

Министерство образования и науки Российской Федерации  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**А. П. ОНУЧИН**

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК  
2010

УДК 539.1 (075.8)  
О-596

Рецензенты:

*Ю. А. Тихонов*, д-р физ.-мат. наук, проф.;  
*А. В. Бурдаков*, д-р физ.-мат. наук, проф.

Работа подготовлена на кафедре электрофизических установок и ускорителей

**Онучин А. П.**  
О-596 Экспериментальные методы ядерной физики : учеб. пособие /  
А. П. Онучин. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. — 220 с. (Серия  
«Учебники НГТУ»).

ISBN 978-5-7782-1232-9

Учебник написан на основе курса лекций, который автор читает в течение многих лет магистрантам физико-технического факультета НГТУ. Книга состоит из трех частей, посвященных теории прохождения частиц через вещество, приборам для регистрации частиц и методам обработки экспериментов. Значительная доля материала по приборам основана на новых работах, опубликованных в журналах и еще не вошедших в монографии.

Книга представляет интерес для студентов старших курсов университетов, а также для научных сотрудников, занимающихся экспериментальными исследованиями в области ядерной физики и физики элементарных частиц.

ISBN 978-5-7782-1232-9

**УДК 539.1 (075.8)**

© Онучин А. П., 2010  
© Новосибирский государственный  
технический университет, 2010

Ministry of Science and Education of the Russian Federation

NOVOSIBIRSK STATE TECHNICAL UNIVERSITY

A. P. ONUCHIN

# EXPERIMENTAL METHODS OF NUCLEAR PHYSICS

Approved by the NSTU Editorial Board as a Manual

NOVOSIBIRSK  
2010

UDC 539.1 (075.8)  
O-596

Reviewers:

Prof. *Yu. A. Tikhonov*, D.Sc. (Phys. & Math.);  
Prof. *A. V. Burdakov*, D.Sc. (Phys. & Math.)

The manual has been written at the Department of Electrophysical Installations and Accelerators

O-596 **Onuchin A. P.**

Experimental methods of nuclear physics : manual / A. P. Onuchin. —  
Novosibirsk : NSTU Publisher, 2010. — 220 p. («NSTU Textbooks» series).

ISBN 978-5-7782-1232-9

This book is written on the basis of a course of lectures, that the author has been reading for many years to the students of senior courses of the Physical Engineering Faculty of the Novosibirsk State Technical University. The book consists of three parts devoted to the theory of passage of particles through matter, the instruments for detection of particles, the methods of processing of experimental data. The part devoted to instruments includes a lot of material that is based on recent journal papers and not included in the monographs yet.

The book should be of interest for the students of senior courses of universities, and also for the researchers engaged in experimental investigations in the field of nuclear and elementary particle physics.

ISBN 978-5-7782-1232-9

UDC 539.1 (075.8)

© Onuchin A. P., 2010

© Novosibirsk State Technical University, 2010

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> . . . . .	19
<b>Часть I. Прохождение частиц через вещество</b> . . . . .	21
<b>Введение</b> . . . . .	23
<b>Глава 1. Прохождение тяжелых частиц</b> . . . . .	24
§ 1.1. Ионизационные потери. Формула Бете—Блоха . . . . .	24
1.1.1. Вывод формулы . . . . .	24
1.1.2. Формула Бете—Блоха . . . . .	28
1.1.3. Область малых скоростей . . . . .	29
1.1.4. Область релятивистских скоростей. Эффект плотности . . . . .	29
1.1.5. Минимальные ионизационные потери . . . . .	30
§ 1.2. $\delta$ -электроны. Первичная и полная ионизация . . . . .	31
1.2.1. Число $\delta$ -электронов. Формула Резерфорда . . . . .	32
1.2.2. Область малых значений энергии . . . . .	33
1.2.3. Максимальная энергия $\delta$ -электронов . . . . .	33
1.2.4. Первичная и полная ионизация . . . . .	35
§ 1.3. Флуктуации ионизационных потерь . . . . .	36
1.3.1. Флуктуации Гаусса . . . . .	37
1.3.2. Флуктуации Ландау . . . . .	37
1.3.3. Флуктуации в сверхтонких слоях . . . . .	38
§ 1.4. Связь пробег—энергия . . . . .	40
§ 1.5. Разброс пробегов . . . . .	41
§ 1.6. Многократное рассеяние . . . . .	43
1.6.1. Среднеквадратичный угол. Радиационная единица. Формула Росси . . . . .	43
1.6.2. Теория Мольера, формула Росси с коррекцией . . . . .	47
1.6.3. Функции распределения по углу . . . . .	48
1.6.4. Поперечное смещение . . . . .	49
<b>Глава 2. Прохождение электронов через вещество</b> . . . . .	52
§ 2.1. Особенности ионизационных потерь, многократного рассеяния, пробега . . . . .	52

