

Ч. Мизнер

Гравитация

Том 1

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Ч-11

Ч-11 **Ч. Мизнер**
Гравитация: Том 1 / Ч. Мизнер – М.: Книга по Требованию, 2023. – 478 с.

ISBN 978-5-458-26668-0

ISBN 978-5-458-26668-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редакторов перевода	15
Предисловие авторов к русскому изданию	18
Предисловие авторов	19
От авторов	25

Часть I. Физика пространства-времени

Глава 1. Геометродинамика в кратком изложении	29
§ 1.1. Притча о яблоке	29
§ 1.2. Пространство-время с координатами и без них	32
Дополнение 1.1. Математические обозначения событий, координат и векторов	41
§ 1.3. Невесомость	42
Дополнение 1.2. Вещества, имеющие совершенно различный состав, падают с одним и тем же ускорением («стандартная мировая линия»)	48
§ 1.4. Локально лоренцева геометрия с координатами и без них	50
Дополнение 1.3. Локально лоренцева геометрия и локально эвклидова геометрия (с координатами и без них)	50
§ 1.5. Время	54
Дополнение 1.4. Время сегодня	60
§ 1.6. Кривизна	61
Дополнение 1.5. Как проверить, является ли пространство-время плоским?	67
Дополнение 1.6. Кривизна чего?	68
Дополнение 1.7. Уравнение движения в гравитационном поле и уравнение движения в электромагнитном поле: сходства и различия	70
Дополнение 1.8. Геометрические единицы	71
§ 1.7. Воздействие материи на геометрию	72
Дополнение 1.9. Галилео Галилей	75
Дополнение 1.10. Исаак Ньютон	76
Дополнение 1.11. Альберт Эйнштейн	78

Часть II. Физика в плоском пространстве-времени

Глава 2. Основы специальной теории относительности	83
§ 2.1. Общие замечания	83
§ 2.2. Геометрические объекты	84
§ 2.3. Векторы	85
Дополнение 2.1. Прощай <i>ict!</i>	88
§ 2.4. Метрический тензор	89
§ 2.5. Дифференциальные формы	90
Дополнение 2.2. Упражнения с решениями, в которых используется метрика	96
§ 2.6. Градиенты и производные по направлениям	96
§ 2.7. Координатное представление геометрических объектов	97
Дополнение 2.3. Дифференциалы	100
§ 2.8. Центрифуга и фотон	101
§ 2.9. Преобразования Лоренца	104
Дополнение 2.4. Преобразования Лоренца	105
§ 2.10. Столкновения	107
Глава 3. Электромагнитное поле	109
§ 3.1. Сила Лоренца и тензор электромагнитного поля	109
Дополнение 3.1. Определение поля и предсказание движения по формуле Лоренца	111
§ 3.2. Тензоры в самом общем виде	112
Дополнение 3.2. Метрика на разных языках	116
§ 3.3. Геометрическая точка зрения в сравнении с точкой зрения $3 + 1$	117
§ 3.4. Уравнения Максвелла	119
§ 3.5. Операции над тензорами	121
Дополнение 3.3. Техника «жонглирования индексами»	129
Глава 4. Электромагнетизм и дифференциальные формы	131
§ 4.1. Внешнее исчисление	131
Дополнение 4.1. Дифференциальные формы и внешнее исчисление в кратком изложении	132
§ 4.2. Электромагнитная 2-форма и сила Лоренца	139
Дополнение 4.2. Как абстрагируясь от понятия «сотоводобной структуры» прийти к понятию 2-формы; случай 3-пространства и пространства-времени	143
§ 4.3. Формы позволяют лучше понять электромагнетизм, а электромагнетизм позволяет лучше понять формы	145
Дополнение 4.3. Дуальность 2-форм в пространстве-времени	150
§ 4.4. Поле излучения	151
§ 4.5. Уравнения Максвелла	
§ 4.6. Внешняя производная и замкнутые формы	155
Дополнение 4.4. Последовательность форм и внешних производных	156

