

**ТЕОРИЯ  
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

---

*К. Мёмер*

**К. МЁЛЛЕР**

# **ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

**ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ**

Перевод с английского  
**В. Г. КРЕЧЕТА, В. Г. ЛАНЧИНСКОГО**

Под редакцией профессора  
**Д. ИВАНЕНКО**

**МОСКВА АТОМИЗДАТ  
1975**

**Мёллер К. Теория относительности.** Изд. 2-е. Пер. с англ. Под ред. проф. Д. Иваненко. М., Атомиздат, 1975, 400 с.

Книга относится к числу фундаментальных трудов по теоретической физике. В ней содержатся основы специальной теории относительности и все разделы классической физики в рамках релятивистской теории: механика точки и сред, электродинамика, теория волновых полей и термодинамика.

Во второй части книги, посвященной общей теории относительности, излагаются основы римановой геометрии и эйнштейновской теории гравитации. Рассматриваются лагранжевы формализм, законы сохранения, космологические и астрофизические проблемы, экспериментальные обоснования общей теории относительности.

Книга написана с большим педагогическим мастерством. Она без сомнения станет настольной книгой для самого широкого круга читателей.

Рис. 19. Библиографии 393.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| Предисловие к переводу . . . . .  | 5         |
| Предисловие ко второму изданию. . . . .   | 7         |
| Из предисловия к первому изданию . . . . .  | 8         |
| <b>Глава 1. Основы специальной теории относительности. Исторический обзор</b>   | <b>10</b> |
| § 1.1. Принцип относительности в механике. Преобразования Галилея . . . . .   | 10        |
| § 1.2. Специальный принцип относительности. . . . .   | 12        |
| § 1.3. Инвариантность фазы плоской волны. . . . .   | 13        |
| § 1.4. Преобразование характеристик плоской волны. . . . .  | 14        |
| § 1.5. Эффект Доплера. . . . .  | 15        |
| § 1.6. Скорость света в вакууме . . . . .   | 16        |
| § 1.7. Скорость света в преломляющих средах. . . . .  | 19        |
| § 1.8. Эксперименты Хука и Физо. . . . .  | 20        |
| § 1.9. Электронная теория Лоренца. . . . .  | 22        |
| § 1.10. Соответствие между теорией эфира и принципом относительности для всех эффектов первого порядка. Принцип Ферма . . . . . | 23        |
| § 1.11. Аберрация света . . . . .   | 25        |
| § 1.12. Эксперимент Майкельсона . . . . .   | 26        |
| § 1.13. Гипотеза о сокращении. . . . .  | 27        |
| § 1.14. Справедливость принципа относительности для всех физических явлений . . . . .   | 28        |
| <b>Глава 2. Релятивистская кинематика . . . . .</b>   | <b>29</b> |
| § 2.1. Одновременность событий. . . . .   | 29        |
| § 2.2. Относительность одновременности. . . . .   | 30        |
| § 2.3. Специальные преобразования Лоренца . . . . .   | 32        |
| § 2.4. Общие преобразования Лоренца . . . . .   | 35        |
| § 2.5. Сокращение размеров движущихся тел. . . . .  | 38        |
| § 2.6. Запаздывание движущихся часов. Парадокс часов . . . . .  | 40        |
| § 2.7. Преобразование скоростей частиц. . . . .   | 42        |
| § 2.8. Последовательные преобразования Лоренца. Прецессия Томаса. . . . .   | 44        |
| § 2.9. Преобразование параметров волны в теории относительности. . . . .  | 46        |
| § 2.10. Групповая скорость в движущихся средах. . . . .   | 47        |
| § 2.11. Эффект Доплера, аберрация света и эффект увлечения в теории относительности. . . . .                                    | 49        |
| <b>Глава 3. Релятивистская механика . . . . .</b>   | <b>53</b> |
| § 3.1. Масса и импульс частицы . . . . .  | 53        |
| § 3.2. Сила, работа, кинетическая энергия. . . . .  | 55        |
| § 3.3. Преобразование силы, импульса и энергии. . . . .   | 56        |
| § 3.4. Гиперболическое движение. Движение электрически заряженной частицы в постоянном магнитном поле . . . . .                 | 58        |
| § 3.5. Эквивалентность массы и энергии. . . . .   | 60        |
| § 3.6. Неупругие столкновения. Масса замкнутой системы частиц. . . . .  | 64        |
| § 3.7. Экспериментальное подтверждение релятивистской механики . . . . .  | 66        |
| <b>Глава 4. Четырехмерная формулировка теории относительности: тензорное исчисление . . . . .</b>                               | <b>71</b> |
| § 4.1. Четырехмерное представление преобразований Лоренца . . . . .   | 71        |
| § 4.2. Лоренцево сокращение и замедление хода движущихся часов в четырехмерном представлении. . . . .                           | 74        |
| § 4.3. Ковариантность законов природы в четырехмерной формулировке . . . . .  | 75        |
| § 4.4. Четырехмерный линейный элемент, или интервал. 4-векторы. . . . .   | 76        |

