

Программа курса «Современные проблемы физики»

(для студентов кафедры акустики)

1. «Сверхпроводимость» (А.И.Коробов).

1. Открытие электрона Джонсоном. Модель атома Джонса.
- 2 Спин электрона. Опыт Штерна и Герлаха.
3. Опыт Резерфорда по рассеянию альфа-частиц
4. Планетарная модель атома Резерфорда.
5. Постулаты Бора.
5. Электронные состояние в атоме. Принцип запрета Паули. Уровень Ферми.
6. Металлы. Полупроводники. Изоляторы. Поверхность Ферми. Определение поверхности Ферми акустическими методами.
7. Электрический ток в металлах. Время релаксации, длина свободного пробега электронов. Эффективная масса электрона. Проводимость металлов. Остаточное сопротивление металлов при низких температурах.
8. Открытие сверхпроводимости в 1911 году голландским физиком Х. Камерлинг-Оннесом.
9. Критические температуры и магнитные поля в сверхпроводниках.
10. Эффект Мейснера-Оксенфельда. Опыт советского физика В. К. Аркадьева.
11. Эффект Джозефсона.
12. Изотопический эффект.
13. Микроскопическая теория сверхпроводимости БКШ.
14. Открытие высокотемпературного сверхпроводящего перехода (ВТСП) в керамике Беднорцем и Мюллером в 1986г.
15. Упругие свойства сверхпроводящих металлов и керамик в области ВТСП.
16. Практическое применение сверхпроводящих материалов в научном приборостроении и технике.

2. "Метаматериалы" (В.Г. Можжев)

1-я лекция. ТЕРМИНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ

Материаловедение как приоритетное направление развития современной физики (примеры: создание специального факультета в МГУ, появление новых профильных журналов, частичное изменение названий классических журналов, проведение тематических конференций).

Объяснение термина "метаматериалы", элементы истории исследований. "Левые" и "правые" среды, дважды "отрицательные" среды. Сходство и отличие метаматериалов и композитов. Фотонные, фононные, плазмонные, магнотонные "кристаллы". Важность анизотропии и резонанса. Аномально анизотропные композиты типа кирпичной кладки и пчелиных сот. Системы с субволновыми резонансами (пузырьки газа в жидкости, конструкции с резонаторами Гельмгольца, гранулированные среды, среды с периодическими электрическими неоднородностями типа емкостных и индуктивных элементов, образующих микрорезонаторы). Метаповерхности как двумерный аналог метаматериалов.

Теоретические подходы, используемые для изучения волновых свойств метаматериалов. Определение эффективных мезоскопических свойств метаматериалов (методы усреднения и гомогенизации). Ауксетики (среды с отрицательным коэффициентом Пуассона), пример - конструкция типа вывернутых пчелиных сот. Лучевые построения и эквивалентное волновое уравнение, параболическое уравнение для волновых пучков в метаматериалах. Численные расчеты с учетом реальной геометрии конструкции метаматериалов.

2-я лекция. ОСОБЫЕ ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Отрицательная рефракция. Возможность фокусировки вогнутой линзой. Необычная плоская линза (линза Веселаго) – суперлинза со сверхразрешением, преодолевающим дифракционный предел, объяснение этого эффекта использованием излучения ближнего поля; отсутствие оси у линзы Веселаго. Интерпретация фокусировки за счет отрицательной рефракции на границе метаматериалов как образование дифракционных максимумов (максимумов рассеяния). Волновая маскировка объектов - создание "плаща-невидимки" за счет волнового "обтекания" (огибания объектов волновыми лучами). Волноводное распространение и локализация в градиентных средах с "антиволноводным" профилем волновой скорости.

Обратные волны (волны с отрицательной групповой скоростью) и волны с нулевой групповой скоростью (ВНГС). Обратные акустические волны и ВНГС в пластинах (волны Лэмба и чисто сдвиговые пьезоэлектрические волны). Физические механизмы их появления - анизотропия, связь мод, отрицательный сдвиг лучей при отражении; перспективы практических приложений.

Аномальные эффекты излучения. Обращенный назад конус черенковского излучения, инвертирование освещенной зоны и зоны тени для обратных волн утечки. Нарушение принципа Рэлея и равенства групповой скорости и скорости переноса энергии для обратных волн утечки. Противоположное смещение частоты в эффекте Доплера.

