

БАКАЛАВР • МАГИСТР



С. Н. Вергелес

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

## ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

УЧЕБНИК

2-е издание



СООТВЕТСТВУЕТ  
ПРОГРАММАМ  
ВЕДУЩИХ НАУЧНО-  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
ШКОЛ

УМО ВО рекомендует

**Юрайт**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО  
biblio-online.ru

С. Н. Вергелес

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

УЧЕБНИК ДЛЯ БАКАЛАВРИАТА И МАГИСТРАТУРЫ

2-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по естественнонаучным направлениям*

Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)

Москва ■ Юрайт ■ 2017

УДК 530.12(075.8)

ББК 22.31я73

В31

**Автор:**

**Вергелес Сергей Никитович** — доцент, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики Московского физико-технического института (государственного университета), научный сотрудник Института теоретической физики имени Л. Д. Ландау Российской академии наук.

**Рецензенты:**

*Мальцев А. Я.* — доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук;

*Гриневиц П. Г.* — доктор физико-математических наук.

**Вергелес, С. Н.**

**В31** Теоретическая физика. Общая теория относительности : учебник для бакалавриата и магистратуры / С. Н. Вергелес. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 190 с. — Серия : Бакалавр и магистр. Академический курс.

ISBN 978-5-534-03243-7

В учебнике приведены необходимые сведения из дифференциальной геометрии на современном математическом языке. Изложены основы теории многообразий, теории тензорных полей, язык внешних дифференциальных форм, теорема Стокса, понятия римановой и псевдоримановой метрики, основы подхода с использованием подвижных реперов, вводятся понятия геодезических линий, параллельного переноса, тензоров кривизны и кручения. Изложена общая теория относительности, включая движение частицы в гравитационном поле, движение материи и тензор энергии-импульса, даны выводы уравнений Эйнштейна и из функционала Гильберта, обсуждается процесс излучения гравитационных волн, выведено и проанализировано решение Шварцшильда. Приведены космологические модели, включая инфляционные, и их следствия.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

*Учебник предназначен студентам высших учебных заведений, аспирантам и преподавателям, а также всем интересующимся.*

УДК 530.12(075.8)

ББК 22.31я73



*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».*

© Вергелес С. Н., 2014

© Вергелес С. Н., 2017, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

ISBN 978-5-534-03243-7

## Оглавление

Предисловие .....	6
-------------------	---

### Часть I

#### ВВЕДЕНИЕ В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНУЮ ГЕОМЕТРИЮ

<b>Глава 1. Тензорный анализ .....</b>	<b>11</b>
1.1. Многообразия .....	11
1.2. Векторы на многообразии .....	16
1.3. Тензоры и тензорные поля .....	22
1.3.1. Определение тензоров .....	22
1.3.2. Операции над тензорами .....	22
1.3.3. Тензорное произведение линейных пространств .....	26
1.4. Дифференциальные формы .....	27
1.5. Дифференцирование и интегрирование форм .....	32
1.5.1. Внешнее дифференцирование форм .....	32
1.5.2. Интегрирование форм. Теорема Стокса .....	36
<b>Глава 2. Элементы дифференциальной геометрии .....</b>	<b>44</b>
2.1. Ковариантное дифференцирование и метрика на многообразии .....	44
2.1.1. Ковариантное дифференцирование и связность .....	44
2.1.2. Метризованные пространства .....	50
2.1.3. Ортонормированные базисы .....	52
2.1.4. Связность, согласованная с метрикой .....	53
2.2. Тензоры кривизны и кручения .....	56
2.2.1. Определение параллельного переноса векторов .....	56
2.2.2. Геодезические линии .....	57
2.2.3. Тензор кривизны .....	58
2.2.4. Тензор кручения .....	62
2.2.5. Структурные уравнения Картана и тождества Бианки .....	64
2.3. Явные выражения для коэффициентов связности. Нормальные координаты Римана .....	67
2.3.1. Явные выражения для коэффициентов связности .....	67
2.3.2. Ковариантная дивергенция. Оператор д'Аламбера .....	69
2.3.3. Нормальные координаты Римана .....	73

## Часть II ГЕОМЕТРОДИНАМИКА

<b>Глава 3. Основные уравнения общей теории относительности .....</b>	<b>81</b>
3.1. Введение. Движение свободной частицы .....	81
3.1.1. Ключевые идеи общей теории относительности .....	81
3.1.2. Движение частицы в гравитационном поле .....	86
3.1.3. Ньютоновский предел.....	90
3.1.4. Изменение частоты света, связанное с гравитационным полем.....	91
3.2. Тензор энергии-импульса материи .....	94
3.2.1. Определение тензора энергии-импульса.....	94
3.2.2. Уравнения движения материи в случае электромагнитного взаимодействия.....	96
3.2.3. Закон «сохранения» для тензора энергии-импульса .....	98
3.2.4. Уравнение движения релятивистской жидкости.....	101
3.3. Уравнение Эйнштейна .....	104
3.3.1. Физический вывод Эйнштейна .....	105
3.3.2. Вывод Гильберта.....	108
3.3.3. Возможны ли другие варианты теории?.....	114
3.3.4. Теория гравитации с А-членом.....	115
3.4. Задача Коши. Псевдотензор энергии-импульса. Гармонические координаты.....	116
3.4.1. Задача Коши .....	116
3.4.2. Закон сохранения энергии-импульса .....	119
3.4.3. Гармонические координаты .....	123
<b>Глава 4. Следствия из общей теории относительности .....</b>	<b>127</b>
4.1. Гравитационное излучение .....	127
4.1.1. Слабое гравитационное поле .....	127
4.1.2. Случай плоской волны .....	130
4.1.3. Излучение гравитационных волн .....	134
4.1.4. О методике регистрации гравитационных волн .....	138
4.2. Центральное-симметричное гравитационное поле .....	142
4.2.1. Решение Шварцшильда.....	142
4.2.2. Координаты Крускала.....	149
4.2.3. О возможности возникновения черных дыр в результате эволюции.....	154
4.2.4. Движение в центральное-симметричном поле.....	157
4.3. Применение общей теории относительности к космологии.....	161
4.3.1. Геометрия однородных и изотропных пространств .....	161

4.3.2. Включение времени и решение Фридмана.....	167
4.3.3. Космологические следствия .....	174
4.3.4. Оценки средней плотности материи во Вселенной.....	178
4.3.5. Режим экспоненциального расширения Вселенной.....	180
4.3.6. Противоречия классических моделей Фридмана .....	185
<b>Рекомендуемая литература .....</b>	<b>188</b>
<b>Новые издания по дисциплине «Теоретическая физика» и смежным дисциплинам.....</b>	<b>189</b>
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>190</b>