

ПРОГРАММА

специального курса «Введение в теорию нелинейных волн» для студентов IV курса радиофизического факультета ННГУ по специальности «Фундаментальная радиофизика и физическая электроника». Лектор – д.ф.-м.н. В.П. Реутов

1. Введение.

Краткий исторический экскурс. Интердисциплинарный характер понятий и образов в теории нелинейных волн («нелинейной физике»). Использование эталонных (базовых) уравнений для волновых полей.

2. Дисперсионное уравнение.

2.1. Получение дисперсионного уравнения и свойства симметрии его решений.

Задача с начальными и граничными условиями. Точки ветвления дисперсионных кривых.

2.2. Электромагнитные волны в распределенных LC-линиях.

Переход от дискретной цепочки к распределенной LC-линии. Аналогия между волнами в LC-линиях и плоскими электромагнитными волнами в среде с временной дисперсией. Линии с дисперсией в области высоких и низких частот. Использование LC-линий в качестве сред-моделей.

2.3. Волны пространственного заряда в системе взаимопроникающих «холодных» потоков заряженных частиц.

Неустойчивость пучка малой плотности в системе «пучок-плазма». Эффекты редукции пространственного заряда в сильно замагниченной системе «пучок-плазма» с ограниченным поперечным сечением.

2.4. Асимптотическое поведение волновых пакетов в неустойчивых средах.

Определение направления распространения и критерий усиления волн. Критерии абсолютной и конвективной неустойчивости.

3. Энергия квазимонохроматических волн.

3.1. Определение энергии волн на основе уравнений энергетического баланса.

Консервативные и слабодиссипативные среды. Вывод уравнения баланса с помощью асимптотического метода и спектрально-операторного формализма (на примере электромагнитных волн в распределенной LC-линии с дисперсией). Энергия плоских электромагнитных волн в среде с временной дисперсией. Связь понятия волновой энергии с законами сохранения для полей.

3.2. Волны отрицательной энергии (ВОЭ) в неравновесных средах.

Термодинамические ограничения на знак волновой энергии. Физический смысл ВОЭ (на примере волн пространственного заряда в моноскоростном электронном потоке и в системе «пучок-плазма»). Точки смены знака энергии на дисперсионных кривых. Формализм ВОЭ в линейных средах.

3.3. Лагранжев формализм как адекватный способ описания полей в консервативных непрерывных средах.

Формулировка уравнений движения среды в лагранжевой форме и законы сохранения.

4. Многоволновые взаимодействия в слабодиссипативных средах.

4.1 Вывод укороченных уравнений для многоволновых взаимодействий в средах с малой нелинейностью.

Асимптотический метод для нелинейной системы уравнений первого порядка; формализм прямой и сопряженной задач. Комбинационные нелинейные источники и условия пространственно-временного резонанса (синхронизма).

4.2. Трехволновые резонансные взаимодействия в консервативных средах с квадратичной нелинейностью.

Графическое определение резонансных волновых триплетов. Вывод уравнений для комплексных амплитуд волн в диспергирующей распределенной LC-линии с нелинейными емкостью и индуктивностью. Ограничения на коэффициенты взаимодействия волн в консервативных средах. Соотношения Мэнли-Роу. Аналогия трехволновых взаимодействий

в равновесных средах с процессами распада и слияния квазичастиц (квантов поля) в квантовой механике.

4.3. Резонансное взаимодействие трех волн во времени.

Распадная (параметрическая) неустойчивость в заданном поле высокочастотной накачки и «нераспадность» низкочастотных волн. Анализ динамики трехволнового взаимодействия в фазовом пространстве. Вырожденный трехволновый процесс (генерация второй гармоники).

4.4. Стационарное резонансное взаимодействие трех волн в пространстве.

Пространственно–временная аналогия. Особенности параметрического усиления встречных волн на примере вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна (ВРМБ) в газе.

4.5. Особенности резонансных трехволновых взаимодействий в неравновесных средах.