§ 2.2. Тормозное излучение электронов. Теория Бете—Гайтлера . . . . .	53
2.2.1. Процесс . . . . .	53
2.2.2. Спектр излучения . . . . .	53
2.2.3. Потери энергии на излучение. Критическая энергия. Радиационная единица . . . . .	55
2.2.4. Угловое распределение $\gamma$ -квантов . . . . .	56
2.2.5. Флуктуации потерь энергии на излучение . . . . .	56
<b>Глава 3. Прохождение <math>\gamma</math>-квантов через вещество . . . . .</b>	<b>58</b>
§ 3.1. Особенности прохождения нейтральных частиц через вещество . .	58
§ 3.2. Фотоэффект . . . . .	59
3.2.1. Процесс . . . . .	59
3.2.2. Сечение. Зависимость от энергии . . . . .	59
3.2.3. Угловое распределение электронов . . . . .	60
§ 3.3. Эффект Комптона . . . . .	61
3.3.1. Процесс. Полное сечение . . . . .	61
3.3.2. Энергетическое и угловое распределение рассеянных $\gamma$ -квантов	61
3.3.3. Энергетическое и угловое распределение электронов . . . . .	63
§ 3.4. Рождение пар . . . . .	64
3.4.1. Процесс . . . . .	64
3.4.2. Порог реакции . . . . .	64
3.4.3. Коэффициент поглощения . . . . .	66
3.4.4. Распределение энергии между электроном и позитроном . . .	66
3.4.5. Угловое распределение электронов . . . . .	67
§ 3.5. Суммарный коэффициент поглощения $\gamma$ -квантов . . . . .	67
<b>Глава 4. Электромагнитные ливни . . . . .</b>	<b>69</b>
§ 4.1. Качественная картина . . . . .	69
§ 4.2. Теория . . . . .	70
§ 4.3. Экспериментальные методы . . . . .	71
4.3.1. Камера Вильсона в магнитном поле . . . . .	71
4.3.2. Эксперименты Хофштадтера . . . . .	71
§ 4.4. Метод Монте-Карло . . . . .	71
<b>Глава 5. Прохождение адронов через вещество . . . . .</b>	<b>73</b>
§ 5.1. Виды взаимодействий . . . . .	73
§ 5.2. Лептоны . . . . .	74
§ 5.3. Кварки. Адроны . . . . .	75
§ 5.4. Протон. Ядерный пробег . . . . .	76
§ 5.5. $\pi$ -мезон. Ядерный пробег . . . . .	77
§ 5.6. Нейтрон . . . . .	77
5.6.1. Основные свойства нейтрона . . . . .	77

5.6.2. Классификация нейтронов . . . . .	78
5.6.3. Реакции с нейтронами . . . . .	78

