

М. Л. Фильченков
Ю. П. Лаптев

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

*ОТ МИКРОМИРА
К МЕГАМИРУ*

- Уровни квантования
в теории гравитации
- Квантовая теория
гравитационно-
связанных систем
- Квантовая теория поля
в искривлённом
пространстве-времени



URSS

М. Л. Фильченков, Ю. П. Лаптев

КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ

***ОТ МИКРОМИРА
К МЕГАМИРУ***



URSS
МОСКВА

ББК 22.312 22.314 22.315 22.6

**Фильченков Михаил Леонидович,
Лаптев Юрий Павлович**

Квантовая гравитация: От микромира к мегамиру.
М.: ЛЕНАНД, 2016. — 304 с.

Впервые на русском языке систематически изложены различные подходы к квантованию гравитации. Книга содержит обзор, в котором охарактеризованы уровни квантования в теории гравитации (квантовая механика и квантовая теория поля в искривлённом пространстве-времени, квантование гравитационного поля и геометрии). Основное внимание уделено квантованию гравитационно-связанных систем — компактных астрофизических объектов (первичные черные дыры, захватившие микрочастицы, квантовые системы с нейтрино, гравитационный коллапс) и космологических моделей ранней Вселенной (изотропные, анизотропные и полевые модели). Книга также содержит справочный материал по общей теории относительности и квантовой теории. В заключительной главе проанализированы общие свойства гравитационно-связанных систем на различных уровнях квантования.

Книга предназначена для специалистов по гравитации, а также для аспирантов и студентов физических вузов.

Рецензент:

вице-президент Российского гравитационного общества,
д-р физ.-мат. наук, проф. *Ю. С. Владимиров*

ООО «ЛЕНАНД», 117312, г. Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, д. 11А, стр. 11.
Формат 60×90/16. Печ. л. 19. Зак. № 853.

Отпечатано в ООО «Курганский Дом печати».
640022, Курган, ул. К. Маркса, 106.

ISBN 978–5–9710–3641–8

© ЛЕНАНД, 2016

17908 ID 218057



9

785971 036418

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	
	E-mail: URSS@URSS.ru
	Каталог изданий в Интернете: http://URSS.ru
	Тел./факс (многоканальный): + 7 (499) 724 25 45
	URSS

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.

Оглавление

Предисловие	9
Глава 1. Уровни квантования в теории гравитации	15
1.1 Классификация физических теорий	15
1.2 Квантовая механика в гравитационном поле	20
1.2.1 Нерелятивистская квантовая механика в заданном слабом гравитационном поле . .	21
1.2.2 Квантовая механика с учётом релятивистских поправок	24
1.2.3 Уравнения Шрёдингера–Ньютона	25
1.3 Квантовая теория поля в искривлённом пространстве-времени	26
1.3.1 Эффективная температура вакуума и частиц	26
1.3.2 Рождение частиц в ранней Вселенной	27
1.4 Квантование гравитационного поля и искривлённого пространства-времени	28
1.4.1 Квантование слабого гравитационного поля	29
1.4.2 Суперсимметрия, супергравитация и суперструны	30
1.4.3 Квантовая геометродинамика, петлевая квантовая гравитация	32
1.5 Выводы	34

Глава 2. Общая теория относительности	37
2.1 Основные принципы	
общей теории относительности	37
2.2 Связь общей теории относительности со	
специальной и с ньютоновской теорией гравитации	39
2.3 Уравнения гравитационного поля.	
Уравнения геодезических	41
2.4 Центральнo-симметричные	
и аксиально-симметричные решения	44
2.4.1 Центральнo-симметричные метрики	45
2.4.2 Движение заряженных частиц	
в центральнo-симметричном поле	49
2.4.3 Аксиально-симметричные метрики	51
2.5 Классические гравитационные эффекты.	
Гравитационные линзы. Гравитационные волны . .	52
2.5.1 Классические эффекты ОТО	53
2.5.2 Гравитационные линзы	55
2.5.3 Гравитационные волны	56
2.6 Космологические решения	59
2.6.1 Однородные изотропные модели	59
2.6.2 Пространство постоянной кривизны	64
2.6.3 Однородные анизотропные модели	67
2.6.4 Параметры анизотропии	
пространства-времени, выведенные	
из наблюдательной космологии	71
2.7 Выводы	76
 Глава 3. Квантовая теория	 77
3.1 Старая квантовая теория	78
3.1.1 Кванты М. Планка. Кванты света	
А. Эйнштейна. Атом Н. Бора	78
3.1.2 Волны Л. де Бройля. Волновой пакет	81
3.2 Основные принципы квантовой механики	83

