore: World Scientific, 1993.

#### **Микроструктурные газовые детекторы**

1. *Шафранов М. Д.* Микроструктурные газовые координатные детекторы // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2002. Т. 33. С. 1204.
2. *Shekhtman L.* Micro-Pattern Gaseous Detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. V. 494. P. 128.

#### **Газовые электронные умножители**

1. *Бузулуцков А. Ф.* Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей // Приборы и техника эксперимента. 2007. N 3. С. 5.
2. *Shekhtman L.* Micro-Pattern Gaseous Detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. V. 494. P. 128.

#### **Полупроводниковые детекторы**

1. *Акимов Ю. К.* Полупроводниковые детекторы ядерных излучений. Дубна: ОИЯИ, 2009.
2. *Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli.* Singapore: World Scientific, 1993.
3. *Dijkstra H.* Overview of Silicon Detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. V. 478. P. 37.
4. *Акимов Ю. К.* Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике. М.: Энергоатомиздат, 1989.

#### **Вакуумные ФЭУ**

1. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
2. *Photomultiplier Handbook.* Burle Inc., 1994.

3. Photomultiplier tubes. Principles and applications. Philips Photonics, 1994.
4. *Arisaka K.* New Trends in Vacuum-Based Photon Detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. 2000. V. 442. P. 80.
5. *Берковкий А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н.* Вакуумные фотоэлектронные приборы. М.: Радио и связь, 1988.
6. *Sommer A. H.* Photoemissive materials. N. Y.: Krager, Huntigton, 1980.

### **Полупроводниковые фотодиоды**

1. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
2. *Renker D., Lorenz E.* Advances in solid state photon detectors // Journal of Instrumentation. 2009. V. 4. P04004.

### **Газовые ФЭУ**

1. *Бузулуцков А. Ф.* Газовые фотодетекторы с твердыми фотокатодами // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2008. Т. 39. С. 813.
2. *Chechik R., Breskin A.* Advances in gaseous photomultipliers // Nucl. Instr. and Meth. A. 2008. V. 595. P. 116.
3. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.

### **Органические сцинтилляторы. Сцинтилляционные счетчики**

1. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
2. *Меликов Ю. В.* Экспериментальная техника в ядерной физике. М.: МГУ, 1973.
3. Принципы и методы регистрации элементарных частиц / Под ред. В. Цзянь-Сюан и Л.К. Юан. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
4. *Birks J. B.* The theory and practice of scintillation counters. Oxford: Pergamon, 1964.
5. *Говорков Б. Б., Чукин В. С.* Сцинтилляционные счетчики больших площадей // Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра. 1972. Т. 2. С. 763.
6. Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli. Singapore: World Scientific, 1993.
7. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.

8. Review of Particle Physics // The European Physical Journal C. 2000. V. 15.
9. *Ритсон Д.* Экспериментальные методы в физике высоких энергий. М.: Наука, 1964.

#### **Кристаллические неорганические сцинтилляторы**

1. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.
2. *Цирлин Ю. А., Глобус М. Е.* Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами. М.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli. Singapore: World Scientific, 1993.

#### **Сцинтилляции в благородных газах**

1. *Барабаш А. С., Болоздыня А. И.* Жидкостные ионизационные детекторы. М.: Энергоатомиздат, 1993.
2. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.

#### **Черенковское излучение. Черенковские счетчики**

1. *Зрелов В. П.* Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. М.: Атомиздат, 1968.
2. *Джелли Дж.* Черенковское излучение и его применения. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике / Под ред. А. М. Балдина. М.: Наука, 1990.
4. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
5. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.

#### **RICH детекторы**

1. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике / Под ред. А. М. Балдина. М.: Наука, 1990.
2. Proceedings of the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors // Nucl. Instr. and Meth. A. 1994. V. 343, 1999. V. 443.
3. *Акимов Ю. К.* Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2006.