§ 4.7. Действие на расстоянии как следствие локального закона	160
Дополнение 4.5. Сравнение и противопоставление метрической структуры и гамильтониана, или «симплектической структуры»	169
Дополнение 4.6. История появления теоремы Стокса	170
 Глава 5. Тензор энергии-импульса и законы сохранения	172
§ 5.1. Предварительные замечания, относящиеся к курсу 1	172
Дополнение 5.1. Резюме главы 5	173
§ 5.2. Трехмерные объемы и определение тензора энергии-импульса	174
Дополнение 5.2. Трехмерные объемы	177
§ 5.3. Компоненты тензора энергии-импульса	179
§ 5.4. Тензор энергии-импульса роя частиц	181
§ 5.5. Тензор энергии-импульса идеальной жидкости	182
§ 5.6. Электромагнитный тензор энергии-импульса	183
§ 5.7. Симметрия тензора энергии-импульса	184
§ 5.8. Сохранение 4-импульса: интегральная формулировка	186
§ 5.9. Сохранение 4-импульса: дифференциальная формулировка	191
Дополнение 5.3. Интегралы по объему, интегралы по поверхности и теорема Гаусса в компонентных обозначениях	191
Дополнение 5.4. I. Любой интеграл есть интеграл от формы. II. Теорема Гаусса на языке форм	194
§ 5.10. Примеры применения уравнения $\nabla \cdot T = 0$	196
Дополнение 5.5. Обзор ньютоновской гидродинамики	198
§ 5.11. Момент импульса	200
Дополнение 5.6. Момент импульса	204
 Глава 6. Ускоренные наблюдатели	207
§ 6.1. Ускоренные наблюдатели могут быть изучены в рамках специальной теории относительности	207
Дополнение 6.1. Общая теория относительности построена на основе специальной теории относительности	208
Дополнение 6.2. Ускоренные наблюдатели (краткое изложение)	208
§ 6.2. Гиперболическое движение	210
§ 6.3. Ограничения на размеры ускоренной системы отсчета	213
§ 6.4. Тетрада, переносимая равномерно ускоренным наблюдателем	215
§ 6.5. Тетрада, переносимая переносом Ферми — Уолкера наблюдателем с произвольным ускорением	216
§ 6.6. Локальная система координат ускоренного наблюдателя	218

Глава 7. Несовместимость теории тяготения и специальной теории относительности 224

- § 7.1. Попытки объединить теорию тяготения и специальную теорию относительности 224
 Дополнение 7.1. Попытка описать гравитацию с помощью поля симметричного тензора в плоском пространстве-времени (решение упражнения 7.3) 229
- § 7.2. Вывод гравитационного красного смещения из закона сохранения энергии 236
- § 7.3. Из гравитационного красного смещения следует кривизна пространства-времени 237
- § 7.4. Обоснование принципа эквивалентности с помощью гравитационного красного смещения 239
- § 7.5. Локально плоское, глобально искривленное пространство-время 240

Часть III. Математическая теория искривленного пространства-времени

Глава 8. Дифференциальная геометрия: общий обзор 245

- § 8.1. Краткий обзор части III 245
 Дополнение 8.1. Книжки по дифференциальной геометрии 246
- § 8.2. Сравнение курса 1 с курсом 2: **различный кругозор, различные возможности** 247
- § 8.3. Геометрия в трех аспектах: на чертежах, в абстрактной форме, в компонентных обозначениях 248
 Дополнение 8.2. Эли Картан 250
 Дополнение 8.3. Три уровня дифференциальной геометрии 251
- § 8.4. Тензорная алгебра в искривленном пространстве-времени 252
 Дополнение 8.4. Тензорная алгебра в фиксированном событии в произвольном базисе 257
- § 8.5. Параллельный перенос, ковариантная производная, коэффициенты связности, геодезические 259
- § 8.6. Локально лоренцевы системы: математическое рассмотрение 271
- § 8.7. Отклонение геодезических и тензор кривизны Римана 273
 Дополнение 8.5. Георг Фридрих Бернхард Риман 277
 Дополнение 8.6. Ковариантное дифференцирование и кривизна: основные соотношения 278

Глава 9. Дифференциальная топология 281

- § 9.1. Геометрические объекты в пространстве-времени без метрики и без геодезических 281
- § 9.2. Результат уточнения понятий «вектора» и «производной по направлению» — понятие «касательного вектора» 282