## Часть II. Приборы для регистрации ядерных частиц . . . . . 81

### Глава 6. Сцинтилляционные счетчики . . . . . 83

§ 6.1. История развития метода . . . . .	83
§ 6.2. Принцип работы . . . . .	84
§ 6.3. Сцинтилляторы. Основные свойства . . . . .	86
6.3.1. Конверсионная эффективность . . . . .	86
6.3.2. Отношение $\frac{\alpha}{\beta}$ . . . . .	86
6.3.3. Время высвечивания . . . . .	87
6.3.4. Классификация сцинтилляторов. Механизм сцинтилляций . . . . .	87
§ 6.4. ФЭУ . . . . .	91
6.4.1. Фотокатод . . . . .	91
6.4.2. Динодная система . . . . .	91
6.4.3. Шумы фотоумножителей . . . . .	95
6.4.4. ФЭУ в магнитном поле . . . . .	96
6.4.5. Схемы включения ФЭУ . . . . .	97
§ 6.5. Амплитудное разрешение . . . . .	97
6.5.1. Определение . . . . .	97
6.5.2. Флуктуации каскадного процесса . . . . .	98
6.5.3. Флуктуации в случае да-нет . . . . .	98
6.5.4. Флуктуации коэффициента усиления ФЭУ . . . . .	99
6.5.5. Идеальная сцинтилляционная линия . . . . .	100
6.5.6. Энергетическое разрешение ФЭУ . . . . .	101
6.5.7. Форма импульса напряжения на выходе ФЭУ . . . . .	102
6.5.8. Выбор оптимальной $RC$ -цепочки . . . . .	104
§ 6.6. Временное разрешение сцинтилляционного счетчика . . . . .	105
6.6.1. Определение . . . . .	105
6.6.2. Время высвечивания сцинтиллятора . . . . .	105
6.6.3. Время сбора света . . . . .	107
6.6.4. ФЭУ. Основные эффекты . . . . .	109
6.6.5. Дискриминаторы . . . . .	112
6.6.6. Времяпролетные системы . . . . .	112

### Глава 7. Черенковские детекторы . . . . . 116

§ 7.1. Открытие явления . . . . .	116
§ 7.2. Природа явления . . . . .	116
§ 7.3. Основные свойства черенковского излучения . . . . .	117
7.3.1. Черенковский угол. Дисперсия . . . . .	117
7.3.2. Интенсивность излучения . . . . .	117

7.3.3. Поляризация . . . . .	119
§ 7.4. Типы черенковских детекторов . . . . .	120
§ 7.5. Пороговые счетчики . . . . .	120
7.5.1. Принцип работы . . . . .	120
7.5.2. Водяные счетчики . . . . .	120
7.5.3. Газовые счетчики . . . . .	122
7.5.4. Аэрогелевые счетчики . . . . .	123
§ 7.6. Дифференциальные счетчики . . . . .	124
7.6.1. Счетчики с малым телесным углом . . . . .	124
7.6.2. Счетчик Фитча . . . . .	124
§ 7.7. Детекторы черенковских колец (ДЧК) . . . . .	125
7.7.1. Принцип работы . . . . .	125
7.7.2. ДЧК детектора CLEO . . . . .	126
7.7.3. DIRC . . . . .	126
7.7.4. FARICH . . . . .	128

## **Глава 8. Ионизационные камеры. Пропорциональные камеры. Счетчик Гейгера—Мюллера . . . . .**

§ 8.1. Общий принцип работы . . . . .	130
§ 8.2. Скорость дрейфа ионов и электронов . . . . .	130
§ 8.3. Рекомбинация . . . . .	132
§ 8.4. Интегрирующие ионизационные камеры . . . . .	133
8.4.1. Ток от космических частиц . . . . .	133
8.4.2. Токи утечки. Охранное кольцо . . . . .	134
8.4.3. Методы измерения малых токов . . . . .	134
8.4.4. Область применения . . . . .	135
§ 8.5. Импульсные ионизационные камеры . . . . .	135
8.5.1. Картина тока и теорема Рамо—Шокли . . . . .	135
8.5.2. Камера с сеткой Фриша . . . . .	137
§ 8.6. Пропорциональные счетчики . . . . .	137
8.6.1. Принцип работы . . . . .	137
8.6.2. Коэффициент газового усиления . . . . .	138
8.6.3. Форма импульса тока . . . . .	139
8.6.4. Амплитудное разрешение . . . . .	140
§ 8.7. Многопроволочные пропорциональные камеры . . . . .	140
8.7.1. Принцип работы . . . . .	140
8.7.2. Наводка на соседней проволочке . . . . .	141
8.7.3. Проблемы натяжения проволочек . . . . .	141
8.7.4. Пространственное разрешение . . . . .	142
§ 8.8. Индукционные пропорциональные камеры . . . . .	143
8.8.1. Принцип работы . . . . .	143



