

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

ВВЕДЕНИЕ В ОБЩУЮ ТЕОРИЮ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ, ЕЕ СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Рекомендовано методическим советом УрФУ
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся
по программам бакалавриата и магистратуры
по направлению подготовки 03.03.02, 03.04.02 «Физика»,
по специальности 03.05.01 «Астрономия»

2-е издание, стереотипное

Москва
Издательство «ФЛИНТА»
Издательство Уральского университета
2017

УДК 530.12:531.51(075.8)

В24

Авторы:

С. О. Алексеев, Е. А. Памятных, А. В. Урсулов,
Д. А. Третьякова, К. А. Ранну

Рецензенты:

кафедра теоретической физики Челябинского государственного университета (заведующий кафедрой доктор физико-математических наук, профессор А. Е. Дудоров);

А. А. Шацкий, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Астрономического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Научный редактор:

С. О. Алексеев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ

Введение в общую теорию относительности, ее современное развитие и приложения [Электронный ресурс]: [учеб. пособие] / С.О. Алексеев, Е. А. Памятных, А. В. Урсулов, Д. А. Третьякова, К.А. Ранну; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – 2-е изд., стер. – М. : ФЛИНТА : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 380 с.

ISBN 978-5-9765-2612-9 (ФЛИНТА)

ISBN 978-5-7996-1584-0 (Изд-во Урал. ун-та)

Изложены основы общей теории относительности, дано введение в ее современное развитие и состояние. Достаточно полно, но без перегрузки деталями излагается необходимый математический аппарат. Обсуждаются основные принципы и следствия теории, ее экспериментальный и наблюдательный статус. Дано представление о современном состоянии общей теории относительности и ее приложениях к астрофизике, физике черных дыр, космологии. Обсуждаются возможные расширения теории и способы их экспериментальной проверки.

Для студентов, специализирующихся по теоретической физике, астрофизике и астрономии, аспирантов, молодых преподавателей, а также для всех, кто интересуется проблемами и достижениями теории гравитации.

При оформлении обложки использована гравюра анонимного автора («Гравюра Фламариона», 1888 г.).

ISBN 978-5-9765-2612-9 (ФЛИНТА)

ISBN 978-5-7996-1584-0 (Изд-во Урал. ун-та)

© Уральский федеральный университет, 2015

Оглавление

| | |
|--|-----|
| Список основных сокращений | 5 |
| Предисловие | 6 |
| Глава 1. Физические основы ОТО | 13 |
| 1.1 Ньютоновская теория гравитации | 13 |
| 1.2 Физические основы ОТО | 19 |
| Глава 2. Элементы математического аппарата ОТО | 26 |
| 2.1 Тензоры | 26 |
| 2.2 Тензорная алгебра | 32 |
| 2.3 Ковариантное дифференцирование. Связность | 39 |
| 2.4 Параллельный перенос. Геодезическая | 47 |
| 2.5 Тензор кривизны | 61 |
| 2.6 Метрический тензор | 70 |
| 2.7 Кривизна римановых пространств | 80 |
| Глава 3. Частицы в гравитационном поле | 91 |
| 3.1 Расстояния и промежутки времени в ОТО | 91 |
| 3.2 Движение частицы в гравитационном поле | 96 |
| 3.3 Слабое гравитационное поле. Ньютоновский предел | 98 |
| 3.4 Постоянное гравитационное поле | 100 |
| 3.5 Распространение света в постоянном гравитационном поле. Гравитационное смещение спектральных линий | 103 |
| Глава 4. Уравнения гравитационного поля | 107 |
| 4.1 Уравнения Эйнштейна | 107 |
| 4.2 Уравнения Эйнштейна и вариационный принцип | 116 |
| 4.3 Тензор энергии-импульса | 121 |
| 4.4 Ньютоновский предел | 127 |
| 4.5 Космологическая постоянная | 132 |
| 4.6 Законы сохранения | 136 |
| Глава 5. Гравитационные волны | 143 |
| 5.1 Слабые гравитационные поля в отсутствие источников. Гравитационные волны | 143 |
| 5.2 Плоские гравитационные волны. Поляризация гравитационных волн | 146 |
| 5.3 Поиски гравитационных волн | 151 |
| Глава 6. Центральное-симметричное гравитационное поле | 155 |
| 6.1 Решение Шварцшильда | 155 |
| 6.2 Движение частиц в центральное-симметричном гравитационном поле. Смещение перигелия орбит планет | 164 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 6.3 | Распространение лучей света в центрально-симметричном гравитационном поле. Гравитационное отклонение лучей света | 172 |
| 6.4 | Радиальное движение частиц и света в центрально-симметричном гравитационном поле. Черные дыры | 179 |
| 6.5 | Гравитационный коллапс | 189 |
| Глава 7. | Физика черных дыр | 198 |
| 7.1 | Классификация черных дыр | 198 |
| 7.2 | Законы термодинамики черных дыр | 200 |
| 7.3 | Испарение черных дыр | 204 |
| 7.4 | Информационный парадокс | 213 |
| Глава 8. | Космология | 217 |
| 8.1 | Наблюдательные основы космологии | 218 |
| 8.2 | Метрика Фридмана — Робертсона — Уокера | 229 |
| 8.3 | Модели расширяющейся Вселенной | 236 |
| 8.4 | Теоретические основы современной космологии | 248 |
| 8.5 | Нерешенные проблемы современной космологии | 259 |
| Глава 9. | Наблюдательный статус ОТО | 265 |
| 9.1 | Параметризованный постньютоновский формализм | 265 |
| 9.2 | Современные подтверждения ОТО | 286 |
| 9.3 | Нерешенные проблемы | 292 |
| 9.4 | Необходимость расширения ОТО | 295 |
| Глава 10. | Расширенные теории гравитации | 297 |
| 10.1 | Теория Бранса — Дикке | 298 |
| 10.2 | Модифицированная ньютоновская динамика | 315 |
| 10.3 | Гравитационные теории $f(R)$ | 318 |
| 10.4 | Скалярно-тензорные теории | 327 |
| 10.5 | Квантовые теории | 331 |
| 10.6 | Космологические расширения | 344 |
| | Заключение | 351 |
| | Список библиографических ссылок | 353 |
| | Список рекомендуемой литературы | 370 |