Дополнение 9.1. Касательные векторы и касательное пространство	286
§ 9.3. Базисы, компоненты и законы преобразования векторов	287
§ 9.4. 1-формы	289
§ 9.5. Тензоры	291
§ 9.6. Коммутаторы и методы наглядного представления	293
Дополнение 9.2. Коммутатор в качестве замыкающего четырехсторонника	297
§ 9.7. Многообразия и дифференциальная топология	298
Глава 10. Аффинная геометрия: геодезические, параллельный перенос и ковариантная производная	303
§ 10.1. Геодезические и принцип эквивалентности	303
Дополнение 10.1. Геодезические	305
§ 10.2. Параллельный перенос и ковариантная производная: наглядное представление	306
Дополнение 10.2. От геодезических к параллельному переносу, от параллельного переноса к ковариантному дифференцированию, от ковариантного дифференцирования к геодезическим	309
§ 10.3. Параллельный перенос и ковариантная производная: абстрактный подход	312
Дополнение 10.3. Ковариантная производная, трактуемая как машина, а коэффициенты связности — как ее компоненты	316
§ 10.4. Параллельный перенос и ковариантная производная: компонентное представление	319
§ 10.5. Уравнение геодезических	325
Глава 11. Отклонение геодезических и кривизна пространства-времени	328
§ 11.1. Кривизна, наконец-то!	328
§ 11.2. Относительное ускорение соседних геодезических	329
Дополнение 11.1. Отклонение геодезических и риманова кривизна в кратком изложении	331
Дополнение 11.2. Отклонение геодезических, представленное в виде стрелки	332
Дополнение 11.3. Отклонение геодезических: как от стрелки перейти ко второй ковариантной производной	333
§ 11.3. Приливные силы тяготения и тензор кривизны Римана	334
Дополнение 11.4. Относительное ускорение пробных частиц: геометрический анализ, выполненный по схеме ньютоновского анализа	337
Дополнение 11.5. Тензор кривизны Римана	339
§ 11.4. Параллельный перенос по замкнутому контуру	341
Дополнение 11.6. Отклонение геодезических и параллельный перенос по замкнутому контуру: два аспекта одного и того же построения	344

Дополнение 11.7. Закон параллельного переноса по замкнутому контуру	345
§ 11.5. Нулевая риманова кривизна эквивалентна тому, что многообразие плоское	347
§ 11.6. Нормальные римановы координаты	349
Глава 12. Теория тяготения Ньютона на языке искривленного пространства-времени	354
§ 12.1. Теория тяготения Ньютона в кратком изложении	354
§ 12.2. Расслоение ньютоновского пространства-времени	356
§ 12.3. Галилеевы системы координат	358
Дополнение 12.1. Отклонение геодезических в ньютоновском пространстве-времени	362
Дополнение 12.2. Пространство-время Ньютона, пространство-время Минковского и пространство-время Эйнштейна: сравнение и противопоставление	363
Дополнение 12.3. Ньютоновское тяготение в формулировке Картана и эйнштейновское тяготение: сравнение и противопоставление	365
§ 12.4. Геометрическая, свободная от координат формулировка теории тяготения Ньютона	366
Дополнение 12.4. Теория тяготения Ньютона: геометрическая формулировка в сравнении с классической формулировкой	368
§ 12.5. Геометрический подход в физике: критика	370
Глава 13. Риманова геометрия: метрика — основа всего	372
§ 13.1. Новые черты геометрии, обусловленные локальной справедливостью специальной теории относительности	372
§ 13.2. Метрика	373
Дополнение 13.1. Как извлечь метрику из расстояний	379
§ 13.3. Соответствие между геодезическими геометрии искривленного пространства-времени и прямыми линиями локально лоренцевой геометрии	381
§ 13.4. Геодезические — мировые линии с экстремальным собственным временем	385
Дополнение 13.2. «Геодезические» и «экстремальные мировые линии»	394
Дополнение 13.3. «Динамический» вариационный принцип для геодезических	394
§ 13.5. Свойства R , обусловленные наличием метрики	396
§ 13.6. Собственная система отсчета ускоренного наблюдателя	399
Глава 14. Вычисление кривизны	407
§ 14.1. Кривизна — инструмент, который дает возможность понять физику	407
Дополнение 14.1. Ретроспективный взгляд на кривизну	409

Дополнение 14.2. Непосредственное вычисление кривизны (иллюстрируемое на примере глобуса)	414
Дополнение 14.3. Аналитические преобразования с помощью вычислительных машин	416
§ 14.2. Нахождение тензора Эйнштейна	417
§ 14.3. Более эффективные методы расчетов	418
§ 14.4. Метод геодезического лагранжиана	419
Дополнение 14.4. Метод геодезического лагранжиана в некоторых случаях сокращает вычисление кривизны	421
§ 14.5. 2-формы кривизны	423
§ 14.6. Вычисление кривизны с помощью внешних дифференциальных форм	430
Дополнение 14.5. Вычисление кривизны с помощью внешних дифференциальных форм (метрика космологической модели Фридмана)	437
Глава 15. Тожества Бианки и граница границы	441
§ 15.1. Кратко о тождествах Бианки	441
Дополнение 15.1. Граница границы равна нулю	442
§ 15.2. Тожество Бианки $d\mathcal{R} \equiv 0$ — проявление того, что «граница границы = 0»	448
§ 15.3. Момент поворота: ключ к пониманию свернутого тождества Бианки	450
§ 15.4. Нахождение момента поворота	451
§ 15.5. Сохранение момента поворота с точки зрения принципа «граница границы равна нулю»	454
§ 15.6. Сохранение момента поворота, выраженное в дифференциальной форме	455
Дополнение 15.2. Источник гравитации и момент поворота — две основные величины; их наиболее удобные математические представления	456
§ 15.7. От сохранения момента поворота к эйнштейновской геометродинамике: предварительный экскурс	457
Дополнение 15.3. Другие тождества, которым удовлетворяет кривизна	460
Литература	462
Предметный указатель	470

