

Физические основы инерциального термоядерного синтеза

М.М.Баско

Учебная задача: Изложить теорию основных физических процессов, лежащих в основе управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием (ИТС), сделав упор на разделы теоретической физики и физики плазмы, не затрагиваемые в общепринятой вузовской программе. Рассказать об основных характеристиках существующих и проектируемых установок ИТС.

Программа курса

Тема 1. Ядерные реакции синтеза. Энергии связи легких ядер, реакции дейтерий-тритиевого цикла, побочные и “перспективные” типы ядерных реакций синтеза.

Тема 2. Ядерные реакции синтеза. Кулоновский барьер, сечения ядерных реакций, фактор Гамова, усредненные по максвелловскому распределению скорости термоядерных реакций.

Тема 3. Процессы переноса энергии в термоядерной плазме. Быстрые частицы переносчики энергии: заряженные частицы, нейтроны и фотоны. Сечения взаимодействия быстрых нейтронов с термоядерной плазмой. Нагрев плазмы термоядерными нейтронами в оптически тонком пределе.

Тема 4. Общие понятия теории кулоновского торможения быстрых заряженных частиц. Вывод формулы для кулоновской тормозной способности в приближении быстрого пролёта и в рамках строгой теории кулоновского рассеяния. Кулоновская расходимость и кулоновский логарифм. Общие закономерности кулоновского торможения быстрых ионов.

Тема 5. Классическая модель Бора для кулоновского торможения, устранение кулоновской расходимости в модели Бора. Вывод формулы Бора для скорости торможения быстрых ионов в пределе высоких скоростей. Предел низких скоростей в модели Бора, эффект Баркаса-Андерсена.

Тема 6. Квантово-механическое обобщение модели Бора, вывод формулы Бете для кулоновского торможения на квантовых осцилляторах. Формула Блоха и её взаимосвязь с формулами Бора и Бете. Обобщение модели квантовых осцилляторов на случай реальных атомов.

Тема 7. Кулоновское торможение в плазме. Вывод классической формулы Бора-Крамерса для торможения в холодной плазме. Квантовая формула Бете-Линдхарда-Ларкина. Вывод формулы для кулоновских потерь в горячей плазме. Предел высоких тепловых скоростей полевых частиц. Кулоновские пробеги заряженных продуктов термоядерных реакций в термоядерной плазме.

Тема 8. Тепловое излучение в термоядерной плазме. Общий формализм для описания фотонного газа. Обмен энергии между фотонами и свободными электронами за счёт комптоновского рассеяния. Уравнение Компанейца и скорость комптоновского охлаждения термоядерной плазмы.

Тема 9. Процессы истинного поглощения и испускания фотонов в плазме; индуцированное испускание и закон Кирхгофа. Коэффициенты тормозного и фотопоглощения. Скорость тормозного охлаждения оптически тонкой плазмы. Релятивистски инвариантное уравнение переноса излучения в приближении ЛТР.

Тема 10. Теория электронной теплопроводности в немагнитной плазме. Гидродинамическое описание термоядерной плазмы. Система уравнений радиационной гидродинамики в трёхтемпературном приближении для расчёта термоядерных мишеней инерциального синтеза.

Тема 11. Основные критерии и режимы термоядерного горения. Критерий Лоусона и температура зажигания. Критерий инерциального удержания, вычисление доли выгорания термоядерного топлива при изотермическом разлёте. Параметр выгорания для сферической массы топлива. Необходимость сверхвысокого сжатия топлива.

Тема 12. Искровая и объёмная моды термоядерного поджига. Теория термоядерной искры в дейтерий-тритиевом топливе; квази-изобарический и квази-изохорический варианты термоядерной искры. Влияние ключевых физических процессов на минимальный размер термоядерной искры. Концепция “быстрого поджига”. Различные режимы распространения волны термоядерного горения.

Тема 13. Общая теория сверхплотного гидродинамического сжатия. Изменение энтропии при сжатии. Сжатие в падающей и отражённой ударных волнах. Предельное сжатие при схождении на центр цилиндрической и сферической ударных волн. Автомодельное решение Гудерлея.

Тема 14. Изэнтропическое сжатие в центрированной волне сжатия и предельная степень сжатия сплошной массы газа при ограниченном внешнем давлении. Принципиальная возможность неограниченного сжатия при переходе к тонким цилиндрическим и сферическим оболочкам. Общие скейлинги для имплозии тонких оболочек. Лимитирующая роль Рэлей-Тэйлоровской неустойчивости и неоднородностей внешнего давления. Принципиальная схема сжатия в мишени NIF (США).

Тема 15. Действующие и проектируемые установки ИТС. Основные характеристики и достижения установок NOVA (США), OMEGA (США), GEKKO-XII (Япония), Искра-5 (Россия). Параметры и основные цели проектируемых установок NIF (США), LMJ (Франция), Искра-6 (Россия).

Литература

Основная

1. 532.5 Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966, 1963.
3-50
2. 621.039 Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный Д95 термоядерный синтез. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 3.* 533 Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. Физика Б27 лазерного термоядерного синтеза. М.: Знание, 1988.