

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

## «ФИЗИКА»

**Специальность:** «Фундаментальные математика и механика»

**Специализация:** «Фундаментальная математика»

**Квалификация (степень) выпускника:** Математик. Механик.  
**Преподаватель**

**Форма обучения:** Очная  
(очная, очно-заочная и др.)

Москва — 2018

### 1. Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физика» являются овладение основами современной теоретической физики с четким пониманием фундаментальных физических принципов, приобретение способности использовать адекватный математический аппарат для решения конкретных задач.

### 2. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

Дисциплина является обязательной и изучается студентами 5 курса, которые должны уверенно владеть используемым при чтении курса «Физика» математическим аппаратом (изложенным в ранее прослушанных фундаментальных математических курсах): линейная алгебра, дифференциальные уравнения (обыкновенные и в частных производных), дифференциальная геометрия, основы теории групп Ли (включая представления групп  $SO(3)$ ,  $SO(3,1)$  и  $SU(2)$ ), функционального анализа (включая теорию самосопряженных операторов в гильбертовом пространстве); предполагается также знание основ аналитической механики (методы Лагранжа и Гамильтона, уравнение Гамильтона–Якоби).

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины:

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- 1) Знать основы специальной теории относительности (включая релятивистскую механику), классической теории поля (включая электродинамику), квантовой механики и статистической физики.
- 2) Уметь решать задачи, включенные в обязательный список (и аналогичные им), анализировать полученные решения, понимать их физический смысл.
- 3) Владеть соответствующим математическим аппаратом теоретической физики.

### 4. Структура и содержание дисциплины (модуля).

№	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лек	Сем	Сам	Сумм	
1	Преобразования Лоренца. Группа Лоренца и её генераторы.	9	1	2	2	3	7	ДЗТ
2	Релятивистская кинематика.	9	2	2	2	3	7	ДЗТ
3	Динамика релятивистской частицы: вариационный принцип и уравнения Лагранжа.	9	3	2	2	4	8	ДЗТ
4	Уравнения Гамильтона для релятивистской частицы во внешнем поле.	9	4	2	2	3	7	ДЗТ
5	Канонические преобразования. Релятивистское уравнение Гамильтона–Якоби.	9	5	2	2	4	8	ДЗТ

6	Теорема Э. Нётер в механике.	9	6	2	2	3	7	ДЗТ
7	Вариационный принцип и уравнения Лагранжа в теории поля.	9	7	2	2	3	7	ДЗТ
8	Теорема Э. Нётер в теории поля.	9	8	2	2	3	7	ДЗТ
9	Скалярное поле. Калибровочные преобразования.	9	9	2	2	3	7	ДЗТ
10	Электромагнитное поле как абелево калибровочное поле.	9	10	2	2	3	7	ДЗТ
11	Уравнения Максвелла.	9	11	2	2	3	7	ДЗТ
12	Энергия, импульс и момент электромагнитного поля.	9	12	2	2	3	7	ДЗТ
13	Действие системы «поле + частицы». Система уравнений Максвелла–Лоренца.	9	13	2	2	4	8	ДЗТ
14	Закон сохранения энергии-импульса в электродинамике.	9	14	2	2	3	7	ДЗТ
15	Функция Грина волнового уравнения. Поле произвольно движущейся заряженной частицы.	9	15	2	2	4	8	ДЗТ
16	Электромагнитное излучение.	9	16	2	2	3	7	
17	Спектр и поляризация излучения.	9	17	2	2	3	7	ДЗТ
18	Синхротронное излучение.	9	18	2	2	3	7	ДЗТ
	<b>Всего</b>	<b>9</b>		<b>36</b>	<b>36</b>	<b>58</b>	<b>130</b>	<b>Зачет</b>
1	Уравнение Шрёдингера. Волновая функция.	10	1	2	2	4	8	ДЗТ
2	Наблюдаемые и операторы.	10	2	2	2	3	7	ДЗТ
3	Принцип суперпозиции. Соотношение неопределённостей Гейзенберга.	10	3	2	2	3	7	ДЗТ
4	Изменение наблюдаемых со временем.	10	4	2	2	3	7	ДЗТ
5	Гармонический осциллятор.	10	5	2	2	3	7	ДЗТ
6	Оператор момента импульса.	10	6	2	2	3	7	ДЗТ
7	Спин. Уравнение Паули.	10	7	2	2	3	7	ДЗТ
8	Движение в центрально-симметричном поле.	10	8	2	2	3	7	ДЗТ
9	Атом водорода.	10	9	2	2	3	7	ДЗТ
10	Тождественные частицы. Принцип Паули.	10	10	2	2	3	7	ДЗТ
11	Каноническое распределение (распределение Гиббса).	10	11	2	2	3	7	ДЗТ
12	Термодинамические параметры и потенциалы.	10	12	2	2	3	7	ДЗТ
13	Идеальный классический газ. Распределение Больцмана.	10	13	2	2	3	7	ДЗТ
14	Распределение Гиббса с переменным числом частиц.	10	14	2	2	3	7	ДЗТ
15	Распределение Ферми–Дирака. Идеальный ферми-газ.	10	15	2	2	4	8	ДЗТ

