

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (MODERN
PROBLEMS OF CONDENSED MATTER PHYSICS)**

Направление подготовки
(специальность)

[1] 03.04.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
2	4	144	30	30	0		48	0	Э
Итого	4	144	30	30	0	0	48	0	

АННОТАЦИЯ

Представлены основные обзорные данные по эксперименту и теории целого и дробного квантового эффекта Холла, основные результаты исследований по высокотемпературным сверхпроводникам, обзорно рассмотрены основные модели, претендующие на описание механизма притяжения носителей заряда в ВТСП. Рассмотрены основные физические явления, сопровождающие сверхтекучие фазовые переходы в гелии-3 и гелии-4, различие фазовых переходов в трехмерном случае и в низкоразмерных сильнокоррелированных системах, таких как сверхтекучий гелий в одномерных каналах, спиновые цепочки и лестницы и т.д., бозе-конденсация в щелочных металлах. Материал сопровождается обзором истории открытия явлений, библиографическими ссылками, если необходимо, достаточно детальным изложением теоретических представлений, по выборочным темам предлагаются подробно разобранные задачи.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Ознакомление с современными взглядами на актуальные проблемы физики твердого тела, интенсивно развиваемые в последнее время, на вопросы современной теории и эксперимента, на наиболее яркие научные достижения последних 15-20 лет развития физики конденсированного состояния.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Данная дисциплина следует за курсом фазовых переходов. Ожидается, что студенты знакомы с явлениями сверхпроводимости и эффектом Холла в металлах и полупроводниках.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
Проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам	Запланированные этапы исследования; результаты наблюдений и	ПК-20.1 [1] - Способен пользоваться основными теоретическими	3-ПК-20.1[1] - знать основные теоретические модели физики

<p>(этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий.</p>	<p>измерений.</p>	<p>моделями физики конденсированного состояния вещества, взаимодействия излучения с веществом в конденсированном состоянии, моделями фазовых переходов и физики сверхпроводимости, экспериментальными методами исследования структурных и электронных свойств, современными достижениями физики сверхпроводимости, полупроводников и гетероструктур.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003</p>	<p>конденсированного состояния вещества, модели взаимодействия оптического излучения с веществом, классификацию фазовых переходов, основные экспериментальные факты и применения физики сверхпроводимости и криогенной техники, современные достижения физики полупроводников и гетероструктур; У-ПК-20.1[1] - уметь сформулировать теоретическую и математическую модель для изучаемой задачи физики конденсированного состояния вещества, провести необходимые расчеты величин и оценки параметров; В-ПК-20.1[1] - владеть основными теоретическими моделями физики конденсированного состояния вещества, взаимодействия излучения с веществом, физики фазовых переходов и сверхпроводимости</p>
<p>Проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с</p>	<p>Запланированные этапы исследования; результаты наблюдений и измерений.</p>	<p>ПК-2 [1] - Способен критически оценивать применяемые методики и методы исследования</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003</p>	<p>З-ПК-2[1] - Знать методики оценки и выбора методов исследования.; У-ПК-2[1] - Уметь критически оценивать применяемые методики и методы исследования; В-ПК-2[1] - Владеть</p>

<p>утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий.</p>			<p>навыками оценки методов исследования по выбранным критериям.</p>
<p>производственно-технологический</p>			
<p>Участие в модернизации существующих, разработке и внедрении новых методов контроля качества материалов, производственно-технологических процессов и готовой продукции в сфере высоких и наукоемких технологий.</p>	<p>Методы контроля качества материалов, процессов и продукции.</p>	<p>ПК-9 [1] - Способен проводить математическое и компьютерное моделирование объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>З-ПК-9[1] - Знать основные методы и принципы математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области. ; У-ПК-9[1] - Уметь применять методы математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений в избранной предметной области; В-ПК-9[1] - Владеть навыками математического и компьютерного моделирования объектов, систем, процессов и явлений</p>