Особые поверхностные волны на границе метаматериалов и обычных сред (границе "левых" и "правых" сред).

Волновые "диоды", основанные на использовании линейных свойств метаматериалов (асимметрия рассеяния) и их нелинейных свойств.

3. Физика современных лазеров и их применение в физической акустике (Андреев В.Г.)

Цель лекций - познакомить студентов с современными лазерами и их применениями в различных физических исследованиях. В первой части на примере He-Ne лазера и лазера на алюмоиттриевом гранате будут рассмотрены физические принципы работы лазеров, способы создания инверсной населенности и генерации когерентного излучения. Будет дана классификация современных лазеров по типу активной среды с соответствующими примерами, приведены рекордные значения по мощности излучения в различных спектральных диапазонах. На примере лазера в ИПФ РАН будут рассмотрены особенности формирования аттосекундных импульсов излучения. Большое внимание будет уделено лазеру на свободных электронах, построенном в Гамбурге с 27% участием РФ в финансировании этого проекта. Лазер имеет рекордную в настоящее время яркость в

рентгеновском диапазоне и частоту следования импульсов (30 кГц). Лазер был запущен в эксплуатацию в 2017 году, и сейчас уже появились публикации по результатам экспериментальных работ, выполненных на этой установке. Часть лекций будет посвящено вопросу лазерного термоядерного синтеза, истории создания многолучевых установок и современному состоянию в этой области исследований. Применение лазеров в акустических исследованиях будет рассмотрено на примере оптоакустического эффекта, возможности генерации импульсов с пиковым значением давления до 100 МПа и длительностью в десятки нс. Будет также рассмотрен вопрос о применении лазеров в виброметрии для контроля колебаний поверхности.

1. Физические принципы работы лазера. Инверсная населенность и методы ее создания. Зеркала как средство создания положительной обратной связи. Виды лазеров по типу активной среды (газовые, твердотельные).

2. Основные технические характеристики лазеров (длина волны излучения, длительность импульсов, энергия в импульсе, мощность, когерентность).

Рекордные значения современных лазеров. Петаваттные лазеры. Перспективы развития лазерной техники.

3. Возможности управления лазерным излучением. Перестройка длины волны излучения.

4. Лазер на свободных электронах проекта XFEL в Гамбурге. Особенности генерации когерентного рентгеновского излучения, ондуляторы. Применение лазера XFEL.

5. Применение лазеров в акустике:

- Генерация звука лазерным излучением.

- Регистрация колебаний и волн на поверхности объектов – лазерные виброметры

6. Лазерный термоядерный синтез – основы и современное состояние.

4. Мощный ультразвук. Голография (О.А.Сапожников)

Лекция 1

АКУСТИЧЕСКИЕ ФОНТАНЫ, УЛЬТРАЗВУКОВАЯ АТОМИЗАЦИЯ И ИХ РОЛЬ В РАЗРУШЕНИИ БИОТКАНИ МОЩНЫМ ФОКУСИРОВАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОМ

1. Когда распространяющийся в жидкости мощный ультразвуковой пучок направляется на поверхность раздела с газовой средой, возникает гидродинамическая струя – «акустический фонтан». Под действием «накаченного» в струю ультразвука в таком фонтане могут наблюдаться различные эффекты, такие как разбиение струи на крупные капли, образование капель микроскопического размера (атомизация), образование капиллярных волн, микропузырьков и даже возникновение кипения. Обсуждается неустойчивость Фарадея как один из механизмов ультразвуковой атомизации жидкости. Рассматривается роль радиационного давления в формировании струи акустического фонтана.
2. В лекции демонстрируются также результаты видеосъемки некоторых характерных режимов поведения акустического фонтана и сопровождающей его атомизации жидкости. Кроме того, обсуждается связь этого явления с одним из недавно открытых режимов ультразвукового разрушения биотканей, называемого гистотрипсией. При гистотрипсии

среда механически измельчается под действием сильно нелинейной фокусированной волны, профиль которой содержит ударные участки. Обсуждаются недавние эксперименты, показавшие, что превращение биоткани в жидкость может быть объяснено распылением ткани, аналогичным эффекту атомизации в акустическом фонтане.

Лекция 2.