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРОВ ПЕРЕВОДА

Авторы предлагаемого вниманию читателей трехтомника «Гравитация» не нуждаются в специальном представлении советскому читателю. Профессор Мэрилендского университета Чарлз Мизнер, профессор Калифорнийского технологического института Кип Торн и профессор Принстонского университета Джон Арчибалд Уилер являются авторами многих замечательных книг, переведенных на русский язык, хорошо известных и быстро ставших библиографической редкостью. Они представляют разные поколения физиков-теоретиков, и каждый из них внес выдающийся вклад в физику и специально в теорию тяготения. Авторы являются основателями научных школ, и большая доля всех наших знаний по современной теории тяготения, по структуре пространства-времени связана с их именами и именами их учеников.

Монография «Гравитация» представляет собой уникальный труд, отличающийся во многих отношениях от известных книг по проблемам тяготения. Она соединяет в себе качества учебного пособия и обширного обзора по гравитационной физике (общей теории относительности Эйнштейна, или «геометродинамике»). Прежде всего это учебник, написанный весьма строго и последовательно. Но в отличие от обычных учебников, изложение ведется весьма образным, живым языком, с ясным выделением физических и математических идей, лежащих в основе излагаемого материала. Этот стиль определил и необычное построение монографии. Она по существу включает в себя два учебных пособия, совмещенных в одном издании. Первое пособие (курс 1) является учебником, в котором излагается современное состояние общей теории относительности, однако без углубления в важные и интересные, но все же более специальные вопросы. Эти вопросы освещаются во втором пособии (курс 2). Оба пособия

«перемешаны». Параграфы, относящиеся ко второму пособию, появляются по мере необходимости среди параграфов первого пособия. Это нисколько не затрудняет читателю пользование книгой, так как каждая страница первого пособия помечена цифрой 1 в верхнем углу, а каждая страница второго — цифрой 2. Читатель по желанию может знакомиться с общими вопросами, изложенными в первом учебнике, и углубляться в детали во втором. Для работы с первым учебником достаточно знания векторного анализа и простых уравнений в частных производных. Работа со вторым (кроме некоторых мест) требует прочтения только предыдущих параграфов первого учебника.

Читатель может начинать изучение книги, практически ничего не зная о теории относительности. Проработав все издание, он сможет не только разбираться в современных статьях по гравитации, но и самостоятельно начать работать в этой области. Развитию практических и исследовательских навыков способствуют упражнения, часть которых являются целыми исследовательскими работами.

Вся монография разбита на 44 главы, объединенных в 10 больших частей. Первые четыре части представляют собой современное изложение аппарата и методов как специальной теории относительности (теории плоского пространства-времени), так и общей теории относительности (геометродинамики). Последующие шесть частей («Релятивистские звезды», «Вселенная», «Гравитационный коллапс и черные дыры», «Гравитационные волны», «Экспериментальная проверка общей теории относительности», «Границы») содержат описание конкретных результатов теории Эйнштейна в изучении физики сильных гравитационных полей и протекающих в них физических процессов.

В издании на русском языке монография выходит в трех томах. Настоящий первый том включает части I — III монографии (главы 1—15), в которых содержится обзор основных идей современной теории тяготения (часть I), теория плоского пространства-времени (часть II) и математические основы теории искривленного пространства-времени (часть III). Второй том содержит части IV—VI. В них излагается теория тяготения Эйнштейна, теория релятивистских звезд и математические основы космологии. Наконец, третий том (части VII—X) содержит теорию гравитационного коллапса, теорию гравитационных волн, описание экспериментов по проверке теории тяготения и некоторые математические обобщения.

В литературе уже неоднократно отмечалась изумительная красота общей теории относительности. Новейшие глубокие результаты теории, касающиеся природы пространства-времени, его топологической структуры, процессов в окрестности «черных дыр» и вблизи сингулярностей, добавляют новые яркие краски к этому величайшему созданию теоретической мысли. Мастерское изложение этих результатов авторами монографии