|                 |   |            |
|-----------------|---|------------|
| § 4.5.          | 4-скорость. 4-ускорение. Волновой вектор. Четырехмерная групповая скорость. . . . .                                 | 77         |
| § 4.6.          | 4-импульс и 4-сила. Основные уравнения механики точки в четырехмерной векторной форме. . . . .                      | 80         |
| § 4.7.          | Тензоры второго ранга. . . . .  | 83         |
| § 4.8.          | Угловой момент и момент силы в четырехмерной форме. . . . .   | 86         |
| § 4.9.          | Тензоры произвольного ранга. . . . .  | 86         |
| § 4.10.         | Псевдотензоры   | 87         |
| § 4.11.         | Символ Леви-Чивита . . . . .  | 87         |
| § 4.12.         | Дуальные тензоры. . . . .   | 88         |
| § 4.13.         | Инфинитезимальные преобразования Лоренца. Преобразования без вращения. . . . .                                      | 92         |
| § 4.14.         | Последовательные преобразования Лоренца. . . . .  | 93         |
| § 4.15.         | Последовательные системы покоя при произвольном прямолинейном и равномерном вращательном движениях частицы. . . . . | 95         |
| § 4.16.         | Тензорные и псевдотензорные поля. Тензорный анализ. . . . .   | 97         |
| § 4.17.         | Теорема Гаусса для четырехмерного пространства. . . . .   | 99         |
| § 4.18.         | Основные уравнения механики для некогерентной материи. . . . .  | 101        |
| § 4.19.         | Тензор кинетической энергии. . . . .  | 106        |
| <b>Глава 5.</b> | <b>Электродинамика в вакууме. . . . .</b>   | <b>108</b> |
| § 5.1.          | Фундаментальные уравнения электродинамики в вакууме. 4-плотность тока электрического заряда . . . . .               | 108        |
| § 5.2.          | Ковариантность уравнений электродинамики при преобразованиях Лоренца. Тензор электромагнитного поля . . . . .       | 110        |
| § 5.3.          | 4-Потенциал. Калибровочные преобразования. . . . .  | 111        |
| § 5.4.          | Интегральное представление 4-потенциала. . . . .  | 112        |
| § 5.5.          | Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Льенара — Вихерта для точечного заряда. . . . .                                | 113        |
| § 5.6.          | Поле равномерно движущегося точечного заряда . . . . .  | 116        |
| § 5.7.          | Электромагнитные силы, действующие на заряженную материю. . . . .   | 118        |
| § 5.8.          | Вариационный принцип в электродинамике. . . . .   | 119        |
| § 5.9.          | Электромагнитный тензор энергии. . . . .  | 121        |
| § 5.10.         | Полный тензор энергии. . . . .  | 123        |
| <b>Глава 6.</b> | <b>Общая теория замкнутых систем. Механика упругих сред. Теория поля. . . . .</b>                                   | <b>124</b> |
| § 6.1.          | Законы сохранения для замкнутых систем. . . . .   | 124        |
| § 6.2.          | 4-Импульс, 4-тензор углового момента для замкнутых островных систем. . . . .  | 126        |
| § 6.3.          | Центр масс. . . . .   | 128        |
| § 6.4.          | Фундаментальные уравнения механики упругих сред. . . . .  | 131        |
| § 6.5.          | Тензор напряжений и тензор энергии. Трансформационные свойства . . . . .  | 136        |
| § 6.6.          | Идеальная жидкость. . . . .   | 139        |
| § 6.7.          | Скалярные мезонные поля. Общая теория поля. . . . .   | 142        |
| <b>Глава 7.</b> | <b>Незамкнутые системы. Электродинамика диэлектриков и парамагнетиков. Термодинамика. . . . .</b>                   | <b>145</b> |
| § 7.1.          | Общие свойства незамкнутых систем . . . . .   | 145        |
| § 7.2.          | Статические незамкнутые системы . . . . .   | 147        |
| § 7.3.          | Электростатические системы. Классические модели электрона. . . . .  | 148        |
| § 7.4.          | Основные уравнения электродинамики стационарной материи. . . . .  | 150        |
| § 7.5.          | Уравнения Минковского для равномерно движущихся сред. . . . .   | 151        |
| § 7.6.          | Материальные соотношения в четырехмерной формулировке. Граничные условия. . . . .                                   | 154        |