### **Счетчики времени пролета**

1. *Klempt W.* Review of particle identification by time of flight techniques // Nucl. Instr. and Meth. A. 1999. V. 433. P. 542.
2. *Pestov Yu. N.* Review on counters with localized discharge // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. V. 494. P. 447.

### **Детекторы ионизационных потерь**

1. *Будагов Ю. А., Меерзон Г. И., Ситар Б., Чечин В. А.* Ионизационные измерения в физике высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. *Sitar B., Merson G. I., Chechin V. A., Budagov Yu. A.* Ionization Measurements in High Energy Physics. Berlin: Springer, 1993.
3. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.

### **Детекторы переходного излучения**

1. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
2. *Dolgoshein B.* Complementary particle ID: transition radiation and  $dE/dx$  relativistic rise // Nucl. Instr. and Meth. A. 1999. V. 433. P. 533.

### **Мюонные детекторы**

1. Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli. Singapore: World Scientific, 1993.

### **Нейтронные детекторы**

1. *Меликов Ю. В.* Экспериментальная техника в ядерной физике. М.: МГУ, 1973.
2. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
3. *Фюнфер Э., Нейерт Г.* Счетчики излучений. М.: Гос. изд-во лит. в области атомной науки и техники, 1961.
4. *van Eijk C. V. E.* Neutron PSDs for the next generation of spallation neutron sources // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. V. 477. P. 383.

### **Калориметры**

1. Instrumentation in High Energy Physics / Ed. by F. Sauli. Singapore: World Scientific, 1993.
2. *Клайнкнехт К.* Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир, 1990.
3. *Wigmans R.* Calorimetry. Oxford: Clarendon, 2000.

4. *Shwartz B. A.* Crystal Calorimeters // Nucl. Instr. and Meth. A. 2002. V. 494. P. 288.
5. *Барабаш А. С., Болоздыня А. И.* Жидкостные ионизационные детекторы. М.: Энергоатомиздат, 1993.

#### **Детекторы темной материи и элементарных частиц в астрофизике**

1. *Кландор-Клайнгротхаус Г. В., Цюрбер К.* Астрофизика элементарных частиц. М.: Ред. журнала «Успехи физических наук», 2000.
2. *Акимов Д. Ю.* Экспериментальные методы детектирования корпускулярной Темной Материи // Приборы и техника эксперимента. 2001. N 5 С. 6.

#### **Искровые и стримерные камеры**

1. *Будагов Ю. А., Меерзон Г. И., Ситар Б., Чечин В. А.* Ионизационные измерения в физике высоких энергий. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. *Заневский Ю. В.* Проволочные детекторы элементарных частиц. М.: Атомиздат, 1978.

#### **Камера Вильсона и диффузионная камера**

1. *Гупта Н. Д., Гош С.* Камера Вильсона и ее применение в физике. М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1947.
2. *Вильсон Д.* Камера Вильсона. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
3. Принципы и методы регистрации элементарных частиц / Под ред. В. Цзянь-Сюан и Л.К. Юан. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
4. *Ритсон Д.* Экспериментальные методы в физике высоких энергий. М.: Наука, 1964.

#### **Пузырьковые камеры**

1. *Ритсон Д.* Экспериментальные методы в физике высоких энергий. М.: Наука, 1964.
2. *Александров Ю. А. и др.* Пузырьковые камеры, М.: Госатомиздат, 1963.
3. *Меликов Ю. В.* Экспериментальная техника в ядерной физике. М.: МГУ, 1973.

#### **Ядерные эмульсии**

1. *Ритсон Д.* Экспериментальные методы в физике высоких энергий. М.: Наука, 1964.
2. Принципы и методы регистрации элементарных частиц / Под ред. В. Цзянь-Сюан и Л.К. Юан. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.

**Мишени**

1. *Голованов Л. Б.* Водородные мишени в физике частиц // Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра. 1972. Т. 2. С. 717.
2. *Ритсон Д.* Экспериментальные методы в физике высоких энергий. М.: Наука, 1964.