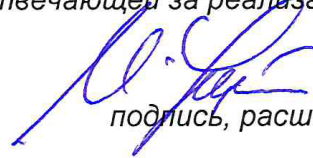


МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
теоретической физики
наименование кафедры, отвечающей за реализацию дисциплины

 (Фролов М.В.)
подпись, расшифровка подписи

. .2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Б1.В.04 – Квантовая механика

Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

14.03.02 – Ядерная физика и технологии

2. Профиль подготовки/специализация: Физика атомного ядра и частиц

3. Квалификация выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная (дневная)

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: 0802 – теоретической физики

6. Составители программы Манаков Николай Леонидович

ФИО

д.ф.-м.н.

профессор

ученая степень

ученое звание

7. Рекомендована: НМС физического факультета от 20.05.2025 г. протокол № 5
(наименование recommending структуры, дата, номер протокола)

8. Учебный год: 2027 — 2028

Семестр(ы)/Триместр(ы): 5–6

9. Цели и задачи учебной дисциплины:

Целью курса является формирование представлений о квантовой теории и ее методах.

Задачи дисциплины: изучить основные положения и уравнения квантовой механики, освоить математический аппарат квантовой механики, изучить основные методы и подходы решения квантовомеханических задач, приобрести навыки решения типовых задач по квантовой механике.

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП: Входит в модуль "Часть, формируемая участниками образовательных отношений" Б1.В. Студенты должны обладать знаниями дисциплин «Математический анализ», «Линейная алгебра», «Обыкновенные дифференциальные уравнения», «Теоретическая механика».

11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ПК-1	Способность использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области	ПК-1.3	Умение проводить изучение и анализ литературных и патентных источников по тематике исследований	знать: основные положения и методы нерелятивистской квантовой механики; уметь: использовать в профессиональной деятельности знания о свойствах микро- и макросистем, а также методах их исследования, применять полученные знания для освоения профильных дисциплин и решения профессиональных задач; Владеть: современным аппаратом теоретической и математической физики, необходимым для решения задач нерелятивистской квантовой механики

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час. (в соответствии с учебным планом) — 6 / 216.

Форма промежуточной аттестации(зачет/экзамен) зачет, зачет с оценкой.

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		5	6	...
Аудиторные занятия	96	68	28	
в том числе:	лекции	48	34	14
	практические	48	34	14
Самостоятельная работа	120	40	80	
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации		Зачет	Зачет с оценкой	
Итого:	216	108	108	

13.1. Содержание дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК*
1. Лекции			
1.1	Основные понятия квантовой механики	Вероятностное описание состояний физических систем. Волновая функция. Физические величины в квантовой механике. Операторы важнейших физических величин. Соотношение неопределённости. Понятие о «сжатых» (когерентных) состояниях. Совместная измеримость физических величин. Уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности. Изменение средних значений физических величин со временем. Интегралы движения. Стационарные состояния. Общее решение нестационарного уравнения Шредингера для гамильтонианов явно независимых от времени. Элементы теории представлений.	-
1.2	Простейшие применения квантовой механики	Частица в прямоугольной потенциальной яме. Линейный гармонический осциллятор. Прохождение и отражение частиц для одномерного движения. Движение частицы в постоянном электрическом поле.	-
1.3	Движение частицы в поле центральных сил	Движение частицы в сферически-симметричном поле (разделение переменных). Интегралы движения в центральном поле. Оператор углового момента (собственные значения). Свободная частица с определенным значением орбитального момента. Частица в бесконечно глубокой сферически-симметричной яме. Движение частицы в кулоновском поле.	-
1.4	Приближенные методы квантовой механики	Квазиклассическое решение 1-мерного уравнения Шредингера (метод Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна). Условия применимости квазиклассического приближения. Правила сопряжения. Правило квантования Бора–Зоммерфельда. Туннельный эффект. Стационарная теория возмущений для изолированного уровня. Стационарная теория возмущений для вырожденных состояний. Вариационный принцип в квантовой теории. Вариационный метод Ритца.	-
1.5	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	Гамильтониан взаимодействия квантовой системы с электромагнитным полем. Вынужденное поглощение и излучение света. Нестационарная теория возмущений: квантовые переходы, золотое правило Ферми. Правила отбора для дипольного излучения.	-
1.6	Элементы квантовой теории рассеяния	Квантовая теория рассеяния: интегральное уравнение на волновую функцию, амплитуда рассеяния. Квантовая теория рассеяния: борновское приближение для амплитуды рассеяния. Условия применимости борновского приближения. Сечение рассеяния на кулоновском потенциале. Метод фаз рассеяния. Эффект	-

