

Осн. наблюдаемыми характеристиками звезды являются её светимость L (при известном расстоянии) и темп-ра T_s поверхности звезды, определяемая по распределению энергии в спектре. Приблизённо T_s равна эффективной температуре T_e , Э. з. представляется в виде линии (трека) на плоскости $\lg L, \lg T_s$ (т. е. на Герципрунга—Ресселла диаграмме, ГРД).

Введение

Звёзды рождаются из плотных межзвёздных облаков, в к-рых развиваются тепловые и гидродинамич. неустойчивости (см. *Звездообразование*). Следствием этих неустойчивостей является гидродинамич. коллапс части облака, заканчивающийся образованием гравитационно связанного объекта — протозвезды. Коллапс происходит неоднородно. Быстрое сжатие центр. части приводит к образованию гидростатически равновесного ядра массой $\sim 0,01 M_\odot$ (для полной массы коллапсирующего облака $1 M_\odot, M_\odot$ — масса Солнца), а затем следует длительная стадия аккреции на него оставшейся части облака (оболочки). Время образования протозвезды от начала коллапса составляет 10^5 — 10^6 лет. Протозвёзды светят за счёт выделения гравитац. энергии при сжатии. Нек-рый вклад в светимость дают также ядерные реакции с участием ${}^2\text{D}, {}^7\text{Li}, {}^9\text{Be}$ [${}^2\text{D}$ (р, γ) ${}^3\text{He}$, ${}^7\text{Li}$ (р, α) ${}^4\text{He}$, ${}^9\text{Be}$ (р, α) ${}^6\text{Li}$], малые кол-ва к-рых образовались на более ранних этапах эволюции Вселенной (см. *Нуклеосинтез*). По мере увеличения массы и сжатия темп-ра центр. областей ядра протозвезды растёт. Когда она достигает значений $\sim 10^7$ К (что возможно для звёзд с массой, превышающей $\sim 0,1 M_\odot$), начинается горение водорода (термоядерные реакции превращения водорода в гелий). Потери энергии на излучение компенсируются энергией, выделяющейся при горении водорода. Звезда выходит на гл. последовательность (ГП) ГРД. Подробнее о нач. этапе Э. з. см. в ст. *Протозвёзды*.

Образование звёзд сопровождается истечением вещества оболочки, так что масса звезды на ГП меньше нач. массы коллапсирующего облака. Наблюдения показывают, что на стадии протозвезды скорость потери массы у звёзд с $M = (1,5$ — $2) M_\odot$ составляет $\sim 10^{-8} M_\odot/\text{год}$ (звёзды типа Т Тельца). За время прихода на ГП (от $6 \cdot 10^6$ лет для $M = 2,25 M_\odot$ до $2 \cdot 10^7$ лет для $M = 1,5 M_\odot$) масса звезды уменьшится на 2—13%. Светимость звёзд быстро растёт с увеличением их массы (см. *Масса — светимость зависимость*). У звёзд с $M > 9 M_\odot$ светимость на стадии аккреции оказывается столь большой, что вызывает мощное истечение вещества, и масса рождающейся звезды M оказывается значительно меньше нач. массы M_0 коллапсирующего облака: $M/M_0 \approx 3 (M_0/M_\odot)^{1/2}$ для $M > 9 M_\odot$.

Звезда, излучающая за счёт выделения ядерной энергии, медленно эволюционирует по мере изменения её хим. состава. Наиб. время звезда проводит на стадии, когда в её центр. области горит водород. Эта стадия наз. ГП на ГРД. Б. ч. наблюдаемых звёзд расположена вблизи ГП. Большая длительность этой стадии связана, во-первых, с тем, что водород является самым калорийным ядерным топливом. При образовании одного ядра гелия (альфа-частицы) из 4 ядер водорода выделяется ≈ 26 МэВ, а при образовании углерода ${}^{12}\text{C}$ из 3 альфа-частиц выделяется всего $\approx 7,3$ МэВ, т. е. выделение энергии на единицу массы в 10 раз меньше. Во-вторых, звёзды на ГП значительно меньше излучают, чем на последующих стадиях эволюции, и в итоге оказывается, что время жизни на ГП на два—три порядка больше, чем время всей последующей эволюции. Соответственно кол-во звёзд на ГП существенно превышает число более ярких звёзд.