8.8.2. Камеры с линией задержки . . . . .	144
8.8.3. Измерение амплитуд на полосках на катодной плоскости . . . . .	144
8.8.4. Пространственное разрешение. Кластерный эффект . . . . .	144
§ 8.9. Дрейфовые камеры . . . . .	145
8.9.1. Принцип работы . . . . .	145
8.9.2. Пространственное разрешение . . . . .	145
§ 8.10. Основные варианты дрейфовых камер . . . . .	146
§ 8.11. Измерение продольной координаты . . . . .	148
§ 8.12. Времяпроекционные камеры . . . . .	149
§ 8.13. Микростриповые камеры . . . . .	150
§ 8.14. Дрейфовые камеры типа ГЭУ (GEM) . . . . .	151
§ 8.15. Счетчик Гейгера—Мюллера . . . . .	151
<b>Глава 9. Искровые камеры. Искровые счетчики . . . . .</b>	<b>154</b>
§ 9.1. Принцип работы искровой камеры . . . . .	154
§ 9.2. Картина искрового пробоя . . . . .	154
§ 9.3. Способы съема информации . . . . .	155
§ 9.4. Стримерные искровые камеры . . . . .	157
§ 9.5. Искровые счетчики с локализованным разрядом . . . . .	157
<b>Глава 10. Полупроводниковые детекторы . . . . .</b>	<b>160</b>
§ 10.1. Детекторы на основе твердых тел . . . . .	160
§ 10.2. Основные свойства полупроводников. Зонная теория . . . . .	160
§ 10.3. Полупроводниковый счетчик . . . . .	162
§ 10.4. Детекторы с $p$ – $n$ -переходом . . . . .	163
§ 10.5. Энергетическое разрешение . . . . .	164
§ 10.6. Пространственное разрешение . . . . .	165
§ 10.7. Современное состояние полупроводниковых детекторов . . . . .	165
<b>Глава 11. Принцип работы ядерных фотоэмульсий, камер Вильсона, пузырьковых камер . . . . .</b>	<b>168</b>
§ 11.1. Ядерная фотоэмульсия . . . . .	168
§ 11.2. Камеры Вильсона . . . . .	169
§ 11.3. Пузырьковые камеры . . . . .	171
<b>Глава 12. Методы измерения энергии частиц . . . . .</b>	<b>175</b>
§ 12.1. Измерение по пробегу . . . . .	175
§ 12.2. Магнитные спектрометры . . . . .	175
12.2.1. Принцип метода . . . . .	175
12.2.2. Малый угол поворота . . . . .	176
12.2.3. Спектрометр с 180°-фокусировкой . . . . .	177
12.2.4. Парный магнитный спектрометр . . . . .	177

§ 12.3. Счетчики полного поглощения (калориметры) . . . . .	178
12.3.1. Идея метода . . . . .	178
12.3.2. Счетчик типа «сэндвич» . . . . .	179
12.3.3. Счетчики с гомогенным радиатором . . . . .	180
12.3.4. Точность измерения координаты $\gamma$ -кванта . . . . .	181
<b>Часть III. Статистика в ядерных экспериментах . . . . .</b>	<b>183</b>
<b>Глава 13. Интервал времени между событиями. Закон Пуассона . . . . .</b>	<b>185</b>
§ 13.1. Закон распределения интервалов времени между событиями . . . . .	185
§ 13.2. Закон Пуассона . . . . .	187
§ 13.3. Дисперсия для закона Пуассона . . . . .	189
§ 13.4. Закон Гаусса . . . . .	190
<b>Глава 14. Мертвое время. Случайные совпадения . . . . .</b>	<b>192</b>
§ 14.1. Мертвое время приборов. Просчеты . . . . .	192
14.1.1. Два типа мертвого времени приборов . . . . .	192
§ 14.2. Методы измерения мертвого времени . . . . .	194
14.2.1. Два источника . . . . .	194
14.2.2. Известное изменение загрузки . . . . .	194
§ 14.3. Использование пересчетных схем для уменьшения просчетов . . . . .	194
§ 14.4. Случайные совпадения в схемах совпадения . . . . .	195
<b>Глава 15. Метод максимального правдоподобия . . . . .</b>	<b>196</b>
§ 15.1. Обработка эксперимента . . . . .	196
§ 15.2. Ошибки измерений. Первая магическая формула . . . . .	197
§ 15.3. Закон Пуассона . . . . .	197
§ 15.4. Метод наименьших квадратов . . . . .	198
§ 15.5. Планирование эксперимента. Вторая магическая формула . . . . .	199
<b>Глава 16. Биномиальное распределение . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>Глава 17. Сравнение эксперимента с теорией. Метод <math>\chi^2</math> Пирсона . . . . .</b>	<b>204</b>
§ 17.1. Метод $\chi^2$ . . . . .	204
§ 17.2. Сравнение эксперимента с двумя теориями . . . . .	205
§ 17.3. Учет фона . . . . .	206
§ 17.4. Случай малой статистики . . . . .	207
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>208</b>
<b>Именной указатель . . . . .</b>	<b>218</b>