		Рамзауера. Резонанс на квазистационарном состоянии.	
1.7	Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц	Принцип тождественности частиц. Симметризация и антисимметризация волновых функций. Принцип Паули. Теория основного состояния атома гелия. Возбужденные состояния атома гелия. Орто- и парагелий. Метод Хартри-Фока.	-
1.8	Основы релятивистской квантовой теории	Уравнение Клейна-Гордона и уравнение Дирака для свободного электрона. Решение уравнения Дирака для свободного электрона. Вывод уравнения Паули из уравнения Дирака. Спин. Спин-орбитальное взаимодействие.	-
2. Практические занятия			
2.1	Основные понятия квантовой механики	Основные понятия теории линейных операторов. Собственные функции, собственные значения, средние. Представления операторов и волновых функций. Стационарные состояния дискретного спектра. Уравнение Шрёдингера в импульсном представлении. Состояния непрерывного спектра.	-
2.2	Простейшие применения квантовой механики	Частица в прямоугольной потенциальной яме. Линейный гармонический осциллятор. Прохождение и отражение частиц для одномерного движения. Движение частицы в постоянном электрическом поле.	-
2.3	Движение частицы в поле центральных сил	Состояния дискретного спектра в центральных полях. Состояния с малой энергией связи. Частица в совместном поле короткодействующего и дальнодействующего потенциалов.	-
2.4	Приближенные методы квантовой механики	Квантование энергетического спектра. Квазиклассические волновые функции, вероятности и средние. Прохождение через потенциальные барьеры. Стационарная теория возмущений (дискретный спектр). Вариационный метод. Стационарная теория возмущений (непрерывный спектр).	-
2.5	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	Нестационарная теория возмущений: квантовые переходы, золотое правило Ферми. Правила отбора для дипольного излучения.	-
2.6	Элементы квантовой теории рассеяния	Борновское приближение. Фазовая теория рассеяния. Низкоэнергетическое рассеяние. Рассеяние быстрых частиц. Рассеяние частиц со спином.	-
2.7	Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц	Симметрия волновых функций. Основы формализма вторичного квантования (представление чисел заполнения).	-
2.8	Основы релятивистской квантовой теории	Уравнение Клейна-Гордона. Уравнение Дирака.	-

* заполняется, если отдельные разделы дисциплины изучаются с помощью онлайн-курса. В колонке Примечание необходимо указать название онлайн-курса или ЭУМК. В других случаях в ячейки ставятся прочерки.

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Основные понятия квантовой механики	4	4		10	18

2	Простейшие применения квантовой механики	8	8		20	36
3	Движение частицы в поле центральных сил	6	6		15	27
4	Приближенные методы квантовой механики	6	6		15	27
5	Теория квантовых переходов под влиянием внешнего возмущения	4	4		10	18
6	Элементы квантовой теории рассеяния	8	8		20	36
7	Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц	6	6		15	27
8	Основы релятивистской квантовой теории	6	6		15	27
	Итого:	48	48		120	216

14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины:

(рекомендации обучающимся по освоению дисциплины: указание наиболее сложных разделов, работа с конспектами лекций, презентационным материалом, рекомендации по выполнению курсовой работы, по организации самостоятельной работы по дисциплине и др.)

Необходимо после каждой лекции по ее теме разбирать и осваивать лекционный материал, для его лучшего понимания читать рекомендованную основную и дополнительную литературу, готовиться к практическому занятию, разбирая соответствующий теоретический материал, систематически выполнять домашние задания, не пропускать текущие тестирования по пройденному теоретическому и практическому материалу.

