

**А. В. Хрюнов**

---

# **ОСНОВЫ**

# **РЕЛЯТИВИСТСКОЙ**

# **ФИЗИКИ**

**Электромагнитные поля**

---

**Релятивистская  
механика частиц**

---

**Релятивистская  
кинетическая теория**

---

**Вариационные принципы  
электродинамики и механики**

---

**Релятивистская механика  
вращательных движений**

---

**Дистанционные  
измерения**

---



URSS

**А. В. Хрюнов**

# **ОСНОВЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФИЗИКИ**

**Электромагнитные поля**

•

**Релятивистская механика частиц**

•

**Релятивистская кинетическая теория**

•

**Вариационные принципы  
электродинамики и механики**

•

**Релятивистская механика  
вращательных движений**

•

**Дистанционные измерения**

Издание второе,  
существенно переработанное и дополненное



**URSS**

**МОСКВА**

**Хрюнов Анатолий Васильевич**

**Основы релятивистской физики: Электромагнитные поля.**

Релятивистская механика частиц. Релятивистская кинетическая теория.

Вариационные принципы электродинамики и механики. Релятивистская механика вращательных движений. Дистанционные измерения. — Изд. 2-е, сущ. перераб. и доп. — М.: ЛЕНАНД, 2017. — 544 с.

В книге содержится изложение математического аппарата и основных принципов специальной теории относительности, а также ее естественного продолжения — релятивистской физики. Подробнее, чем в ранее опубликованных монографиях, рассмотрены: основы релятивистской кинетической теории, особенности применения вариационных принципов, затруднения, возникающие при анализе вращения тел и в других разделах физики.

Для инженеров, научных работников, студентов и преподавателей физико-математических и технических факультетов вузов. Может использоваться в качестве пособия для самостоятельного изучения современной теории физических явлений.

Формат 60×90/16. Печ. л. 34. Зак. № АЛ-751.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД».

117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

ISBN 978-5-9710-4446-8

© ЛЕНАНД, 2017

18669 ID 226089



Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель, а также размещение в Интернете, если на то нет письменного разрешения владельца.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	<b>8</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>10</b>
<b>Раздел 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФИЗИКИ</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1. Основные понятия</b> .....	<b>16</b>
1.1.1. Четырехмерное пространство-время .....	16
1.1.2. Векторы и их компоненты .....	17
<b>1.2. Векторы. Координаты и их преобразования</b> .....	<b>23</b>
1.2.1. Координаты вектора в основном и взаимном базисах .....	23
1.2.2. Линейные преобразования системы отсчета .....	28
1.2.3. Преобразования Лоренца .....	34
1.2.4. Частные случаи преобразований Лоренца .....	42
1.2.5. Бесконечно малое преобразование Лоренца .....	52
<b>1.3. Тензоры. Алгебра тензоров</b> .....	<b>56</b>
1.3.1. Что такое тензор .....	56
1.3.2. Примеры тензоров второго ранга .....	59
1.3.3. Тензоры высших рангов .....	64
1.3.4. Виды симметрии тензоров .....	67
1.3.5. Алгебра тензоров. Сложение и умножение .....	69
1.3.6. Сопряженные тензоры. Представление тензора в виде суммы тензоров частного вида .....	70
1.3.7. Подстановка индексов. Симметрирование. Альтернирование .....	71
1.3.8. Свертывание тензоров .....	74
1.3.9. Псевдотензоры .....	75
1.3.10. Алгебраические инварианты тензоров второго ранга .....	76
<b>1.4. Плоскости <math>m</math>-го порядка</b> .....	<b>79</b>
1.4.1. Поверхности и плоскости в многомерном пространстве .....	79
1.4.2. Представление $m$ -плоскости в виде $m$ -вектора .....	82
1.4.3. Скалярное произведение двух $m$ -векторов .....	88

1.4.4. О мере $m$ -вектора.....	92
1.4.5. Объем и ориентация пространственного элемента .....	96
1.4.6. Единичный вектор $m$ -плоскости.....	100
1.4.7. Дуальные тензоры .....	104
1.4.8. Проекции на плоскости $m$ -го порядка.....	110
<b>1.5. Дифференцирование тензоров .....</b>	<b>114</b>
1.5.1. Дифференцирование по параметру. Локальные характеристики кривой.....	114
1.5.2. Поле тензора. Производные по координатам и направлению .....	119
1.5.3. Разновидности дифференциальных операций .....	123
1.5.4. Ковариантное дифференцирование в криволинейных координатных системах.....	127
<b>1.6. Интегрирование тензорных функций и полей .....</b>	<b>136</b>
1.6.1. Интегрирование тензорной функции по скалярному аргументу .....	136
1.6.2. Интегрирование тензорных полей.....	138
1.6.3. Интегральная 1–2 теорема и ее разновидности.....	142
1.6.4. Интегральная 2–3 теорема и ее модификации .....	147
1.6.5. Интегральная 3–4 теорема. Обобщение формул Грина.....	151
<b>1.7. Интегральные преобразования и представления тензорных полей .....</b>	<b>156</b>
1.7.1. Представление скалярного поля в виде интеграла Фурье .....	156
1.7.2. Интегральные преобразования тензорных полей .....	160
<b>Заключение к разделу 1 .....</b>	<b>163</b>
<b>Раздел 2. УРАВНЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФИЗИКИ ...</b>	<b>164</b>
<b>2.1. Электромагнитное поле в вакууме .....</b>	<b>165</b>
2.1.1. Уравнения Максвелла и их тензорная форма.....	165
2.1.2. Интегральная форма уравнений электродинамики .....	171
2.1.3. Законы преобразования. Инварианты .....	176
2.1.4. Электромагнитные волны.....	182
2.1.5. Уравнение фронта электромагнитной волны.....	194