16	Распределение Бозе–Эйнштейна. Идеальный бозе-газ.	10	16	2	2	4	8	ДЗТ
17	Распределение Планка. Фотонный газ.	10	17	2	2	3	7	ДЗТ
	<b>Всего</b>	<b>10</b>		<b>34</b>	<b>34</b>	<b>54</b>	<b>122</b>	<b>Экзамен</b>
	<b>Итого</b>	<b>9, 10</b>		<b>70</b>	<b>70</b>	<b>112</b>	<b>252</b>	

(ДЗТ — домашнее задание с последующей проверкой в виде минитестов)

### 5. Образовательные технологии:

преподавание дисциплины в форме авторского курса по программе, составленной на основе результатов исследований научных школ МГУ;

дискуссии на семинарских занятиях по ключевым проблемам курса, детальный анализ физического смысла решаемых задач из обязательного списка.

### 6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

(с примерами оценочных средств)

Решение задач из обязательного списка на семинарах; домашние задания, включающие некоторые обобщения обязательных задач, с указанием дополнительной литературы; минитесты — краткие ответы на ключевые вопросы по курсу во время семинаров (определение основных понятий, запись фундаментальных уравнений и формул).

*Список обязательных задач (9 семестр: основы специальной теории относительности и классической теории поля)*

1. Найти явный вид генераторов группы Лоренца.
2. Используя преобразование Лоренца для 4-скорости, найти закон преобразования 3-скорости частицы. Направление скорости второй системы отсчета относительно первой произвольно. Вывести закон сложения быстрот, выражающий теорему косинусов в пространстве Лобачевского.
3. Показать, что 4-ускорение — пространственноподобный 4-вектор, и выразить его компоненты через 3-ускорение и 3-скорость. Найти закон преобразования 3-ускорения. Направление скорости второй системы отсчета относительно первой произвольно.
4. Релятивистская частица движется по прямой с ускорением, которое постоянно в собственной системе отсчета. Найти скорость и координату частицы как функции времени в лабораторной системе отсчета.
5. Найти закон движения и уравнение траектории релятивистской заряженной частицы в постоянном однородном электрическом поле, получить асимптотики координат и компонент скорости частицы при малых и больших значениях времени.
6. Найти закон движения и уравнение траектории релятивистской заряженной частицы в постоянном однородном магнитном поле.
7. Найти закон движения и уравнение траектории релятивистской заряженной частицы в кулоновом поле.
8. По теореме Нётер найти энергию и импульс комплексного скалярного поля.
9. По теореме Нётер найти момент импульса комплексного скалярного поля.
10. По теореме Нётер найти заряд комплексного скалярного поля, связанный с инвариантностью лагранжиана относительно калибровочных преобразований. Показать

прямым вычислением, что производная заряда по времени обращается в нуль на решениях уравнений движения.

11. Записать систему уравнений Гамильтона для вещественного скалярного поля и показать её эквивалентность уравнению Лагранжа.

12. Вывести преобразования Лоренца для напряженностей электромагнитного поля.

13. Найти электромагнитное поле равномерно заряженной прямолинейной бесконечной нити.

14. Найти электромагнитное поле неподвижного равномерно заряженного шара, в котором вырезана сферическая полость.

15. Найти магнитное поле бесконечного прямого цилиндрического проводника с постоянным током.