15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины (список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Давыдов А.С. Квантовая механика : учебное пособие – 3 изд. / А.С. Давыдов .— . СПб: БХВ-Петербург., 2014 .— 704 с.
2	Квантовая теория [Электронный ресурс] : курс лекций : Ч. 1 / [И.В. Копытин, А.С. Корнев, Н.Л. Манаков] . — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2015 .// «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m16-09.pdf
3	Квантовая теория [Электронный ресурс] : курс лекций : Ч. 2 / И.В. Копытин [и др.] . — Воронеж : Издательский дом ВГУ, 2017 .// «Университетская библиотека online» : электронно-библиотечная система. – URL : http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m17-102.pdf

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4	Галицкий В. М. Задачи по квантовой механике : учебное пособие для студ. физ. специальностей вузов : в 2 ч. / В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган .— М. : Едиториал УРСС, 2001.
5	Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики : Учеб. пособие для вузов / Д. И. Блохинцев — 7-е изд., доп. — СПб. : Лань, 2004 .— 664 с,
6	Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике : В 9 вып. : пер. с англ. / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс ; под ред. Я.А. Смородинского .— М. : Эдиториал УРСС, 2004- 52с.

7	Ландау Л.Д. Квантовая механика: Нерелятивистская теория (5-е изд.) / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М.: Физматлит, 2001 — 803 с.
8	Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике: Квантовая механика / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. — М.: Мир, 1966. — Т. 8. — 271 с.
9	Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике: Квантовая механика / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. — М.: Мир, 1967. — Т. 9. — 259 с.
10	Балашов В.В. Курс квантовой механики/ Балашов В.В., Долинов В.К. — Ижевск: РХД, 2001 — 336 с.
11	Базь А.И. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике / А.И. Базь, Я.Б. Зельдович, А.М. Переломов. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.: Наука, 1971. — 544 с.
12	Флюгге З. Задачи по квантовой механике / З.Флюгге; Пер. с англ. Б.А. Лысова; Под ред. А.А. Соколова. — Череповец: Меркурий-Пресс, 2000-Т. 1. — 2000. — 341 с.
13	Флюгге, З. Задачи по квантовой механике / З.Флюгге; Пер. с англ. Б.А.Лысова; Под ред. А.А.Соколова. — Череповец: Меркурий-Пресс, 2000-Т.2. — 2000. — 315 с.
14	Коэн-Таннуджи К. Квантовая механика: В 2 т.: [Учебное пособие] / Клод Коэн-Таннуджи, Бернар Диу, Франк Лалоз; Пер. с фр. Л.Н. Новикова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2000. — Т.1. — 2000. — 941с.
15	Коэн-Таннуджи К. Квантовая механика: В 2 т.: [Учебное пособие] / Клод Коэн-Таннуджи, Бернар Диу, Франк Лалоз; Пер. с англ. Л. Н. Новикова. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2000. — Т.2. — 2000. — 798с.

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)*:

№ п/п	Ресурс
16	http://www.lib.vsu.ru/
17	https://biblioclub.lib.vsu.ru/
18	https://lanbook.lib.vsu.ru/

* Вначале указываются ЭБС, с которыми имеются договора у ВГУ, затем открытые электронно-образовательные ресурсы, онлайн-курсы, ЭУМК

16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных), курсовых работ и др.)

№ п/п	Источник
1	Копытин И.В. Задачи по квантовой механике/ И.В. Копытин, А.С. Корнев— Воронеж, 2004 (в трех частях).

17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ, электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лекционная аудитория, доска, учебная литература.

19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1	Разделы 1.1-1.2, 2.1-2.2	ПК-1	ПК-1.3	контрольная работа 1
2	Разделы 1.3-1.4, 2.3-2.4			контрольная работа 2
3	Разделы 1.5-1.8, 2.5-2.8			текущая аттестация (собеседование)
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет				Список вопросов к зачету
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет с оценкой				Список вопросов к зачету с оценкой