ГОЛОГРАФИЯ В ОПТИКЕ И АКУСТИКЕ. АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНТЕЗИРОВАННОЙ ДВУМЕРНОЙ РЕШЁТКИ ДАТЧИКОВ

1. В основе голографии лежит положение о том, что трёхмерное волновое поле может быть восстановлено из двумерных распределений характеристик поля (в случае монохроматического процесса это амплитуда и фаза), записанных в точках некоторой поверхности, на которую падает рассматриваемая волна. Голография больше известна в оптике, однако в последнее время её потенциал стал широко применяться и в акустике. Для звуковых волн фаза волны может быть измерена напрямую и поэтому нет необходимости в записи интерферограммы, как это приходится делать в оптической голографии. Поскольку звуковое поле внутри исследуемой области удовлетворяет волновому уравнению, голограмма может быть с высокой точностью численно спроецирована с той поверхности, на которой она зарегистрирована, на поверхность источника поля. После этого в математической волновой задаче становится известным граничное условие, и поле может быть рассчитано во всей трёхмерной области.
2. В лекции обсуждаются основы оптической голографии и более подробно рассматривается метод акустической голографии, базирующийся на вычислении акустического поля в объёме по его экспериментальным измерениям на некоторой поверхности. При исследовании волновых полей мегагерцового диапазона, излучаемых источниками диаметром в несколько сантиметров, корректная запись голограммы предполагает регистрацию формы волны в около 10000 точек и более, т.е. для практической реализации метода голографии необходимо иметь соответствующие решётки приёмников. Реальная двумерная решётка приёмников может быть заменена синтезированной решёткой, получаемой путём последовательного помещения одиночного датчика в нужные точки. Типичный размер синтезированной решётки составляет 100×100 элементов, что позволяет осуществить запись голограммы с достаточной для практики точностью. Расчёт поля на основе голограммы производится на основе интеграла Рэлея или методом углового спектра. Демонстрируются несколько характерных примеров голограмм и обсуждаются различные применения акустической голографии.

5. О научных исследованиях по фундаментальной физике в программе полета Международной космической станции (МКС) (Маков Ю.Н.)

Тема данных 2-х лекций:

Определение и проблематика научной категории "ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА (ФФ)" (основы).

О научных исследованиях по фундаментальной физике в программе полета Международной космической станции (МКС)

I. Введение (~ 10 мин.)

1. Содержательная нагрузка определения "фундаментальный (ая)" в современной науке.

2. Содержательное различие между определениями "фундаментальное исследование в рамках определенного научного направления", "фундаментальные теория, вывод и т.п. в определенной научной области", "фундаментальная (определенная, конкретная)

II. О фундаментальной физике (ФФ) (~ 110 мин.)

1. Сложившееся понятие (содержание) термина "фундаментальная физика (ФФ)" (почему именно физика (совокупность некоторых ее разделов) более других наук "заслуживает" этого определения)

2. Составные части (разделы) ФФ (в этом пункте плана - перечисление разделов с необходимыми краткими комментариями относительно областей интересов этих составных частей):

- а) квантовая физика (квантовые физические системы в микро- и макромире),
- б) атомно-ядерная физика,
- в) физика элементарных частиц (+ продолжение теории на астрофизику),
- г) физика высоких энергий (+ ускорители),
- д) физика конденсированных состояний,
- е) термодинамика + стат. физика + теория информации
- ж) электромагнитные поля и взаимодействия,
- з) СТО, ОТО (теория тяготения)
- и) астрофизика,
- к) космология, основные этапы космологической эволюции,
- л) современные проблемы и теории (вещество и антивещество – проблема асимметрии, темная материя и энергия, КВАНТОВАЯ ГРАВИТАЦИЯ – стремление к построению этой общей теории «ВСЕГО», теория струн и петлевая теория квантовой гравитации),
- м) инфляционная космология (инфляционная модель Вселенной).

3. Исторические этапы и поэтапные результаты формирования и развития базовых элементов, понятий, теорий и т.п., составляющих "каркас" фундаментальной физики (в этом подразделе дается более подробное и систематизированное изложение теоретического материала с использованием основных уравнений и соотношений; некоторые результаты даются с математическими выводами):

- а) элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия,
- б) космологические модели,
- в) фундаментальные физические постоянные (константы взаимодействия), планковская длина как структурно - производная от фундаментальных постоянных и ее роль в теории квантования пространства,
- г) стремление к "всеобщей" объединительной теории всех фундаментальных взаимодействий (другие названия: общая (единая) теория поля, квантовая теория гравитации, "теория всего").