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>2 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	16/16/0		25	КИ-8	3-ПК-20.1, У-ПК-20.1, В-ПК-20.1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
2	Часть 2	9-15	14/14/0		25	КИ-15	3-ПК-20.1, У-ПК-20.1, В-ПК-20.1, 3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9
	<i>Итого за 2 Семестр</i>		30/30/0		50		
	Контрольные мероприятия за 2 Семестр				50	Э	3-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, 3-ПК-9, У-ПК-9, В-ПК-9, 3-ПК-20.1, У-ПК-20.1, В-ПК-20.1

* – сокращенное наименование формы контроля

** – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек.,	Пр./сем.,	Лаб.,
--------	---------------------------	-------	-----------	-------

		час.	час.	час.
	2 Семестр	30	30	0
1-8	Часть 1	16	16	0
1	Обычный эффект Холла. Обычный эффект Холла. Применение. Случай сильного и слабого поля. Понятие магнитной длины. Двумерный электронный газ	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	Целый квантовый эффект Холла Целый квантовый эффект Холла. История открытия. Теоретическое объяснение. Квантование уровней в магнитном поле (подуровни Ландау).	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	Дробный квантовый эффект Холла Дробный квантовый эффект Холла. История открытия и современное состояние эксперимента. Система уровней в первой зоне Ландау. Понятие Лафлиновской жидкости как нового состояния двумерного электронного газа. Теоретические и экспериментальные исследования дробного эффекта Холла. Фазовые переходы "кристалл Вигнера - жидкость Лафлина". Численное моделирование.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	Обычные (низкотемпературные) сверхпроводники Обычные (низкотемпературные) сверхпроводники. Исторический очерк. Основные экспериментальные данные и теоретические представления. Теория БКШ и теория Гинзбурга-Ландау-Абрикосова-Горького. Предельные критические температуры для электрон-фононного механизма.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	ВТСП Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП). История открытия. Основные классы ВТСП. Особенности и отличия от низкотемпературных соединений. Основные эксперименты.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	ВТСП Влияние давления, облучения, примесей, внешних полей на ВТСП. Кристаллическая структура. Эффект Холла. Фазовые диаграммы. Антиферромагнитное упорядочение. Особенности вихревого состояния.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	Особенности электронного строения, поверхность Ферми, дисперсия возбуждений ВТСП Особенности электронного строения, поверхность Ферми, дисперсия возбуждений. Эксперимент. Симметрия сверхпроводящей щели, s- и d-спаривание. Обзор теоретических моделей ВТСП. Модели с электрон-фононным механизмом спаривания.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	Нефононные механизмы спаривания носителей заряда в ВТСП Нефононные механизмы спаривания носителей заряда в ВТСП. "Спиновые мешки" Шриффера и модель RVB Андерсона. Экситонный механизм. Плазменная модель. Модель Хаббарда. Основные свойства и применение к ВТСП. t-J- модель и многозонная модель Эмери для плоскости CuO ₂ . Теоретические и численные	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

