

Теория сверхновых звезд

В.П. Утробин

Часть I.

1. Введение

Происхождение термина "сверхновые звезды".

Основные наблюдательные данные: спектры и кривые блеска.

Классификация сверхновых.

Статистика вспышек сверхновых.

Остатки вспышек сверхновых и их эволюция.

Галактические сверхновые.

Крабовидная туманность, Кассиопея А, остаток сверхновой Кеплера, остаток сверхновой Тихо Браге.

Старые остатки вспышек сверхновых. Петля Лебедя.

Звездные остатки вспышек сверхновых.

Наблюдательные ограничения на параметры взрывающихся звезд.

2. Спектры сверхновых

Формирование непрерывного спектра.

Образование спектральных линий.

Коэффициент поглощения в линии.

Перенос излучения в линии.

Перенос излучения в движущихся атмосферах.

Теория Соболева.

3. Радиационная гидродинамика

Уравнения радиационной гидродинамики.

Диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности.

Уравнения радиационной гидродинамики в моментном приближении.

Многогрупповое приближение.

Формальное решение уравнения переноса.

Диффузионный и волновой пределы.

Моменты уравнения переноса.

Условие лучистого равновесия.

Релятивистские уравнения радиационной гидродинамики.

4. Кривые блеска сверхновых

Внутренняя и внешняя задачи гидродинамического моделирования вспышки сверхновой.

Строение предсверхновых звезд.

Мгновенный взрыв и медленное выделение энергии.

Генерация ударной волны и моделирование взрыва сверхновой.

Свойства радиоактивного распада $Ni-56 \rightarrow Co-56 \rightarrow Fe-56$.

Аналитическое моделирование кривой блеска сверхновой.

Гидродинамические модели.

Выход ударной волны на поверхность предсверхновой.

Волна охлаждения и рекомбинации.

5. Моделирование вспышек сверхновых

Сверхновые типа Ia.

Сверхновые типа Ib и Ic.

Сверхновая 1987A в Большом Магеллановом Облаке.

Сверхновые типа III.

Сверхновая 1993J в галактике M81.

Основные выводы из моделирования вспышек сверхновых.

Часть II.

6. Предсверхновые

Структура массивных ($M \geq 10M_{\odot}$) коллапсирующих сверхновых на поздних стадиях эволюции одиночных звёзд.

Железные ядра звёзд и их неустойчивость к гравитационному коллапсу.

Диаграмма центральных плотностей и температур ($\rho_c - T_c$) с использованием уравнений состояния звёздной плазмы.

7. Ранняя гидродинамическая теория коллапса

Одномерная сферически - симметричная гидродинамическая теория коллапса железных ядер предсверхновых.

Автомодельные решения коллапса до и после отскока. Формирование протонейтронной звезды и её барионная масса ($\approx 1M_{\odot}$).

Затухание отражённой ударной волны с превращением её в аккреционную ударную волну.

Учёт нейтринных потерь энергии и возникновение нейтриносферы после отскока.

Структура центральной области протонейтронной звезды и её эволюция за первые 100 мс после отскока.

8. Теория нейтринного сигнала коллапса

Характеристики нейтринного сигнала в зависимости от времени, от энергии нейтрино, от сорта нейтрино.

Приближение нейтринной теплопроводности внутри нейтриносферы.

Сопоставление теории нейтринного сигнала с наблюдением нейтринного импульса для SN 1987A на подземных нейтринных обсерваториях.

9. Неоднородный характер взрыва сверхновой

Неудача одномерной гидродинамической теории коллапсирующих сверхновых в объяснении механизма взрыва оболочки сверхновой.

От трудностей в энергетических характеристиках к окончательному нарушению сферически - симметричного механизма взрыва.

Два пути неоднородной теории взрыва: 1) конвективное движение у протонейтронных звёзд от нейтриносферы до фронта аккреционной ударной волны; 2) ротационные неустойчивости быстро вращающихся протонейтронных звёзд.

10. Численные модели нейтринно - конвективного механизма взрыва коллапсирующих сверхновых

Трудная проблема "оживления" аккреционной ударной волны с превращением её в расходящуюся ударную волну, характерную для взрыва сверхновых с энергией $\sim 10^{51}$ эрг.

Разнообразие коллапсирующих сверхновых: типы SN II, SN III, SN Ib, SN Ic (90% всех сверхновых).

Трудности объяснения наблюдаемой у SN 1987A асимметрии взрыва.

Недостаточность скоростей вылета пульсаров (нейтронных звёзд – звёздных остатков сверхновых).

Значительная чувствительность к методическим факторам численных моделей.

11. Ротационный сценарий взрыва коллапсирующих сверхновых

Сценарный подход в теоретической астрофизике.

Качественная цепочка последовательных стадий ротационного механизма:

а) фрагментация протонейтронной звезды на две нейтронные звезды; б) параметры двойной системы нейтронной звезды после фрагментации; в) эволюция системы со сближением нейтронных звёзд под действием гравитационного излучения; г) обмен массами после заполнения маломассивной нейтронной звездой полости Роша и последующая эволюция; д) взрыв нейтронной звезды с критической массой $0,1M_{\odot}$ на орбите и газодинамическая модель нецентрального взрыва.

Объяснение указанных выше эффектов SN 1987A, а также массы синтезированного радиоактивного никеля ($\sim 0,08 M_{\odot}$). Недостаточность полной энергии взрыва.

Предсказание двухстадийных гравитационных и нейтринных импульсов.

12. Термоядерные сверхновые

Структура маломассивных ($M < 10M_{\odot}$) термоядерных сверхновых на поздних стадиях эволюции в составе тесных двойных систем звёзд.

Сверхновые типа Ia, с полным отсутствием водорода в спектрах (10% всех сверхновых).

Предсверхновые – практически голые ядра звёзд, в первую очередь углеродно - кислородные. Гидростатически равновесные звёзды.

Физика термоядерного взрыва углеродно - кислородных ядер. Два типа режима горения: дефлаграция и детонация, кинетика бета - процессов в сильно вырожденном веществе.

Сопоставление с наблюдениями вспышек SN Ia и с космическими распространённостями нуклидов средних атомных чисел железного пика элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.С. Шкловский. Сверхновые звезды. М.: Наука, 1976.
2. П.И. Бакулин, Э.В. Кононович, В.И. Мороз. Курс общей астрономии. М.: Наука, 1977.
3. В.В. Соболев. Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 1975.

4. Я.Б. Зельдович и Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
5. Д. Михалас. Звездные атмосферы. М.: Мир, 1982.
6. В.С. Имшенник и Д.К. Надежин. Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом Облаке: наблюдения и теория. УФН, 1988, том 156, стр. 561.
7. К.У. Аллен. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977.