



ФИЗИКА ВОЛН

Учебная программа

Д.И. Трубецков, Ю.И. Левин, Н.М. Рыскин

Введение

Представленная учебная программа лекционного курса по физике волн читается студентам младших курсов Колледжа прикладных наук (на правах факультета) Саратовского государственного университета. Этот двухсеместровый лекционный курс, также как и курс по физике колебаний, входит в блок, который в учебных планах физических специальностей обычно называется «общая физика».

Нильсу Бору принадлежат слова: «Язык Ньютона и Максвелла останется языком физиков на все времена». Понятия (идеи) материальных частиц и волн играют в физике ключевую роль и имеют «недвусмысленное поле применения», и оба «языка» необходимы в равной степени не только при изучении физики, но и других разделов естествознания. Однако в традиционных учебных программах по дисциплинам, входящим в блок общей физики, обычно «языку материальных частиц» отводится значительно больше места, чем «языку волн», и даже такой курс как оптика не устраняет этого неравноправия; только на старших курсах обучения, как правило, появляется теория волн и (или) другие специальные дисциплины, в которых «языку волн» уделяется должное внимание.

Нам представляется важным уже на ранней стадии обучения (на 1–3 курсах), когда наиболее интенсивно идет формирование в умах обучаемых общей естественно–научной картины мира и проблемы специализации еще не ставятся во главу угла, физике колебаний и волн предоставить больше места, чем это делается традиционно. При этом можно напомнить меткое замечание Л.И. Мандельштама о том, что язык колебаний, а можно добавить и волн, является «интернациональным» языком науки.

Технология обучения в Колледже прикладных наук (КПН) основана на идеях синергетики (нелинейной динамики), и это привело нас к необходимости ввести в блок «общая физика» такие дисциплины, как физика колебаний и физика волн.

Лекционный курс «Физика волн» состоит из двух разделов: линейные волны (читается в 3–ем семестре) и нелинейные волны (5–ый семестр). При рассмотрении этого курса следует учесть, что он рассчитан на студентов КПН, которые на первой (школьной) ступени уже получали представления об идеях синергетики.

Лекции по физике волн сопровождаются практическими занятиями, где решается большое число конкретных задач из акустики, гидродинамики,

электроники, физики плазмы и т.д. Кроме того в КПН и на кафедре электроники и волновых процессов создается совместный учебный план по физике волн, который будет состоять из двух разделов: физический эксперимент и компьютерное моделирование.

1. Линейные волны

1.1. Введение в курс. Волны вокруг нас, основные представления о волновых процессах в различных системах. Изоморфизм волновых явлений. О различных определениях понятия волны. Распространяющиеся и конвективные волны, маятники Рейнольдса. Не линейность (линейность) – «дикий частный случай» по А.А. Андронову и принцип Гильберта. Мир линейных волн.

Волновое уравнение. Стационарные волны. Классическое волновое уравнение и рамки его применимости. Уравнение Кортевега – де Вриза. Линейное волновое уравнение; волновая терминология.

1.2. Скорость волн. Трудности определения скорости волны. Монохроматическая волна и ее роль в теории волн. Фазовая скорость. Групповая скорость (на основе разложения Фурье). Формула Релея. Положительная, нулевая и отрицательная групповые скорости. Парадоксы Л.И. Мандельштама, которые возникают, если неправильно пользоваться понятием скорости волны. Рамки, в которых понятия фазовой и групповой скоростей имеют физический смысл.

1.3. Колебания упорядоченных структур и переход к одномерной сплошной среде. Дисперсия. Колебания упорядоченных структур на примере системы из набора связанных маятников. Предельный переход к сплошной среде, приводящий к уравнению Клейна – Гордона. Общее линейное уравнение; дисперсионное соотношение. С чем связано существование дисперсии в среде? Пространственная и временная дисперсия (существование в среде собственных пространственных и временных масштабов; нелокальная связь физических величин; зависимость диэлектрической проницаемости от частоты и волнового числа).