Возможность распада низкочастотных волн и взрывная неустойчивость.

4.6. Четырехволновые взаимодействия в консервативных средах.

Два типа четырехволновых резонансов в кубичной среде. Самовоздействие волн и нелинейная дисперсия. Эффективна кубичная нелинейность и средние поля второго порядка по амплитуде волн в квадратичной среде.

4.7. Взаимодействие волн в средах с диссипативной нелинейностью.

Взрывная неустойчивость при резонансном взаимодействии электромагнитных волн положительной энергии в распределенной LC-линии с нелинейным током утечки и ее стабилизация за счет нелинейного затухания. Жесткое возбуждение волн, связанное с наличием взрывной неустойчивости. Аналогия с жестким возбуждением автоколебаний в сосредоточенной системе.

4.8. Конкуренция волн в нелинейных средах с диссипативной кубичной нелинейностью.

Исследование конкуренции двух волн в пространстве и во времени методом фазовой плоскости. Условие установления пространственно неоднородных режимов генерации в резонаторе.

4.9. Резонансное взаимодействие модулированных волн (узких волновых пакетов).

Параметрическая неустойчивость слабых волн в поле прямоугольного импульса накачки. Условие захвата слабых волн импульсом накачки. Пространственно-временная аналогия и захват пучков слабых волн пучками накачки.

5. Длинные нелинейные волны консервативных средах в со слабой дисперсией.

5.1. Уравнение Кортевега-де-Вриза.

Вывод уравнения КдВ на примере электромагнитных волн в LC-линии с нелинейной емкостью и дисперсией в области высоких частот. Скейлинг малых параметров и метод многих масштабов. Стационарные КдВ-солитоны.

5.2. Понятие о методе обратной задачи теории рассеяния (ОЗР).

Асимптотическая структура многосолитонных решений уравнения КдВ.

5.3. Нелинейные волны на мелкой воде.

Малые параметры и схема вывода уравнений Буссинеска и КдВ. Влияние потерь. Волнистая и турбулентная боры на мелкой воде. Уравнение КдВ как модель развития цунами.

5.4. Другие эталонные уравнения для длинных нелинейных волн.

Уравнение Бенджамэна-Оно и одномерные алгебраические солитоны. Уравнение Кадомцева-Петвиашвили и двумерные алгебраические солитоны в среде с положительной дисперсией.

6. Модулированные волны в консервативных нелинейных средах.

6.1. Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ).

Построение одномерного НУШ для изотропной среды с кубичной нелинейностью на примере LC-линии с нелинейной емкостью. Скейлинг пространственно-временных масштабов по отношению к малому параметру нелинейности. Вывод НУШ для среды с квадратичной нелинейностью на модельном примере. Роль средних полей.

6.2. Модуляционная неустойчивость и самофокусировка монохроматических волн.

Обобщение НУШ для неоднородных волновых полей. Самомодуляция и самофокусировка плоских волн в консервативных средах как проявление «четырёхквантовых» распадных процессов. Солитонные решения одномерного НУШ.

7. Самоорганизация, когерентные структуры и пространственно-временной хаос в диссипативных неравновесных средах.

7.1. Хаос и структуры в рамках комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау (КУГЛ).

Построение и условия применимости двумерного КУГЛ для анизотропной активной среды. Когерентные структуры в виде монохроматических бегущих волн и критерий неустойчивости Бенджамена-Фейра-Ньюэлла. Диссипативный предел КУГЛ и понятие градиентной системы. Решение диссипативного уравнения ГЛ в виде «вихрей». Вихри и топологические дефекты. Решение осцилляторного двумерного КУГЛ в виде спиралей. Дырки Нозакки-Бекки и фазовая турбулентность. Пространственно-временной хаос (турбулентность) дефектов и «вихревые стекла».

7.2. Модели формообразования в изотропных средах с неосцилляторной неустойчивостью.