	исследования моделей ВТСП. Методы точной диагонализации и Монте-Карло. Экспериментальные наблюдения поверхности Ферми из фотоэмиссионных спектров. Численное восстановление обобщенной плотности состояний, дисперсии квазичастиц и эквипотенциальных поверхностей из данных метода Монте Карло.			
9-15	Часть 2	14	14	0
9 - 10	Изотоп ^3He Изотоп ^3He - сверхтекучая ферми - жидкость. История открытия. Эффект Померанчука. Три сверхтекучие фазы. Теоретические представления. Р-спаривание. Фаза Андерсона-Морела и Бальяна-Вертхамера. Смеси ^3He в ^4He . Уровни Андреева.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
11 - 12	Бозе-конденсация в газовой фазе Бозе-конденсация в газовой фазе. Спин-поляризованный водород. Эксперименты в щелочных металлах. Сверхнизкое охлаждение. Наблюдение бозе-конденсата. Трехчастичная рекомбинация и закон "1/6". Трехмерный и двумерный газ- проблемы конденсации.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
13 - 14	Сверхтекучесть жидкого гелия Исследования протекания жидкого гелия в тонких пористых каналах. Фазовые переходы "моттовский изолятор - сверхтекучая жидкость". Низкоразмерная сверхтекучесть. Проблема существования фазовых переходов. Критерии. Примеры. Бозонная модель Хаббарда. Фазовые диаграммы "сверхтекучесть - бозе-стекло - моттовский изолятор". Связь с другими моделями. Сверхтоковые состояния.	Всего аудиторных часов		
		4	4	0
		Онлайн		
15	Критерии фазовых переходов для одномерных систем Критерии фазовых переходов для одномерных систем. Особенности одномерной ситуации. Понятие о ренормализационной группе. Теоретические исследования критических точек в бозонной модели Хаббарда. Спиновые цепочки, плоскости. Анизотропные модели Гейзенберга. Фазовые диаграммы. Треугольная решетка и решетка Кагоме. Фазовые переходы в спин-1 одномерной модели. Магнитные макромолекулы - наномангниты. Сканирующий туннельный микроскоп.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты

ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашних заданий и повторении ранее пройденного материала. Для того чтобы дать современное положение физики конденсированного состояния, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме, посещение лабораторий НИЯУ МИФИ. Рекомендуется посещение студентами научных семинаров и конференций, в том числе проводимых в НИЯУ МИФИ, а также в других московских университетах и институтах.

6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-20.1	З-ПК-20.1	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-20.1	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-20.1	Э, КИ-8, КИ-15
ПК-9	З-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
	У-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15
	В-ПК-9	Э, КИ-8, КИ-15

Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически

			стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	В	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		С	
70-74		Д	
65-69	3 – «удовлетворительно»	Е	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	Ф	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 538.9 Т41 Возбуждение в двумерных сильнокоррелированных электронных и электронно-дырочных системах : курс лекций, Тимофеев В.Б., Москва: Издательский дом МЭИ, 2014
2. ЭИ К31 Методы Монте-Карло для физических систем : учебное пособие, Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
3. ЭИ К31 Методы точной диагонализации в квантовой физике : учебное пособие, Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
4. ЭИ К 29 Модельные подходы к магнетизму двумерных зонных систем : , Игошев П. А., Катанин А. А., Ирхин В. Ю., Москва: Физматлит, 2012
5. 538.9 С24 Сверхтекучесть и бозе-конденсация : учебное пособие для вузов, Маймистов А.И. [и др.], Москва: МИФИ, 2008
6. ЭИ К31 Современные проблемы физики конденсированного состояния : , Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: МИФИ, 2008
7. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, Кашурников В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

8. ЭИ К12 Теоретическая физика твердого тела : , Собакин В.Н., Каган Ю.М., Ивлиев С.В., М.: МИФИ, 2009

9. 538.9 К12 Физика макроскопических квантовых систем : курс лекций; семинары, Каган М.Ю., Москва: Издательский дом МЭИ, 2014

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 К31 Квантовые сильнокоррелированные системы: современные численные методы : учебное пособие для вузов, Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: МИФИ, 2007

2. ЭИ К31 Квантовые сильнокоррелированные системы: современные численные методы : учебное пособие для вузов, Красавин А.В., Кашурников В.А., Москва: МИФИ, 2007

3. ЭИ А 76 Магнитные и электрические свойства сильнокоррелированных магнитных полупроводников с четырехспиновым взаимодействием и с орбитальным упорядочением : учебное пособие, Аплеснин С. С., Москва: Физматлит, 2013

4. ЭИ К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.1 Целый и дробный квантовые эффекты Холла, , М.: МИФИ, 2001

5. 539.2 К31 Современные проблемы физики твердого тела Ч.2 Высокотемпературная сверхпроводимость, Кашурников В.А., Москва: МИФИ, 2002

6. ЭИ Э 94 Эффект Холла в германии, легированном золотом : Лабораторный практикум, Подливаев А.И. [и др.], Москва: НИЯУ МИФИ, 2020

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

1. сайт кафедры №70 НИЯУ МИФИ (<http://kaf70.mephi.ru/>)

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Данный курс даёт современный взгляд на последние достижения в физике конденсированного состояния. Ожидается, что по итогам изучения данного курса студент умеет формулировать и использовать последние данные по квантовому эффекту Холла, по целому и

дробному квантованию в первой зоне Ландау в сильном магнитном поле. Имеет представление о магнитной длине, о критерии сильного и слабого поля. Знает физику лафлиновской жидкости и вигнеровского кристалла.