16. Найти электромагнитное поле равномерно движущейся заряженной частицы, используя преобразование Лоренца из системы покоя частицы.

17. Найти электромагнитное поле равномерно движущейся заряженной частицы, интегрируя уравнения Максвелла.

18. Используя калибровочные преобразования, показать, что 4-потенциал электромагнитного поля без источников имеет только две независимые компоненты, а уравнения Максвелла без источников имеют решения в виде плоских электромагнитных волн.

19. Найти мощность излучения заряженной релятивистской частицы, движущейся в постоянном однородном электрическом поле.

20. Найти мощность излучения заряженной релятивистской частицы, движущейся в постоянном однородном магнитном поле.

*Список обязательных задач (10 семестр: основы квантовой механики и статистической физики)*

1. Волновая функция свободной частицы при  $t = 0$  имеет вид:  $\psi(0, x) = A \exp(-x^2/2a^2 + ik_0 x)$ .

Используя уравнения эволюции для средних значений наблюдаемых, найти при  $t > 0$  средние значения  $\langle x \rangle$ ,  $\langle p_x \rangle$ ,  $\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle$ ,  $\langle (p_x - \langle p_x \rangle)^2 \rangle$ .

2. Найти коэффициент прохождения частицы через потенциальный барьер

$$U(x) = \begin{cases} U_0 > 0, & x \in [0, a]; \\ 0, & x \notin [0, a]. \end{cases}$$

3. Найти спектр энергии частицы в потенциальной яме

$$U(x) = \begin{cases} -U_0 < 0, & |x| < a; \\ 0, & |x| > a. \end{cases}$$

4. Найти спектр энергии частицы в поле  $U(x) = -g\delta(x)$ ,  $g > 0$ .

5. Найти спектр энергии частицы в поле  $U(x) = -g[\delta(x+a) + \delta(x-a)]$ ,  $g > 0$ .

6. Найти коэффициент отражения частицы от потенциальной ямы (см. задачу 3).

7. Гармонический осциллятор при  $t = 0$  находится в состоянии  $\psi(0, x) = C \exp(-(x-a)^2/2x_0^2 + ik_0 x)$ , где

$x_0 = \sqrt{\hbar/m\omega}$ ,  $a > 0$ ,  $k_0 > 0$ . Найти при  $t > 0$  средние значения  $\langle x \rangle$ ,  $\langle p_x \rangle$ ,  $\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle$ ,  $\langle (p_x - \langle p_x \rangle)^2 \rangle$ .

8. Найти спектр энергии и волновые функции стационарных состояний системы с гамильтонианом

$$\hat{H} = \frac{1}{2m}(\hat{p}_x^2 + \hat{p}_y^2) + \frac{m}{2}\omega^2(x^2 + y^2) + \gamma xy, \quad |\gamma| < m\omega^2.$$

9. В состоянии  $\psi$  с определенными  $L^2$  и  $L_z$ ,  $\hat{L}^2\psi = \hbar^2\ell(\ell+1)\psi$ ,  $\hat{L}_z\psi = \hbar m\psi$ , найти средние значения  $\langle \hat{L}_x \rangle$ ,  $\langle \hat{L}_y \rangle$ ,  $\langle \hat{L}_x \hat{L}_y \rangle$ ,  $\langle \hat{L}_x^2 \rangle$ ,  $\langle \hat{L}_y^2 \rangle$ .
10. В основном состоянии атома водорода найти плотность вероятности различных значений импульса электрона, средние значения его кинетической и потенциальной энергии.
11. Используя уравнение Паули, найти спектр энергии электрона в постоянном однородном магнитном поле  $\mathbf{B} = B\mathbf{e}_z$ , заданном вектор-потенциалом  $\mathbf{A} = xB\mathbf{e}_y$ .
12. Электрон движется в однородном магнитном поле  $\mathbf{B}(t) = (B_0 \cos \omega t, B_0 \sin \omega t, B_1)$ . При  $t = 0$  он находился в состоянии с определенным значением  $S_z = \hbar/2$ . Найти вероятности возможных значений проекции спина на направление  $\mathbf{n} = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha)$  при  $t > 0$ .
13. Найти теплоемкость системы  $N$  независимых частиц, каждая из которых может находиться только на одном из двух уровней энергии  $-\varepsilon_0, \varepsilon_0$ .
14. Найти теплоемкость системы  $N$  независимых осцилляторов частоты  $\omega$  как функцию температуры  $T$ .
15. Квантовая струна эквивалентна системе бесконечного числа независимых осцилляторов с частотами  $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$ . Найти теплоемкость струны как функцию температуры  $T$ .
16. Вычислить большую статистическую сумму для идеального классического газа как функцию температуры  $T$ , объема  $V$  и химического потенциала  $\mu$ . Найти уравнение состояния и теплоемкость системы.
17. Найти химический потенциал  $\mu(T, L^2/N)$  двумерного ( $\varepsilon_p = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m}$ ) идеального квантового газа.
18. Вычислить химический потенциал, давление идеального ультрарелятивистского ферми-газа ( $\varepsilon_p = cp$ ) при  $T = 0$  и средний импульс частицы.
19. Вычислить теплоемкость идеального бозе-газа в области температур  $|T - T_0|/T_0 \ll 1$ .
20. Найти среднее число фотонов, средний импульс фотона, давление и теплоемкость фотонного газа в объеме  $V$  при температуре  $T$ .