# CONTENTS

<b>Preface</b>	19
<b>Part I. Passage of particles through matter</b>	21
<b>Introduction</b>	23
<b>Chapter 1. Passage of heavy particles</b>	24
§ 1.1. Ionization losses. The Bethe—Bloch equation	24
1.1.1. Derivation of the equation	24
1.1.2. The Bethe—Bloch equation	28
1.1.3. Low velocity case	29
1.1.4. Relativistic velocity case. Density effect	29
1.1.5. Minimum ionization losses	30
§ 1.2. Energetic knock-on electrons. Primary and total ionization	31
1.2.1. Number of knock-on electrons. The Rutherford formula	32
1.2.2. Low energy region	33
1.2.3. The maximum energy of knock-on electrons	33
1.2.4. Primary and total ionization	35
§ 1.3. Fluctuations of ionization losses	36
1.3.1. Gauss fluctuations	37
1.3.2. Landau fluctuations	37
1.3.3. Fluctuations in super thin layers	38
§ 1.4. Range—energy relation	40
§ 1.5. Variations of ranges	41
§ 1.6. Multiple scattering	43
1.6.1. Root-mean-square angle. Radiation length. The Rossi formula	43
1.6.2. Theory of Molière, the Rossi formula with correction	47
1.6.3. Angular distribution	48
1.6.4. Lateral displacement	49
<b>Chapter 2. Passage of electrons through matter</b>	52
§ 2.1. Features of ionization losses, multiple scattering, range	52
§ 2.2. Bremsstrahlung of electrons. The Bethe—Heitler theory	53
2.2.1. Process	53

2.2.2.	Spectrum of radiation . . . . .	53
2.2.3.	Energy loss by bremsstrahlung. Critical energy. Radiation length	55
2.2.4.	Angular distribution of photons . . . . .	56
2.2.5.	Fluctuations of energy losses by bremsstrahlung . . . . .	56
<b>Chapter 3.</b>	<b>Passage of high-energy photons through matter . . . . .</b>	<b>58</b>
§ 3.1.	Features of passage of neutral particles through matter . . . . .	58
§ 3.2.	Photoelectric effect . . . . .	59
3.2.1.	Process . . . . .	59
3.2.2.	Cross-section. Dependence on energy . . . . .	59
3.2.3.	Angular distribution of electrons . . . . .	60
§ 3.3.	Compton effect . . . . .	61
3.3.1.	Process. Total cross-section . . . . .	61
3.3.2.	Energy and angular distribution of scattered photons . . . . .	61
3.3.3.	Energy and angular distribution of electrons . . . . .	63
§ 3.4.	Pair production . . . . .	64
3.4.1.	Process . . . . .	64
3.4.2.	Threshold of reaction . . . . .	64
3.4.3.	Absorption coefficient . . . . .	66
3.4.4.	Distribution of energy between electron and positron . . . . .	66
3.4.5.	Angular distribution of electrons . . . . .	67
§ 3.5.	Total absorption coefficient of photons . . . . .	67
<b>Chapter 4.</b>	<b>Electromagnetic showers . . . . .</b>	<b>69</b>
§ 4.1.	Qualitative picture . . . . .	69
§ 4.2.	Theory . . . . .	70
§ 4.3.	Experimental methods . . . . .	71
4.3.1.	Wilson chamber in magnetic field . . . . .	71
4.3.2.	Hofstadter's experiments . . . . .	71
§ 4.4.	Monte Carlo method . . . . .	71
<b>Chapter 5.</b>	<b>Passage of hadrons through matter . . . . .</b>	<b>73</b>
§ 5.1.	Kinds of interactions . . . . .	73
§ 5.2.	Leptons . . . . .	74
§ 5.3.	Quarks. Hadrons . . . . .	75
§ 5.4.	Proton. Nuclear interaction range . . . . .	76
§ 5.5.	$\pi$ -meson. Nuclear interaction range . . . . .	77
§ 5.6.	Neutron . . . . .	77
5.6.1.	Basic properties of neutron . . . . .	77
5.6.2.	Classification of neutrons . . . . .	78
5.6.3.	Reactions with neutrons . . . . .	78