Знает основные эксперименты по высокотемпературной сверхпроводимости, классификацию высокотемпературных сверхпроводников. Имеет представление о фононных и нефононных механизмах описания ВТСП и численных подходах. Умеет продемонстрировать различия высокотемпературных и низкотемпературных соединений, особенности эксперимента.

По сверхтекучести и бозе-конденсации знает основные эксперименты, историю открытия, вещества, в которых наблюдаются эти квантовые явления, условия проведения эксперимента. При изучении материала необходимо обращать внимание на основные теоретические представления, теорию Ландау сверхтекучести, критерии.

По мезоскопическим и наносистемам – знать явления одномерной сверхтекучести, одномерных фазовых переходах, понимать размерное квантование и физические явления, к которым оно приводит.

10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

Необходимо показать студентам современные взгляды на физику конденсированного состояния, на современный эксперимент и теоретические представления.

Следует учесть, что курс опирается на материал следующих дисциплин, читаемых студентам физико-математических специальностей: квантовая механика, теория вероятностей, статистическая физика и термодинамика, теоретическая и экспериментальная физика твердого тела, физика фазовых переходов в конденсированных средах, магнитные свойства твердых тел.

Для успешного освоения дисциплины необходимы знания по курсам общей физики и специальным физическим дисциплинам. Необходимо уметь работать с операторами, решать задачи на собственные значения, знать аппарат вторичного квантования, основные типы квантовой статистики, термодинамику. Необходимо ориентироваться в задачах физики твердого тела, в кристаллических решетках, в фононной и электронной подсистеме твердого тела, в магнитных свойствах, в фазовых переходах и физике сверхпроводимости.

При изложении материала курса следует представить основные обзорные данные по эксперименту и теории целого и дробного квантового эффекта Холла, рассказать о квантовании в магнитном поле, о плотности состояний и особенностях двумерной ситуации. Дать понятие магнитной длины. Получить основное состояние – лафлиновскую жидкость, рассказать о ее свойствах. Дать представление о фазовом переходе – вигнеровской кристаллизации.

Следует описать основные результаты исследований по высокотемпературным сверхпроводникам, обзорно рассмотреть основные модели, претендующие на описание механизма притяжения носителей заряда в ВТСП, как фононные. Так и нефононные механизмы. Необходимо представить классификацию ВТСП, кристаллические структуры, влияние примесей, давления. Следует рассказать об особенностях зонной структуры, об аномалиях сверхпроводящих параметров, об численных расчетах.

Необходимо рассмотреть основные физические явления, сопровождающие сверхтекучие фазовые переходы в гелии-3 и гелии-4, описать двухжидкостную модель Ландау и подходы Бальяна-Вертхамера и Андерсона-Морела. Следует описать явление квантования циркуляции, вихревые структуры, бездиссипативное протекание жидкости, фазовые диаграммы.

Следует обратить внимание на различие фазовых переходов в трехмерном случае и в низкоразмерных сильнокоррелированных системах, таких как сверхтекучий гелий в одномерных каналах. Следует подробнее остановиться на спиновых цепочках и лестницах и т.д., описать бозе-конденсацию в щелочных металлах в условиях магнито-оптической ловушки при сверхнизких температурах. Материал обязательно сопроводить обзором истории открытия явлений, библиографическими ссылками.

Автор(ы):

Кашурников Владимир Анатольевич, д.ф.-м.н.,
профессор