---

<b>2.2. Электромагнитные поля в материальной среде</b> .....	<b>201</b>
2.2.1. Поведение заряженных частиц среды при воздействии внешнего поля.....	201
2.2.2. Поляризация среды во внешнем поле.....	204
2.2.3. Материальные уравнения перемещающейся среды.....	210
2.2.4. Свойства тензора электромагнитной восприимчивости.....	211
2.2.5. Граничные условия.....	217
<b>2.3. Релятивистская механика частиц</b> .....	<b>220</b>
2.3.1. Кинематика точечных частиц.....	220
2.3.2. Сферические координаты в 4-мерном пространстве.....	228
2.3.3. Измерение характеристик движущихся объектов. Релятивистские эффекты.....	234
2.3.4. Динамика материальной точки.....	244
2.3.5. Электромагнитное поле движущегося заряда.....	249
2.3.6. Энергия-импульс частицы. Упругие соударения.....	259
2.3.7. Неупругие соударения.....	266
<b>2.4. Релятивистская кинетическая теория</b> .....	<b>270</b>
2.4.1. Статистическая ковариантная функция распределения.....	270
2.4.2. Равновесная функция распределения.....	278
2.4.3. Релятивистское кинетическое уравнение.....	289
2.4.4. Некоторые свойства интеграла соударений.....	313
2.4.5. Уравнения релятивистской гидродинамики.....	317
2.4.6. Гидродинамические характеристики среды при равновесном распределении частиц по скоростям.....	323
2.4.7. Уравнение диффузионных процессов в почти равновесной среде.....	332
2.4.8. Электромагнитное поле потока заряженных частиц.....	335
<b>Заключение к разделу 2</b> .....	<b>339</b>
<b>Раздел 3. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФИЗИКИ</b> .....	<b>341</b>
<b>3.1. Методы математического анализа экстремальных свойств физических процессов</b> .....	<b>343</b>
3.1.1. Основная задача вариационного исчисления.....	343
3.1.2. Вариационная формулировка краевых задач.....	347

3.1.3. Вариационные задачи с дополнительными условиями.....	355
3.1.4. Метод динамического программирования .....	361
3.1.5. Канонические уравнения динамики .....	368
3.1.6. Характеристики состояния и динамические потенциалы.....	371
3.1.7. Модификация вариационных задач и краевых условий .....	381
<b>3.2. Вариационные принципы</b>	
<b>электродинамики и механики.....</b>	<b>386</b>
3.2.1. Экстремальные принципы электродинамики.....	386
3.2.2. Вариационные принципы механики точечных частиц .....	392
3.2.3. Вариационное представление законов гидродинамики .....	398
3.2.4. О методах теоретического изучения процессов в физических средах.....	407
3.2.5. Экстремальные принципы теории волновых полей .....	413
3.2.6. Самосогласованные задачи и их вариационные формулировки.....	415
<b>3.3. Характеристики и свойства реальных движений .....</b>	<b>419</b>
3.3.1. Функции Лагранжа и функционалы действия реальных движений.....	419
3.3.2. Уравнение Гамильтона—Якоби в релятивистской механике точечных частиц.....	421
3.3.3. Инвариантность физических величин.....	429
3.3.4. Инвариантность действия частицы и закон сохранения энергии .....	432
3.3.5. Законы сохранения для полей в ВИПе.....	437
3.3.6. Калибровочная инвариантность и закон сохранения заряда.....	442
<b>Заключение к разделу 3 .....</b>	<b>444</b>
<b>Раздел 4. РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА</b>	
<b>ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ .....</b>	<b>445</b>
<b>4.1. Вращение частицы вокруг неподвижной</b>	
<b>пространственной оси .....</b>	<b>445</b>
<b>4.2. Движение заряженной частицы в поле</b>	
<b>неподвижного заряда иного знака.....</b>	<b>452</b>

---

4.3. Электромагнитное излучение ускоряемых заряженных частиц .....	468
4.4. Сопоставление законов электро-динамики и гравитации .....	478
4.5. Особенности релятивистского описания вращения материальных тел.....	486
Заключение к разделу 4 .....	506
<b>Раздел 5. О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ОБЪЕКТОВ И МЕТОДАХ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ .....</b>	<b>508</b>
5.1. Измерение расстояний и размеров.....	510
5.2. Измерение промежутков времени.....	519
5.3. Определение координат событий в ВИПе .....	526
5.4. Определение пространственных и временных характеристик вращающихся объектов .....	529
5.5. О проблеме дистанционных измерений.....	536
Заключение к разделу 5.....	538
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>539</b>