**Part II. Instruments for detection of nuclear particles . . . . . 81**

**Chapter 6. Scintillation counters . . . . . 83**

§ 6.1. History of the method development . . . . .	83
§ 6.2. Principle of work . . . . .	84
§ 6.3. Scintillators. Basic properties . . . . .	86
6.3.1. Conversion efficiency . . . . .	86
6.3.2. Relation $\frac{\alpha}{\beta}$ . . . . .	86
6.3.3. Decay time . . . . .	87
6.3.4. Scintillators classification . . . . .	87
§ 6.4. PMT . . . . .	91
6.4.1. Photocathode . . . . .	91
6.4.2. Dynode system . . . . .	91
6.4.3. Noise of photomultipliers . . . . .	95
6.4.4. PMT in magnetic field . . . . .	96
6.4.5. Circuits for PMT switching . . . . .	97
§ 6.5. Amplitude resolution . . . . .	97
6.5.1. Definition . . . . .	97
6.5.2. Fluctuations of cascade process . . . . .	98
6.5.3. Fluctuations in yes-no case . . . . .	98
6.5.4. Fluctuations of PMT amplification factor . . . . .	99
6.5.5. Ideal scintillation line . . . . .	100
6.5.6. Energy resolution of PMT . . . . .	101
6.5.7. Voltage pulse shape at PMT output . . . . .	102
6.5.8. Choice of optimum $RC$ -chain . . . . .	104
§ 6.6. Time resolution of scintillation counter . . . . .	105
6.6.1. Definition . . . . .	105
6.6.2. Decay time of scintillator . . . . .	105
6.6.3. Time of light collection . . . . .	107
6.6.4. PMT. Main effects . . . . .	109
6.6.5. Discriminators . . . . .	112
6.6.6. Time of flight system . . . . .	112

**Chapter 7. Čerenkov detectors . . . . . 116**

§ 7.1. Discovery of the phenomenon . . . . .	116
§ 7.2. Nature of the phenomena . . . . .	116
§ 7.3. The basic properties of Čerenkov radiation . . . . .	117
7.3.1. Čerenkov angle. Dispersion . . . . .	117
7.3.2. Intensity of radiation . . . . .	117
7.3.3. Polarization . . . . .	119
§ 7.4. Types of Čerenkov detectors . . . . .	120

§ 7.5. Threshold counters . . . . .	120
7.5.1. Principle of work . . . . .	120
7.5.2. Water counters . . . . .	120
7.5.3. Gas counters . . . . .	122
7.5.4. Aerogel counters . . . . .	123
§ 7.6. Differential counters . . . . .	124
7.6.1. Counters with a small solid angle . . . . .	124
7.6.2. Fitch counter . . . . .	124
§ 7.7. Ring Imaging Čerenkov Counters (RICH) . . . . .	125
7.7.1. Principle of work . . . . .	125
7.7.2. RICH of the CLEO detector . . . . .	126
7.7.3. DIRC . . . . .	126
7.7.4. FARICH . . . . .	128