После выгорания водорода в центре звезды и образования гелиевого ядра выделение ядерной энергии в нём прекращается и ядро начинает интенсивно сжиматься. Водород продолжает гореть в тонкой оболочке, окружающей гелиевое ядро (т. н. слоевой источник). Оболочка при этом расширяется, светимость звезды растёт, поверхностная темп-ра уменьшается, и звезда становится красным гигантом (в случае менее массивных звёзд) или сверхгигантом

(красным или жёлтым) в случае более массивных звёзд (см. *Красные гиганты и сверхгиганты*). Процесс последующей эволюции определяется в основном массой звезды M .

В звёздах с $0,8 M_\odot < M < 8 M_\odot$ ядерное горение заканчивается после образования углеродного (${}^{12}\text{C}$) с примесью кислорода (${}^{16}\text{O}$) звёздного ядра массой ок. $1 M_\odot$. После сброса всей оболочки, окружающей это ядро, оно превращается в «мёртвую» звезду — белый карлик.

Массивные звёзды ($M > 10 M_\odot$) проходят эволюц. путь горения вплоть до образования звёздного ядра из самого стабильного (макс. энергия связи на нуклон) элемента ${}^{56}\text{Fe}$. В таком ядре выделение ядерной энергии невозможно, рост давления не компенсирует рост сил тяготения при росте плотности и медленное квазистатич. сжатие сменяется быстрым коллапсом — происходит потеря гидродинамич. устойчивости и взрыв *сверхновой звезды*. При быстром сжатии до плотности ρ , близкой к плотности вещества в атомном ядре, выделяется огромное кол-во гравитац. энергии — в ≈ 20 раз больше, чем за всё время ядерной эволюции, длящейся десятки млн. лет. Подавляющая часть этой энергии уносится нейтрино. После взрыва и сброса оболочки образуется остаток в виде *нейтронной звезды* — второй тип «мёртвых» звёзд.

В звёздах промежуточной массы ($M \approx 8 M_\odot$) образуется вырожденное углеродно-кислородное ядро, масса к-рого столь велика, что оно уже не может существовать в виде белого карлика, а продолжает сжиматься до тех пор, пока рост темп-ры и плотности не приведёт к быстрому (взрывному) сторанию углерода (углеродная вспышка) и полному разлёту всей звезды. Этот разлёт также наблюдается как взрыв сверхновой, на месте к-рого не остаётся никакого остатка.

Наконец для самых массивных звёзд [$M > (40$ — $50) M_\odot$] коллапс может не остановиться на стадии нейтронной звезды, а продолжиться дальше, образуя релятивистский объект — *чёрную дыру*. Наблюдат. проявления процесса образования чёрной дыры пока не известны. Возможно, рост светимости здесь столь незначителен, что такой коллапс трудно обнаружить («беззвучный» коллапс). Однако даже в этом случае коллапс должен сопровождаться мощным всплеском нейтринного излучения, почти как при образовании нейтронной звезды, и, кроме того, исчезнет (погаснет) звезда, существовавшая до начала коллапса.

На протяжении практически всей эволюции звезда устойчива относительно разл. типов возмущений. Наиб. важны два типа возмущений: гидродинамические и тепловые. Гидродинамич. возмущения связаны со случайными возмущениями плотности и размера звезды. Устойчивость относительно таких возмущений обеспечивается тем, что при сжатии (расширении) силы давления P растут (падают) быстрее сил тяготения. Это приводит к тому, что при случайном сжатии или расширении возникает сила, возвращающая звезду к её равновесному состоянию. Изменение давления при быстрых процессах происходит почти адиабатически, поэтому устойчивость определяется показателем адиабаты $\gamma = (\partial \ln P / \partial \ln \rho)_s$, к-рый должен быть больше $4/3$ (S — уд. энтропия; см. в ст. *Гравитационный коллапс*). Т. к. давление вещества в звезде определяется смесью идеального газа с излучением, $\gamma > 4/3$ и, как правило, звёзды гидродинамически устойчивы. Примером неустойчивой звезды может служить предсверхновая с железным ядром, в к-ром рост давления при сжатии недостаточен. Значит, часть энергии тратится на фоторасщепление железа с образованием нейтронов, протонов и альфа-частиц, а γ существенно уменьшается и может приближаться к единице.

Устойчивость относительно тепловых возмущений обеспечивается отрицательной теплоёмкостью звезды. Отрицат. теплоёмкость можно объяснить на основе теоремы вириала. В применении к звёздам, к-рые описываются ур-нием состояния идеального газа с показателем адиабаты $5/3$, эта теорема гласит, что в равновесии тепловая энергия звезды составляет половину абс. величины её гравитац. энергии (отрицательной), т. е. полная энергия звезды отрицательна и равна половине гравитационной.