1.4. Линейные диспергирующие волны. Дисперсионное соотношение (полиномиальное и трансцендентное). Общий способ получения дисперсионного уравнения для радиотехнических цепочек, моделирующих различные среды. Цепочки – модели сред с различными законами дисперсии.

Понятие моды. Общее решение волновой задачи в виде интеграла Фурье, волновой пакет. Асимптотическое представление решения – метод стационарной фазы. Локальная частота и волновое число, их связь с фазовой и групповой скоростями. Скорость распространения энергии. Групповая скорость с точки зрения кинематической теории.

Дисперсионные характеристики; их графическое представление. Положительная и отрицательная, нормальная и аномальная дисперсии. Прямая и обратная волна.

Волны в одномерном резонаторе. Влияние граничных условий. О квазичастицах. Пространственно–временная аналогия.

Существуют ли линейные тепловые волны? О связи процессов теплопроводности и диффузии.

1.5. Линейные волны в гидродинамике. Вывод основных уравнений гидродинамики – уравнения непрерывности и уравнения Эйлера. Дисперсионные уравнения для звуковых волн в воде.

Описание волновых процессов в океане с учетом вращения Земли и стратификации. Основное уравнение акустики океана.

Гравитационные волны в несжимаемой жидкости. Дисперсионное уравнение для «мелкой» и «глубокой» воды (анализ размерностей и точное решение). Интеграл Коши – Лагранжа, уравнение Бернулли.

Капиллярные волны. Дисперсионное уравнение (анализ размерностей и точное решение). Фазовая и групповая скорости капиллярных волн. О связи капиллярных волн с моделью атомного ядра. Гравитационно-капиллярные поверхностные волны.

Гироскопические (инерционные) волны. Влияние вращения Земли на дисперсию гравитационных волн. Волны Россби. Внутренние волны в безграничной среде и в волноводе.

Волны от мгновенного точечного источника. Круговые волны на воде. Система волн на воде за движущимся источником.

1.6. Линейные волны в плазме. Общие сведения о плазме. Гидродинамическое описание плазмы (основные уравнения плазменной гидродинамики). Дисперсионное уравнение для плазменных ленгмюровских колебаний и анализ важных частных случаев. О затухании Ландау. Дисперсия волн в двухжидкостной гидродинамике; ионно-звуковые волны.

1.7. Введение в теорию устойчивости и неустойчивости волновых систем. Отличие задач об устойчивости и неустойчивости в сосредоточенных и распределенных системах. Виды неустойчивости в распределенных волновых системах. Неустойчивость Джинса. Абсолютная неустойчивость на примере задачи о двух взаимодействующих встречных электронных потоках. Анализ плазменно-пучковой неустойчивости. Конвективная неустойчивость на примере системы двух взаимодействующих попутных электронных потоков. О гидродинамических волновых неустойчивостях (неустойчивость Гельмгольца). Диффузионная неустойчивость по Тьюрингу.

1.8. Энергия и импульс волн. Уравнение эволюции волнового вектора во времени и в пространстве. Об одном способе вычисления плотности энергии электромагнитного поля в среде с дисперсией (по М.Л.Левину). Уравнение переноса энергии для волнового пакета в прозрачной среде. Импульс волнового пакета.

1.9. Волны с отрицательной энергией. Связанные волны. Качественное объяснение существования волны с отрицательной энергией. Волны с положительной и отрицательной энергией в электронике, физике плазмы и гидродинамике. Связанные волны (аналогия со связанными колебаниями). Метод связанных волн и его применение.

1.10. Введение в теорию распространения волн в средах с периодически изменяющимися параметрами. О волнах в средах с медленно меняющимися параметрами. Нерезонансные параметрические процессы. Анализ случая, когда скорость изменения параметра (частоты) много меньше собственной частоты осциллятора. Приближение Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна (ВКБ) и адиабатический инвариант. Распространение плоских гармонических волн в плавно неоднородных средах. Приближение геометрической оптики. Выход за рамки геометрической оптики – задача о переходном слое.