20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

20.1. Текущий контроль успеваемости

Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Контрольная работа 1,2

Пример варианта контрольной работы 1

- Определить какие из нижеперечисленных операторов являются линейными эрмитовыми операторами:
 - оператор сдвига: $T\varphi(x) = \varphi(x + a)$;
 - оператор отражения: $I\varphi(x) = \varphi(-x)$;
 - оператор сопряжения: $S\varphi(x) = \varphi^*(x)$;
 - оператор дифференцирования: $D\varphi(x) = d\varphi(x)/dx$
- Найти собственные функции оператора $f = \alpha x + \beta p$. Найти нормировку этих собственных функций.
- Записать волновую функцию $\varphi(x) = C|x|\exp(-\alpha|x|)$ и оператор сдвига $T\varphi(x) = \varphi(x + a)$ в импульсном представлении.
- Найти связанные состояния в потенциале $U(x) = -\alpha(\delta(x + a) + \delta(x - a))$, $\alpha > 0$.
- Найти коэффициенты отражения и прохождения в потенциале: $U(x) = \{U_0; x > 0, 0 x < 0; \text{ где } U_0 > 0$.
- Вычислите следующие коммутаторы: $[L^2, r^2]$, $[L^2, p^2]$, $[L_i, rp]$.
- Найти спектр и собственные функции плоского ротатора.
- Частица в бесконечно глубокой яме шириной a в начальный момент времени $t = 0$ находится в состоянии $\varphi(x) = A \sin^3(x/a)$. Найти волновую функцию в произвольный момент времени $t > 0$. Является ли временная эволюция волновой функции периодической?

Пример варианта контрольной работы 2

- Используя вариационный принцип Ритца, определить энергию основного состояния частицы в потенциале $U(x) = -\alpha\delta(x)$, $\alpha > 0$. Пробную волновую функцию основного состояния взять в виде: $\varphi(x) = A \exp[-\beta|x|]$; где β – вариационный параметр.
- Определить собственные значения и собственные функции оператора σ_x .
- Найти в первом борновском приближении дифференциальное сечение рассеяния частиц с энергией E на потенциале $U(r) = U_0 \exp(-r/R)$, где U_0 и R – положительные константы.
- На линейный гармонический осциллятор накладывают возмущение

вида: $V(x; t) = \{ \alpha x^2 / |t|, |t| < \tau; 0 |t| > \tau \}$. Определить вероятность перехода между основным и возбужденными состояниями.

Описание технологии проведения

На решение заданий контрольной работы выделяется 2 академических часа. При решении задач студент может пользоваться заранее подготовленными методическими материалами.

Требования к выполнению заданий (или шкалы и критерии оценивания)

Оценка «отлично»: *Подробные и безошибочные решения всех задач, допускаются незначительные вычислительные неточности.*

Оценка «хорошо»: *Подробные решения всех задач, выбор правильного хода решения для всех задач, допускаются вычислительные неточности, а также неполное выполнение отдельных заданий.*

Оценка «удовлетворительно»: *решение отдельных задач, допускаются незначительные неточности в выборе метода и хода решения задачи.*

Оценка «неудовлетворительно» *отсутствие правильно решенных задач, использование ошибочных методов и приемов для решения поставленных задач.*

20.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Список вопросов для проведения зачета

1. Укажите основные свойства волновой функции.
2. Какой физический смысл имеет квадрат модуля волновой функции?
3. Напишите уравнение непрерывности.
4. Напишите нестационарное уравнение Шрёдингера.
5. Напишите оператор кинетической энергии и момента импульса.
6. Если задано состояние $\Psi(x; t)$, напишите определение среднего значения физической величины A в состоянии Ψ .
7. Напишите закон изменения среднего значения физической величины A . В каком случае A есть интеграл движения.
8. Дайте определение стационарного состояния.
9. Напишите спектр линейного гармонического осциллятора (одномерный случай).
10. Напишите условия применимости квазиклассического приближения.
11. Напишите правило квантования Бора-Зоммерфельда.
12. Напишите (с экспоненциальной точностью) вероятность туннелирования частицы через барьер.
13. Какие величины сохраняются в центральном поле.
14. Напишите спектр атома водорода.
15. Напишите выражения для поправок к энергии изолированного уровня в первом и втором порядках теории возмущения.
16. Напишите золотое правило Ферми.
17. Напишите точное выражение для амплитуды рассеяния.
18. В чем состоит борновское приближение в теории рассеяния.