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Д. В. Гальцов, Ю. В. Грац, В. Ч. Жуковский. *Классические поля*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991.
2. Д. В. Гальцов. *Теоретическая физика для студентов-математиков*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003.
3. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Теория поля*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
4. А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. Ч. Жуковский. *Квантовая механика*. М.: Наука, 1979.
5. Д. В. Гальцов. *Теоретическая физика для студентов-математиков*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Квантовая механика*. 6-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
7. Л. Д. Фаддеев, О. А. Якубовский. *Лекции по квантовой механике для студентов-математиков*. Л.: Изд-во ЛГУ, 1980.
8. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. *Статистическая физика. Ч. 1*. 5-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.

б) дополнительная литература:

1. В. И. Арнольд. *Математические методы классической механики*. М.: УРСС, 2003.
2. С. П. Новиков, И. А. Тайманов. *Современные геометрические структуры и поля*. М.: МЦНМО, 2005.

3. Ф. А. Березин, М. А. Шубин. *Уравнение Шрёдингера*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983.
4. Л. А. Тахтаджян. *Квантовая механика для математиков*. М. Ижевск: НИЦ РХД, ИИКИ, 2011.
5. И. А. Квасников. *Термодинамика и статистическая физика. Т. 2. Теория равновесных систем*. М.: УРСС, 2002.
6. З. Флюгге. *Задачи по квантовой механике. Т. 1, 2*. М.: Мир, 1974.
7. Р. Кубо. *Статистическая механика*. 3-е изд. М.: УРСС, 2007.
8. Л. де Бройль. *Избранные научные труды. — Т. 2. Квантовая механика и теория света: работы 1934–1951 годов*. М.: МГУП, 2011. — С. 42–204.
9. А. В. Борисов. *Основы квантовой механики*. М.: Изд-во физич. ф-та МГУ, 1999.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

1. ScientificWorkPlace, Maple.
2. <http://dmvn.mexmat.net/physics.php>  
<http://www.thp.uni-koeln.de/alexal/pdf/electrodynamics.pdf>  
[https://mipt.ru/education/chair/theoretical\\_physics/biblio/qm-barabanov.php](https://mipt.ru/education/chair/theoretical_physics/biblio/qm-barabanov.php)  
<https://www.nikhef.nl/~t45/ftip/Ch01-1.pdf>  
<http://theoreticalminimum.com/courses/special-relativity-and-classical-field-theory/2012/spring/lecture-4>  
[https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=lib\\_mono](https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=lib_mono)  
<http://eduardo.physics.illinois.edu/phys582/582-chapter2.pdf>  
<https://arxiv.org/abs/quant-ph/9907069v2>  
<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/statphys.htm>  
<http://theoreticalminimum.com/courses/statistical-mechanics/2013/spring>

## **8. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Для проведения лекционных и семинарских занятий в аудитории предусмотрены: учебная доска большого формата, мел.

Автор: д. ф.-м. н. профессор А. В. Борисов

Программа утверждена на заседании кафедры теоретической физики физического факультета МГУ, протокол № 1 от 03.09.2018.