4. **Элементы систематизации** довольно «пестрого» содержимого ФФ:

- а) **четыре базовые теории** с соответствующими характерными для них фундаментальными константами:
 - квантовая теория (постоянная Планка \hbar),

- специальная теория относительности - СТО - (скорость света в вакууме c),

- общая теория относительности - ОТО - (гравитационная постоянная $\kappa = G/c^2$),

- статистическая физика (постоянная Больцмана k_B),

б) **четыре фундаментальных взаимодействия** с характерными для них фундаментальными константами:

- гравитационное взаимодействие (гравитационная постоянная G)

- электромагнитное взаимодействие (постоянная тонкой структуры

α),

- слабое взаимодействие (константа слабого взаимодействия α_w),

- сильные взаимодействия (константа сильного взаимодействия α_s

в) плоскостная модель Бронштейна, усовершенствованная объемная модель Зельманова (куб физических теорий) и их более поздние усовершенствования для наглядного представления структурной взаимосвязи базовых теорий ФФ с их объединением в **единой теории поля** на основе характерных для них "наборов" фундаментальных констант.

5. Добавочный материал "О премии Мильнера "Breakthrough Prize" по **фундаментальной физике** (хотя также премии вручаются за достижения в области биологических и медицинских наук)" - в качестве отличного "путеводителя" по проблемам фундаментальной физики.

III. Новые возможности (обсуждаем, какие) проведения экспериментов по ФФ

в "космических условиях" (~ 60 мин.)

1. МКС как «рукотворная» космическая научная лаборатория (также кратко об истории космических станций, о существующих достижениях, перспективах).

Оцениваем "экстремальные" и "эксклюзивные" условия на МКС (прежде всего, значение микрогравитации на станции).

2. Знакомство с наиболее значимыми уже проведенными или только планируемыми экспериментами по ФФ на МКС или вне (с наибольшим вниманием к экспериментам по поиску гравитационных волн):

а) гравитационные волны (с краткими сведениями о них) и эксперименты по их обнаружению (регистрации) - для полноты картины также дается информация о первых "земных" экспериментах, а затем о планируемых "космических":

- гравитационное излучение (волна - ГВ) – следствие ОТО; основные уравнения (уравнение Эйнштейна, волновое уравнение для ГВ – в линейном случае, упоминание об нелинейном случае),

- краткая история экспериментов по обнаружению ГВ (отмечаются необходимые условия реализации таких экспериментов и соответствующие трудности),

- характеристика и успехи осуществленного "земного" проекта **Лазерно-Интерферометрической Гравитационной Обсерватории (LIGO)**; нобелевская премия 2016 г. и премия Мильнера (об этом менее известно),

- разрабатываемый (без России) космический проект **LISA** (**Л**азерно-**И**нтерферометрическая космическая (**S**pace) **А**нтенна) на базе 3-х спутников в точках либрации Солнечной системы с интерферометрической базой $\sim 10^6$ км.; уже был запущен спутник по этой программе для отработки отражателя; запуск программы планируется на ~ 2029 г. (программа редко упоминается "на фоне" довольно активного нашего участия в "земном" проекте **LIGO** (например, см. сайт нашего факультета!),

б) значимый и дорогой (> 2 млрд. дол.) эксперимент с доставленным на МКС магнитным альфа-спектрометром для изучения состава космических лучей, для поиска (по соотношению количества характерных элементарных частиц) антиматерии и темной материи; интерпретация эксперимента с позиций соответствующих разделов *фундаментальной физики*,

в) эксперименты NASA по созданию на борту МКС суперхолодного вещества (конденсата Бозе-Эйнштейна) при температуре, отличающейся на $1/10^9$ К от абсолютного нуля (самая низкая достигнутая температура!!!) с помощью доставленной и установленной на борту МКС в мае 2018 г. (в нашей прессе это широко не освещалось) системы (лаборатории) NASA (Cold Atom Laboratory, CAL) по производству холодных атомов; в таком сильно охлажденном состоянии достаточно большое число атомов оказывается в своих минимально возможных квантовых состояниях и квантовые эффекты начинают проявляться на макроскопическом уровне (со студентами вывод выражения для порогового значения температуры, когда образуется этот конденсат),

г) упоминание о других экспериментах на МКС.