## Chapter 8. Ionization chambers. Proportional chambers. The Geiger—Muller counter . . . . .

§ 8.1. General principle of work . . . . .	130
§ 8.2. Drift velocity of ions and electrons . . . . .	130
§ 8.3. Recombination . . . . .	132
§ 8.4. Integrating ionization chambers . . . . .	133
8.4.1. Current from cosmic particles . . . . .	133
8.4.2. Leakage current. Guard ring . . . . .	134
8.4.3. Methods of measurement of small currents . . . . .	134
8.4.4. Field of application . . . . .	135
§ 8.5. Pulse ionization chambers . . . . .	135
8.5.1. Picture of current and Ramo—Shokli theorem . . . . .	135
8.5.2. Frisch grid chamber . . . . .	137
§ 8.6. Proportional counters . . . . .	137
8.6.1. Principle of work . . . . .	137
8.6.2. Gas amplification factor . . . . .	138
8.6.3. Current pulse shape . . . . .	139
8.6.4. Amplitude resolution . . . . .	140
§ 8.7. Multiwire proportional chambers . . . . .	140
8.7.1. Principle of work . . . . .	140
8.7.2. Crosstalk between wires . . . . .	141
8.7.3. Problems of tension of wires . . . . .	141
8.7.4. Spatial resolution . . . . .	142
§ 8.8. Induction proportional chambers . . . . .	143
8.8.1. Principle of work . . . . .	143
8.8.2. Chambers with delay line . . . . .	144
8.8.3. Measurement of amplitudes on strips at cathode plane . . . . .	144

8.8.4. Spatial resolution. Cluster effect . . . . .	144
§ 8.9. Drift chambers . . . . .	145
8.9.1. Principle of work . . . . .	145
8.9.2. Spatial resolution . . . . .	145
§ 8.10. Common drift chambers versions . . . . .	146
§ 8.11. Measurement of longitudinal coordinate . . . . .	148
§ 8.12. Time projection chambers . . . . .	149
§ 8.13. Microstrip chambers . . . . .	150
§ 8.14. Drift chambers with GEM . . . . .	151
§ 8.15. Geiger—Muller counter . . . . .	151
<b>Chapter 9. Spark chambers. Spark counters . . . . .</b>	<b>154</b>
§ 9.1. Principle of work of spark chamber . . . . .	154
§ 9.2. Picture of spark break-down . . . . .	154
§ 9.3. Readout options . . . . .	155
§ 9.4. Strimer spark chambers . . . . .	157
§ 9.5. Spark counters with localized discharge . . . . .	157
<b>Chapter 10. Semiconductor detectors . . . . .</b>	<b>160</b>
§ 10.1. Solid-state detectors . . . . .	160
§ 10.2. Basic properties of semiconductors. The zone theory . . . . .	160
§ 10.3. Semiconductor counter . . . . .	162
§ 10.4. Detectors with $p$ - $n$ -junction . . . . .	163
§ 10.5. Energy resolution . . . . .	164
§ 10.6. Spatial resolution . . . . .	165
§ 10.7. State of the art of semiconductor detectors . . . . .	165
<b>Chapter 11. Principle of work of nuclear photographic emulsions, Wil-</b>	
<b>son's chambers, bubble chambers . . . . .</b>	<b>168</b>
§ 11.1. Nuclear photographic emulsions . . . . .	168
§ 11.2. Wilson's chambers . . . . .	169
§ 11.3. Bubble chambers . . . . .	171
<b>Chapter 12. Methods of particle energy measurement . . . . .</b>	<b>175</b>
§ 12.1. Range measurement . . . . .	175
§ 12.2. Magnetic spectrometers . . . . .	175
12.2.1. Principle of method . . . . .	175
12.2.2. Small deflection angle . . . . .	176
12.2.3. Spectrometers with $180^\circ$ -focusing . . . . .	177
12.2.4. Pair magnetic spectrometer . . . . .	177
§ 12.3. Total absorption counters (calorimeters) . . . . .	178
12.3.1. Idea of the method . . . . .	178