3.2.1	Уравнение Шрёдингера. Стационарные состояния	83
3.2.2	Свойства волновых функций. Редукция волнового пакета	85
3.2.3	Свойства операторов. Соотношение неопределённостей. Теорема П. Эренфеста	87
3.3	Точные решения стационарного уравнения Шрёдингера	90
3.3.1	Одномерные решения	91
3.3.2	Гармонический осциллятор	91
3.3.3	Движение микрочастицы в однородном поле	92
3.3.4	Кеплерова задача	94
3.4	Приближённые методы квантовой механики	98
3.4.1	Квазиклассическое приближение	98
3.4.2	Золотое правило Ферми	103
3.5	Релятивистская квантовая механика	103
3.5.1	Дуализм частица – поле	104
3.5.2	Уравнение Дирака	108
3.5.3	Квантовая теория излучения	113
3.6	Современное состояние квантовой теории	119
3.6.1	Интерпретации и формулировки квантовой механики	120
3.6.2	Мысленный эксперимент Эйнштейна–Подольского–Розена	123
3.6.3	Неравенства Белла. Скрытые параметры	125
3.6.4	Квантовая телепортация	126
3.7	Выводы	127
Глава 4. Гравитом		131
4.1	Квантовая механика заряда в поле Шварцшильда	132
4.2	Объекты нового типа – гравитономы	134

4.2.1	Условия существования гравиатомов	134
4.2.2	Квантовая аккреция барионов на минидыры	137
4.2.3	Гравиатомы с учётом релятивистских поправок	141
4.2.4	Излучение гравиатомов	144
4.2.5	Атом водорода с учётом гравитационного взаимодействия	149
4.3	Гравитационно-связанные системы с нейтрино . . .	151
4.3.1	Гравиатомы с нейтрино	152
4.3.2	Макротела, захватывающие нейтрино на квантовые уровни	153
4.4	Выводы	158
Глава 5. Непертурбативная квантовая космология		161
5.1	Квантовая геометродинамика в минисуперпространстве	162
5.2	Изотропные квантовые модели с идеальной жидкостью	164
5.2.1	Многокомпонентные модели	164
5.2.2	Осцилляторное и водородоподобное решения	166
5.2.3	Рождение Вселенной из деситтеровского вакуума	170
5.2.4	Оценка параметров квантовой космологической модели	171
5.2.5	Неинвариантность уравнения Уилера–ДеВит- та относительно временной калибровки . . .	174
5.2.6	Поправки к квантовой геометродинамике, учи- тывающие дискретность пространства	176
5.3	Анизотропные квантовые модели с идеальной жидкостью	179
5.3.1	Гамильтонова связь для уравнения Райчаудури	180

5.3.2	Многокомпонентная квазифридмановская модель	181
5.3.3	Двухкомпонентная вакуумно-пылевая модель	186
5.3.4	Связь между классическими и квантовыми космологическими решениями	188
5.4	Полевые квантовые модели	193
5.4.1	Модели со скалярным полем	193
5.4.2	Модели со спинорным полем	195
5.4.3	Модели с взаимодействующими полями . .	197
5.4.4	Модели с газом Чаплыгина	199
5.5	Выводы	201

Глава 6. Квантовый гравитационный коллапс и рождение новой вселенной

203

6.1	Уравнение Уилера–ДеВитта для метрики Шварцшильда	204
6.2	Квантовый гравитационный коллапс	206
6.3	Рождение новой вселенной	209
6.4	Создание вселенной в лаборатории	211
6.5	Выводы	213

Глава 7. Квантовая теория поля в искривлённом пространстве-времени

215

7.1	Эффективная температура вакуума и частиц	216
7.1.1	Поляризация вакуума в эффекте Казимира и в статическом пространстве де Ситтера .	216
7.1.2	Рождение частиц в эффектах Хокинга и Унру	219
7.1.3	Эффективная температура для метрик Рейсснера–Нордстрёма и Коттлера	222
7.2	Рождение частиц в ранней Вселенной	223
7.2.1	Преобразования Боголюбова	223
7.2.2	Рождение частиц в однородной изотропной Вселенной	225

7.3	Полевые уравнения	
	в искривлённом пространстве-времени	227
7.3.1	Уравнение скалярного поля	228
7.3.2	Уравнение спинорного поля	228
7.3.3	Уравнения электромагнитного поля	229
7.4	Выводы	229

Глава 8. Общие свойства гравитационно-связанных систем на различных уровнях квантования	231
--	------------

8.1	Энергии гравитатома	
	и атома Леметра (квантовой вселенной)	232
8.2	Массы минидыр и частиц	
	в гравитатоме и ранней Вселенной	233
8.3	Вероятность рождения новой вселенной	234
8.4	Интерпретация полученных результатов	235
8.5	Выводы	237

Заключение	239
-------------------	------------

Литература	241
-------------------	------------

Предметный указатель	289
-----------------------------	------------