6. Атмосферная турбулентность и распространение звука (В.А.Гусев)

1. Понятие о турбулентном движении. Гипотеза "измельчения" турбулентности, каскад преобразования энергии. Структурные функции. Закон "двух третей Колмогорова-Обухова". Энергетический спектр. Планетарные пограничные слои и их параметры. Определение высоты пограничных слоев для различных типов турбулентности. Самоорганизованные конвективные структуры. Энергетика турбулентности и замыкание уравнений турбулентного движения. Иерархи моделей турбулентного замыкания.

2. Подходы к описанию распространения акустических волн в случайно-неоднородных средах. Метод стохастических уравнений. Замыкание цепочки уравнений для моментов. Метод среднего поля, его достоинства и недостатки. Метод среднего профиля и вывод замкнутого равномерно пригодного уравнения для усредненного поля. Особенности трансформации и пространственной модуляции интенсивных акустических волн в турбулентной стратифицированной атмосфере.

7. Проблемы и достижения аэродинамики высоких дозвуковых скоростей (П.Н. Кравчун)

1. Общие представления об аэродинамике дозвуковых скоростей. Подъемная сила крыла. Аэродинамическое сопротивление и его составляющие: профильное, индуктивное, волновое. Аэродинамическое качество. (+Демонстрация видеофрагментов).

2. Концевые вихри и связанное с ними индуктивное сопротивление. Причина возникновения концевых вихрей.

+Видео: а) результат математического моделирования; б) эксперименты NASA по визуализации концевых вихрей в приземном слое; в) наблюдения в реальных полетах; г) расхождение вихрей при посадке за счет «экранного» эффекта.

Опасность концевых вихрей для практической авиации, катастрофы, в т.ч. А300 в Нью-Йорке с разрушением конструкции в воздухе (+видео и результаты расшифровок). Эволюция вихревых структур после отрыва. Опасность концевых вихрей в условиях внедрения RVSM («сокращенного» эшелонирования).

Методы снижения интенсивности концевых вихрей и связанного с ними индуктивного сопротивления: 1) увеличение удлинения крыла; 2) отрицательная геометрическая и аэродинамическая кривая крыла; 3) использование специальных законцовок (винглеты – «крылышки Уиткомба», шарклеты, «двойное перо» и др., их разновидности в авиации больших и малых скоростей), результаты их применения – эффективное уменьшение интенсивности концевых вихрей, сопротивления самолета и снижение расхода топлива (увеличение дальности) на 8-10% за счет простых аэродинамических средств (столь радикальный эффект ранее достигался, как правило, лишь при существенной модернизации самолета и его ремоторизации с переходом на новое поколение двигателей). Аэродинамические проблемы, связанные с применением винглетов.

3. Волновое сопротивление и волновой кризис крыла. Сжимаемость среды и некоторые особенности аэродинамики сжимаемого газа. Скачки уплотнения на крыле. Критическое число Маха. Прямое и стреловидное крыло. Достоинства и недостатки стреловидного крыла (в т.ч. автоколебания типа «голландский шаг» и их устранение).

+Видео: демонстрация «голландского шага» Ту-154.

Суперкритический профиль: возможность отодвинуть волновой кризис вверх по числу Маха или уменьшить стреловидность крыла для тех же крейсерских скоростей полета (чисел M), уменьшение волнового сопротивления. Применение суперкритических профилей в современной авиации. Проблемы, связанные с применением суперкритических профилей (снижение $C_{u\max}$, необходимость применения мощной механизации крыла, скоростная вибрация из-за срыва потока за скачком уплотнения).

Проблемы крыла обратной стреловидности: прочность, вибрации из-за интенсивного взаимодействия турбулентных пограничных слоев на фюзеляже и на крыле в зоне их перекрытия.

4. Суммарный эффект применения винглетов и суперкритических профилей.

Аэродинамические возможности современных пассажирских самолетов.

Видео: «вертикальный» взлет B-737 MAX.

Перспективы: законцовки изменяемой геометрии, спироиды и др.; суперкритические профили лопастей двигателей винтовых самолетов и несущих винтов вертолетов.

8. Информационно-поисковые системы по физике, навигация по источникам научной информации (В.Г.Шамаев)