Термоконвекция в подогреваемом снизу слое жидкости. Числа Рэлея и Прандтля. Конвективные валы и нейтральная кривая для них. Уравнение Свифта-Хоэнберга (схема вывода и условия применимости). Отбор в системе N валов, имеющих произвольную пространственную ориентацию. Конвективные структуры с квадратными и шестигранными ячейками. Уравнение Ньюэлла-Вайтхеда-Сегеля. Топологические дефекты и доменные стенки. Перемещение дислокаций в системе искривленных валов. Пенто-гепто-дефекты в решетке шестигранников.

6. Лабораторный практикум

Не предусмотрен.

7. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

7.1. Рекомендуемая литература

ОСНОВНАЯ:

1. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с. (2-ое издание, Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 1999. 560 с.).
2. Рабинович М.И., Езерский А.Б. Динамическая теория формообразования. М.: Янус-К, 1998. 191 С.
3. Карпман В.И. Нелинейные волны в диспергирующих средах. М.: Наука, 1973. 176 с.
4. Сухоруков А.П. Нелинейные волновые взаимодействия в оптике и радиофизике. М.: Наука, 1988. 232 с.
5. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж, Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988.
6. Уизем Дж. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977.
7. Гетлинг А.В. Конвекция Рэлея-Бенара. М.: Эдиториал УРСС, 1999.
8. Скотт Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М.: Сов. радио, 1977. 368 с
9. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Проблемы нелинейной оптики. М.: Изд. ВИНТИ, 1964.
10. Федорченко А.М., Коцаренко Н.Я. Абсолютная и конвективная неустойчивость в плазме и в твердых телах. М.: Наука, 1981.
11. Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т.1. М.: Атомиздат, 1975. 272с.
12. Найфэ А.Х. Методы возмущений. М.: Мир, 1976.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ:

1. Цытович В.Н. Нелинейные эффекты в плазме. М. Наука, 1967. 288 с.
2. Юэн Г., Лэйк Б. Нелинейная динамика гравитационных волн на глубокой воде. Мир, 1987. 182 с.
3. Заславский Г.М. Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984.
4. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса.
5. Бломберген Н. Нелинейная оптика. М.: Мир, 1966. 424с.

6. Бриллюэн Л., Пароди М. Распространение волн в периодических структурах. М. ИЛ, 1959.
7. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1976.
8. Дж. У. Лич. Классическая механика. М: Изд. иностранной литературы, 1961. 173с.
9. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П. Теория волн. М.: Наука, 1979. 384с.
10. Вильгельмссон Х., Вейланд Я. Когерентное нелинейное взаимодействие волн в плазме. М.: Энергоиздат, 1981.
11. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. М.: Мир. 1981. 600с.
12. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. М.: Мир, 1989. 323 с.
13. Солитоны в действии. Сб. под ред К. Лонгрена и Э. Скотта. М.: Мир, 1981
14. Захаров В.Е., Манакон С.В., Новиков С.П. Теория солитонов: Метод обратной задачи. (Под ред. С.П. Новикова). М.: Наука, 1980.
15. Захаров В.Е. Гамильтоновский формализм для волн в нелинейных средах с дисперсией. Изв. ВУЗ-ов, Радиофизика. 1974. Т.17, №4, с.431–453.
16. Aranson I.S., Kramer L. The world of the complex Ginzburg-Landau equation. Reviews of Modern Physics. 2002. V.74, N.1. P.99-143.
17. Chate H., Manneville P. Phase diagram of the two-dimensional complex Ginzburg-Landau equation. Physica A, 1996, V.224. P.348-368.
18. Петвиашвили В.И. Неоднородные солитоны. В кн. Нелинейные волны. М.: Наука, 1979. 360с.
19. Островский Л.А. Нелинейные внутренние волны в океане. В кн. Нелинейные волны. М.: Наука, 1979. 360с.
20. Островский Л.А. Ударные волны и солитоны. Изв. ВУЗов–Радиофизика, 1976. Т.19, №5-6. С.661-690 (тематический выпуск «Нелинейные волны»).