2. Нелинейные волны

2.1. Основные принципы распространения нелинейных волн. Об эвристическом подходе к нелинейным волновым уравнениям. Эталонные уравнения теории нелинейных волн. Нелинейные волны в среде без дисперсии. Уравнение простой волны. Укручение и опрокидывание волн. Среда с диссипацией: уравнение Бюргерса. Ударные волны. Среда с высокочастотной дисперсией: уравнение Кортевега – де Вриза (КдВ). Уединенные волны и солитоны. Среда с дисперсией в области низких частот: нелинейное уравнение Клейна – Гродона. Среда с дисперсией и диссипацией: уравнение КдВ – Бюргерса. Распространение огибающей волнового пакета: нелинейное уравнение Шредингера. Солитоны огибающей. Нелинейные волны в средах с неустойчивостью. Уравнение

Гинзбурга – Ландау. Неустойчивое уравнение Клейна – Гордона. Обобщение на неоднородный случай. Уравнения Хохлова – Заболоцкой и Кадомцева – Петвиашвили.

2.2. Нелинейные волны в средах без дисперсии. Простые волны.

Уравнение простой волны. Решение методом характеристик. Переменные Эйлера и переменные Лагранжа. Поток невзаимодействующих частиц. О группировке электронов в пролетном клистроне. Решение Римана. Графический анализ опрокидывания профиля волны. Распространение гармонического сигнала. Спектр опрокидывающейся волны: решение Бесселя – Фубини.

Образование разрывов в простой волне. Определение координаты разрыва. Граничное условие на разрыве. Слабые разрывы. Центрированная волна разрежения. Динамика амплитуды разрыва. пилообразная волна и ее спектр. Распространение треугольного импульса. Распространение биполярного импульса. N -волна. Волны от движущегося источника. Взаимодействие разрывов.

2.3. Общий случай системы гиперболических уравнений.

Критерий гиперболичности. Примеры гиперболических систем. Простые волны в газовой динамике. Инварианты Римана. Уравнения «мелкой воды». Задача о разрушении плотины. Ионный звук в плазме. Волны в автомобильном потоке. Граничные условия на разрыве в общем случае и их связь с законами сохранения. Законы сохранения уравнений «мелкой воды». Диссипация энергии на разрыве.

2.4. Нелинейные волны в диссипативных диспергирующих средах. Ударные волны.

Уравнение Бюргера. Стационарная ударная волна. Преобразование Коула – Хопфа. Распространение периодического сигнала. Решение Хохлова и его спектр (решение Фэя). Некоторые точные решения уравнения Бюргера (одиночный горб, N -волна). Слияние ударных волн. Автомодельные решения.

Примеры ударных волн. Задача о сильном точечном взрыве в атмосфере и ее решение при помощи метода размерностей. Об ударных волнах в космосе.

2.5. Нелинейные волны в диспергирующих средах.

Проблема Ферми – Пасты – Улама (ФПУ). Ее связь с уравнениями Буссинеска и Кортевега – де Вриза. Солитоны и работа Забуски и Крускала. Возвращаемость ФПУ.

Уравнение КдВ. Стационарные решения: кноидальные волны и солитоны. Взаимодействие солитонов. Солитонные решения других эталонных уравнений (модифицированное уравнение КдВ, уравнения Буссинеска, Син–Гордона). Бризеры. Примеры стационарных волн: ионно-акустические и ленгмюровские волны в плазме, электромагнитные волны в нелинейной диэлектрической среде.

Редуктивная теория возмущений – метод получения «длинноволновых» уравнений. Примеры получения уравнения КдВ. Волны на поверхности мелкой воды. Ионно-акустические волны в плазме. Волны в нелинейных линиях передачи. Газовая динамика и уравнение Бюргера.

Нелинейные волны в среде с диссипацией и дисперсией. Уравнение КдВ – Бюргера. Решение в виде стационарной ударной волны. Бесстолкновительные ударные волны в плазме.

2.6. Точные методы решения нелинейных волновых уравнений.