| § 7.7.          | Электромагнитный тензор энергии и плотность 4-силы. . . . .   | 155        |
| § 7.8.          | Скорость распространения энергии световой волны в движущейся преломляющей среде . . . . .                           | 159        |
| § 7.9.          | Сплошная среда с внутренней теплопроводностью. . . . .  | 162        |
| § 7.10.         | Первый закон релятивистской термодинамики. Трансформационные свойства 4-импульса подведенного тепла. . . . .        | 167        |
| § 7.11.         | Второй закон релятивистской термодинамики. . . . .  | 170        |
| § 7.12.         | Термодинамические потенциалы однородных изотропных сред. . . . .  | 172        |
| § 7.13.         | Идеальный газ. Излучение черного тела. . . . .  | 174        |
| <b>Глава 8.</b> | <b>Основы общей теории относительности. . . . .</b>   | <b>179</b> |
| § 8.1.          | Общий принцип относительности. . . . .  | 179        |
| § 8.2.          | Принцип эквивалентности. . . . .  | 180        |
| § 8.3.          | Равномерно вращающаяся система координат. Пространство и время в общей теории относительности. . . . .              | 182        |
| § 8.4.          | Неевклидова геометрия. Метрический тензор. . . . .  | 184        |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| § 8.5.  | Геодезические линии. . . . .  | 186 |
| § 8.6.  | Непосредственное измерение метрики. Геометрия $n$ -мерного пространства. . . . .  | 188 |
| § 8.7.  | Общие ускоренные системы отсчета. Наиболее общие допустимые преобразования координат. . . . .                                       | 189 |
| § 8.8.  | Пространственные измерения и измерения времени в произвольной системе отсчета. Экспериментальное определение коэффициентов $g_{ik}$ | 192 |
| § 8.9.  | Пространственная геометрия во вращающейся системе отсчета. . . . .  | 195 |
| § 8.10.   | Мировые линии свободных частиц и световых лучей. . . . .  | 197 |
| § 8.11.   | Динамические гравитационные потенциалы. . . . .   | 199 |
| § 8.12.   | Скорость хода движущихся стандартных часов в гравитационном поле. . . . .   | 200 |
| § 8.13.   | Преобразование координат в фиксированной системе отсчета . . . . .  | 201 |
| § 8.14.   | Другие простые примеры ускоренных систем отсчета . . . . .  | 203 |
| § 8.15.   | Жесткие системы отсчета с произвольно движущимся началом. . . . .   | 205 |
| § 8.16.   | Жесткие системы отсчета, движущиеся в направлении оси $X$ . . . . .   | 206 |
| § 8.17.   | Парадокс часов. . . . .   | 208 |
| <b>Глава 9. Неустранимые гравитационные поля. Тензорное исчисление в римановом пространстве общего типа . . . . .</b> |   |     |
| § 9.1.  | Четырехмерная формулировка общего принципа относительности и принципа эквивалентности. . . . .                                      | 213 |
| § 9.2.  | Контравариантные и ковариантные компоненты 4-вектора . . . . .  | 214 |
| § 9.3.  | Тензорная алгебра. . . . .  | 217 |
| § 9.4.  | Псевдотензоры. Дуальные тензоры. . . . .  | 219 |
| § 9.5.  | Геодезические линии. Формулы Кристоффеля . . . . .  | 222 |
| § 9.6.  | Локальные псевдодекартовы координаты и локальные инерциальные системы. . . . .  | 223 |
| § 9.7.  | Параллельный перенос векторов . . . . .   | 229 |
| § 9.8.  | Абсолютная производная. Перенос Ферми—Уолкера. . . . .  | 231 |
| § 9.9.  | Локальные жесткие невращающиеся системы отсчета с произвольно движущимся началом. Прецессия Фоккера . . . . .                       | 233 |
| § 9.10.   | Тензорный анализ. Ковариантное дифференцирование. . . . .   | 238 |
| § 9.11.   | Ковариантное дифференцирование тензорных плотностей. . . . .  | 241 |
| § 9.12.   | Интегральные теоремы. . . . .   | 243 |
| § 9.13.   | Тензор кривизны. . . . .  | 244 |
| § 9.14.   | Свертки тензора кривизны. . . . .   | 246 |
| § 9.15.   | Специальные системы координат в конечной области пространства—времени. . . . .  | 246 |
| § 9.16.   | Калибровочно-инвариантные величины. Стандартные 4-тензоры. . . . .  | 251 |
| <b>Глава 10. Влияние гравитационных полей на физические явления. . . . .</b>  |   |     |
| § 10.1.   | Фундаментальные уравнения механики точки. . . . .   | 263 |