Описание технологии проведения

Зачет проходит в письменной форме. Студенту предлагается 15 вопросов из полного списка вопросов, на которые он должен дать краткий ответ в течение одного академического часа.

Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания

«Зачтено»: даны правильные и полные ответы на 10 и более вопросов, допускаются погрешности, которые студент способен скорректировать под руководством преподавателя

«Не зачтено»: правильные и полные ответы даны на менее, чем 10 вопросов; ответы на вопросы содержат неточности и ошибки, которые студент не способен скорректировать под руководством преподавателя

Список вопросов для проведения зачета с оценкой

1. Вероятностное описание состояний физических систем. Волновая функция.
2. Физические величины в квантовой механике. Операторы важнейших физических величин.
3. Соотношение неопределённости. Понятие о «сжатых» (когерентных) состояниях. Совместная измеримость физических величин.
4. Уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности.
5. Изменение средних значений физических величин со временем. Интегралы движения.
6. Стационарные состояния. Общее решение нестационарного уравнения Шредингера для гамильтонианов явно независимых от времени.
7. Теории представлений: основные понятия.
8. Частица в прямоугольной потенциальной яме.
9. Линейный гармонический осциллятор.
10. Прохождение и отражение частиц для одномерного движения.
11. Движение частицы в постоянном электрическом поле.
12. Движение частицы в сферически-симметричном поле (разделение переменных). Интегралы движения в центральном поле.
13. Оператор углового момента (собственные значения).
14. Свободная частица с определенным значением орбитального момента. Частица в бесконечно глубокой сферически-симметричной яме.
15. Движение частицы в кулоновском поле (дискретный спектр).
16. Движение частицы в кулоновском поле (непрерывный спектр).
17. Квазиклассическое решение 1-мерного уравнения Шредингера (метод Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна). Условия применимости квазиклассического приближения.
18. Правила сопряжения. Правило квантования Бора–Зоммерфельда.
19. Туннельный эффект.
20. Стационарная теория возмущений для изолированного уровня.
21. Стационарная теория возмущений для вырожденных состояний.
22. Вариационный принцип в квантовой теории. Вариационный метод Ритца.
23. Гамильтониан взаимодействия квантовой системы с электромагнитным полем. Вынужденное поглощение и излучение света.
24. Нестационарная теория возмущений: квантовые переходы, золотое правило Ферми. Правила отбора для дипольного излучения.
25. Квантовая теория рассеяния: интегральное уравнение на волновую функцию, амплитуда рассеяния.
26. Квантовая теория рассеяния: борновское приближение для амплитуды рассеяния. Условия применимости борновского приближения.
27. Сечение рассеяния на кулоновском потенциале.
28. Метод фаз рассеяния. Эффект Рамзауэра.
29. Принцип тождественности частиц. Симметризация и антисимметризация волновых функций. Принцип Паули.
30. Теория основного состояния атома гелия.
31. Возбужденные состояния атома гелия. Орто- и парагелий.
32. Уравнение Клейна-Гордона и его решение для свободного электрона.
33. Уравнение Дирака для свободного электрона.
34. Решение уравнения Дирака для свободного электрона.
35. Уравнение Паули. Спин.
36. Спин-орбитальное взаимодействие.

Описание технологии проведения

Зачет с оценкой проходит в устной форме. Студенту предлагается 2 вопроса из полного списка вопросов, на которые он должен дать развернутый ответ в течение одного академического часа. В случае, если студент имеет оценку «неудовлетворительно» по одной из контрольных работ текущей аттестации, ему также предлагается одна из задач из соответствующей контрольной работы.

Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания

«Отлично»: Подробные и безошибочные ответы на основные и дополнительные вопросы, полное понимание и свободное владение материалом, умение решать практические задачи

«Хорошо»: Подробные ответы на поставленные вопросы с мелкими ошибками, незначительные пробелы в знании материала, умение решать практические задачи

«Удовлетворительно»: Неудовлетворительные ответы на один из основных вопросов КИМа и некоторые дополнительные вопросы, неполное знание или понимание материала, низкие навыки решения практических задач

«Неудовлетворительно»: плохое знание материала, неудовлетворительные ответы на вопросы КИМа и большинство дополнительных вопросов, отсутствие навыков решения практических задач