12.3.2. Sandwich counter . . . . .	179
12.3.3. Counters with homogeneous radiator . . . . .	180
12.3.4. Photon position measurement accuracy . . . . .	181
<b>Part III. Statistics in nuclear experiments . . . . .</b>	<b>183</b>
<b>Chapter 13. Interval of time between events. Poisson law . . . . .</b>	<b>185</b>
§ 13.1. Law of distribution of time intervals between events . . . . .	185
§ 13.2. Poisson law . . . . .	187
§ 13.3. Dispersion of the Poisson law . . . . .	189
§ 13.4. Gaussian law . . . . .	190
<b>Chapter 14. Dead time. Random coincidences . . . . .</b>	<b>192</b>
§ 14.1. Dead time of devices. Miscounts . . . . .	192
14.1.1. Two types of dead time . . . . .	192
§ 14.2. Methods of measurement of dead time . . . . .	194
14.2.1. Two sources . . . . .	194
14.2.2. Known change of load . . . . .	194
§ 14.3. Use of scaling circuits for reduction of miscounts . . . . .	194
§ 14.4. Random coincidences in coincidence circuits . . . . .	195
<b>Chapter 15. Method of maximum likelihood . . . . .</b>	<b>196</b>
§ 15.1. Analysis of experiment . . . . .	196
§ 15.2. Measurement errors. The first magic formula . . . . .	197
§ 15.3. Poisson law . . . . .	197
§ 15.4. Least squares method . . . . .	198
§ 15.5. Planning of experiment. The second magic formula . . . . .	199
<b>Chapter 16. Binomial distribution . . . . .</b>	<b>202</b>
<b>Chapter 17. Comparison of experiment with theory. Pirson's <math>\chi^2</math> method</b>	<b>204</b>
§ 17.1. $\chi^2$ method . . . . .	204
§ 17.2. Comparison of experiment with two theories . . . . .	205
§ 17.3. Background consideration . . . . .	206
§ 17.4. Case of small statistics . . . . .	207
<b>Subject index . . . . .</b>	<b>208</b>
<b>Name index . . . . .</b>	<b>218</b>



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга<sup>1</sup> написана на основе годового авторского курса лекций «Экспериментальные методы ядерной физики», который читается в течение многих лет магистрантам физико-технического факультета НГТУ. Курс посвящен теории прохождения частиц через вещество, приборам для регистрации частиц и методам обработки экспериментов.

Главная цель курса — научить слушателей понимать основные явления, делать оценку эффектов, получать данные, используя монографии и справочники.

Книга состоит из трех частей. В первой части рассматривается прохождение через вещество тяжелых частиц, электронов и гамма-квантов, образование электромагнитных ливней. Дается краткое описание лептонов, кварков, адронов, рассматриваются прохождение протонов и основные реакции с нейтронами. По основным разделам предлагаются задачи.

Вторая часть посвящена приборам для регистрации частиц. Подробно рассматриваются приборы, которые широко применяются в настоящее время. Приводятся данные по новым методическим разработкам, опубликованным в журналах и еще не вошедшим в монографии. Дается краткое описание приборов, с помощью которых был сделан большой вклад в развитие экспериментальной ядерной физики, но в настоящее время редко используемых. По этой части курса организован специальный ядерный практикум.

Третья часть книги посвящена законам статистики в ядерных экспериментах. Рассматриваются закон Пуассона, биномиальный закон, просчеты приборов, случайные совпадения. Описывается обработка экспериментов методом максимального правдоподобия. Рассматривается сравнение эксперимента с теорией методом хи-квадрат Пирсона.

---

<sup>1</sup>Книга поддержана грантом «Ведущие научные школы России» НШ-5655.2008.2. Руководителем гранта является А. П. Онучин.

Поскольку это учебная книга, решено не перегружать текст ссылками на первоисточники. В конце глав приводятся списки основной литературы для более глубокого изучения предмета.

В заключение выражаю искреннюю благодарность большой группе физиков, принявших активное участие в подготовке книги к изданию. Среди них те, кто слушал этот курс лекций — А. Ю. Барняков, М. Ю. Барняков, В. В. Баруткин, И. Ю. Басок, В. С. Бобровников, Д. В. Гусев, А. Н. Юшков, а также мои коллеги — С. А. Кононов, Е. А. Кравченко, Ю. И. Сковпень, В. А. Таюрский, К. Ю. Тодышев. Особенно я благодарен В. В. Баруткину за большой вклад в эту работу. Активное участие этой группы физиков стало одним из определяющих условий выхода книги в свет.

Особая благодарность за идею создания этой книги и поддержку в период подготовки ее к изданию моей жене Ирине Валентиновне и сыну Мише.