| § 10.2.   | Физическая интерпретация уравнений механики точки. Стандартные уравнения движения. Стандартная одновременность. . . . .             | 265 |
| § 10.3.   | Координатная форма уравнений движения. . . . .  | 271 |
| § 10.4.   | Лагранжева и гамильтонова формы уравнений движения. . . . .   | 275 |
| § 10.5.   | Распространение световых сигналов. Принцип Ферма . . . . .  | 279 |
| § 10.6.   | Распространение световых волн. Фотоны. . . . .  | 283 |
| § 10.7.   | Доплеровский и эйнштейновский сдвиги спектральных линий . . . . .   | 287 |
| § 10.8.   | Механика сплошных сред. . . . .   | 292 |
| § 10.9.   | Уравнения электромагнитного поля. . . . .   | 298 |
| § 10.10.  | Электромагнитные силы и тензор энергии. . . . .   | 300 |
| <b>Глава 11. Основные законы гравитации в общей теории относительности. . . . .</b>                                   |   |     |
| § 11.1.   | Уравнения гравитационного поля и законы механики. . . . .   | 303 |
| § 11.2.   | Линейное приближение слабого поля. . . . .  | 306 |
| § 11.3.   | Простейшие случаи применения линейных уравнений слабого поля . . . . .  | 309 |
| § 11.4.   | Эквивалентные системы координат. Сферическая симметрия. . . . .   | 312 |
| § 11.5.   | Статические системы со сферической симметрией. . . . .  | 313 |
| § 11.6.   | Внешнее решение Шварцшильда. . . . .  | 314 |
| § 11.7.   | Внутреннее решение Шварцшильда для идеальной жидкости. . . . .  | 317 |
| § 11.8.   | Вариационный принцип для гравитационного поля. . . . .  | 321 |
| § 11.9.   | Комплекс энергии—импульса и законы сохранения энергии и импульса для изолированных систем . . . . .                                 | 324 |
| § 11.10.  | Суперпотенциал. Полные энергия и импульс изолированной системы. . . . .   | 328 |
| § 11.11.  | Неизолированные островные системы. Гравитационное излучение. . . . .  | 331 |
| § 11.12.  | Другие формы комплекса энергии—импульса. . . . .  | 338 |
| § 11.13.  | Угловой момент изолированных систем. . . . .  | 342 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Глава 12. Экспериментальная проверка общей теории относительности. Космологические проблемы.</b> | 346 |
| § 12.1. Эйнштейновское, или гравитационное, смещение спектральных линий.                            | 346 |
| § 12.2. Смещение перигелия Меркурия.  | 351 |
| § 12.3. Гравитационное отклонение света.  | 354 |
| § 12.4. Дальнейшие проверки общей теории относительности.   | 356 |
| § 12.5. Космологические модели.   | 361 |
| § 12.6. Вселенная Эйнштейна.  | 362 |
| § 12.7. Вселенная де Ситтера.   | 366 |
| § 12.8. Нестатические модели однородной изотропной Вселенной.                                       | 370 |
| § 12.9. Модели Вселенной, совместимые с ОТО. Вселенная Фридмана.                                    | 374 |
| § 12.10. Соотношения между наблюдаемыми астрономическими величинами.                                | 377 |
| <b>Приложение</b>   | 380 |
| 1. Теорема Гаусса.  | 380 |
| 2. Преобразование 4-плотности тока.   | 381 |
| 3. Плоские волны в однородной изотропной среде.   | 382 |
| 4. Символы Кристоффеля в терминах $\gamma_{\mu\nu}$ , $\gamma_\mu$ , $\chi$ и их производных.       | 382 |
| 5. Условия для плоского пространства.   | 383 |
| 6. Производные от функции $\mathcal{L}$ через $g^{im}$ и $g^{im}$ и выражения для суперпотенциала.  | 384 |
| <b>Список литературы.</b>   | 387 |
| <b>Дополнительный список литературы (составлен научным редактором перевода)</b>                     | 392 |

**Кристиан Мёллер**

**ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

Редактор *Г. П. Паршина*

Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*

Технический редактор *И. Н. Подшеблякин*

Корректор *Е. Д. Рагулина*

Сдано в набор 8/X 1974 г. Подписано к печат и 18/IV 1975 г. Формат 70X108<sup>1/16</sup>.  
 Бумага типографская № 2. Усл. печ. л. 35. Уч.-изд. л. 31,88. Тираж 11000 экз.  
 Зак. изд. 72110. Зак. тип. 1174. Цена 3 р. 54 к.  
 Атомиздат 103031 Москва, К-31, ул. Жданова, 5

---

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома при Государственном комитете  
 Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли  
 Москва, И-41, Б. Переяславская ул., дом 46