О методе обратной задачи рассеяния. Бесконечное число законов сохранения. Преобразование Миуры – Гарднера. Задача рассеяния для уравнения Шредингера. Потенциал в форме $\operatorname{sech}^2 x$. Дискретный и непрерывный спектр собственных значений. Обратная задача: уравнение Гельфанда – Левитана – Марченко. Понятие о полной интегрируемости нелинейных уравнений в частных производных.

Обратная задача рассеяния в формулировке Лакса. Иерархия интегрируемых уравнений. Задача рассеяния Абловица – Каупа – Ньюэлла – Сигура. Другие точные методы решения солитонных уравнений: метод Хироты и многосолитонные решения; преобразования Бэклунда.

2.7. Модулированные волны в нелинейных средах. Теория Уизема. Нелинейное дисперсионное соотношение. Законы сохранения волнового числа и волнового действия. Критерий Лайтхилла. Модуляционная неустойчивость (неустойчивость Бенджамена – Фейра). Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ). Неустойчивость пространственно-однородного решения. Решение в виде солитона огибающей. «Светлые» и «темные» солитоны. Самофокусировка света.

Получение НУШ при помощи метода многих масштабов. Примеры: ленгмюровские волны в плазме; электромагнитные волны в нелинейном диэлектрике. Взаимодействие высокочастотных волн с низкочастотными. Взаимодействие ионно-звуковых и ленгмюровских волн в плазме: уравнения Захарова. Коллапс ленгмюровских волн. Волны в молекулярных цепочках. Уравнения Давыдова.

Трехволновый резонанс в квадратично-нелинейной среде. Уравнения трехволнового взаимодействия. Распадная (параметрическая) неустойчивость. Взрывная неустойчивость. Пример: взаимодействие электронного пучка с плазмой.

2.8. Нелинейные волны в активных средах. Два типа неустойчивостей. Уравнение Гинзбурга – Ландау. Модуляционная неустойчивость. Метод многих масштабов для неустойчивых систем. Конвекция Релея – Бенара. Взаимодействие волн с положительной и отрицательной энергией. Распространение электромагнитных импульсов в среде из двухуровневых частиц. Уравнения Максвелла – Блоха. Самоиндуцированная прозрачность. Предел неподвижных атомов: уравнение Син-Гордона. Автомодельное решение и π -импульс. Неоднородное уширение и теорема площадей.

Волны в нелинейной активной линии передачи. Влияние диссипации. Стационарные бегущие фронты. Уравнения типа «реакция – диффузия». Модель Колмогорова – Петровского – Пискунова. Об автоколебаниях в распределенных системах.

Литература

1. Уизем Дж. Линеинные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
2. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984 (первое издание), 1992 (второе издание).
3. Бхатнагар П. Нелинейные волны в одномерных дисперсионных средах. М.: Мир, 1984.
4. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972.
5. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.
6. Скотт Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М.: Сов. Радио, 1977.
7. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988.
8. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1988.
9. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.
10. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988.
11. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. М.: Мир, 1989.
12. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973.

Саратовский государственный
университет
Колледж прикладных наук

Поступила в редакцию 24.09.97



Левин Юрий Иванович – родился в Саратове в январе 1942 года. Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в области радиофизики (1974). Декан Колледжа прикладных наук (на правах факультета) СГУ, директор Государственного учебно-научного центра «Колледж», доцент кафедры электроники и волновых процессов СГУ. Подготовил и прочитал лекционные курсы по общей физике (механика, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика, квантовая физика), а также специальные курсы «Введение в теорию колебаний и волн», «Волны в электронных потоках», «Приборы СВЧ электроники», «Моделирование физических процессов», «Математические методы естествознания», «Линейные волны». Имеет более 80 научных публикаций.



Рыскин Никита Михайлович – родился в 1966 году в Саратове. Окончил физический факультет Саратовского университета (1991). Работал в НИИ механики и физики СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «радиофизика» в СГУ (1996). Доцент Колледжа прикладных наук СГУ (1997). Читает курс «Нелинейные волны» студентам третьего курса КПН. Область научных интересов – нелинейные явления в распределенных системах, содержащих электронные потоки и магнитные поля, вакуумная микроэлектроника. Автор и соавтор 25 научных работ.