Потери энергии звёзд на излучение компенсируются ядерным энерговыделением. *Эволюция звёзд* может быть охарактеризована как смена источников энерговыделения. Звёзды могут проходить стадии термоядерного горения водорода, гелия, углерода, кислорода, неона и т. д. до образования ядер из смеси изотопов Fe и Ni. Если конкретная задача М. з. требует знания детального хим. состава, то на каждом интервале времени решаются системы ур-ний типа (1), учитывающие десятки изотопов и ядерных реакций. При расчёте эволюции звёзд в энерговыделении необходимо учесть изменение внутр. энергии со временем и работу сил давления (т. н. гравитационное энерговыделение ε_g):

$$\varepsilon_g = -p\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{1}{\rho}\right) - \frac{\partial u}{\partial t}.$$

На поздних стадиях эволюции, при $T \gtrsim 10^8$К, важную роль начинают играть потери энергии, связанные с генерацией *нейтрино* в фотонейтринном процессе, при *аннигиляции* пар e^-e^+, распаде *плазмонов.*

Среди др. процессов, к-рые рассматриваются при М. з.,— конвективный перенос энергии (адиабатический и неадиабатический), изменение массы звёзд из-за *звёздного ветра* и (или) при обмене веществом в тесных двойных системах.

Путём М. з. удаётся воспроизвести осн. параметры б. ч. наблюдаемых звёзд, оценить численность звёзд с разл. характеристиками, сконструировать эволюц. сценарии, связывающие между собой наблюдаемые объекты разных классов. Наиб. важным и принципиальным результатом, достигнутым на основании М. з., следует считать объяснение особенностей диаграммы Герцшпрунга — Ресселла для звёздных скоплений. Совр. результаты моделирования самой изученной звезды — Солнца приведены на рисунке.

Хотя для объяснения характеристик большинства звёзд вполне достаточно стационарных сферически-симметричных моделей, есть ряд проблем, для решения к-рых этого приближения недостаточно; напр., эволюция протозвёзд, взрывные процессы на звёздах, вращение и пульсация звёзд. В этих случаях решаются системы гидродинамич. ур-ний в одномерном или двух- и трёхмерном приближениях с учётом переноса энергии. Следует, однако, отметить, что неодномерные расчёты постационарных процессов находятся (1988) на грани возможностей ЭВМ.

Лит.: Внутреннее строение звезд, под ред. Л. Аллера, Д. Б. Мак-Лафлина, пер. с англ., М., 1970; Зельдович Я. Б., Блинников С. И., Шакура Н. И., Физические основы строения и эволюции звезд, М., 1981; Тассуль Ж.-Л., Теория вращающихся звезд, пер. с англ., М., 1982; Кокс Д. П., Теория звездных пульсаций, пер. с англ., М., 1983; Бисноватый-Коган Г. С., Физические вопросы теории эволюции, М., 1989. *Л. Р. Юнгельсон.*

МОДУЛИ УПРУГОСТИ — величины, характеризующие упругие свойства материала. В случае малых деформаций упругого тела связь между компонентами напряжения σ_{11}, σ_{22}, ..., σ_{31} и компонентами относит. деформации ε_{11}, ε_{22}, ..., ε_{31} в нек-рой точке тела представляется шестью линейными соотношениями (см. *Гука закон*):

$$\begin{array}{l}\sigma_{11} = g_{11}\varepsilon_{11} + g_{12}\varepsilon_{22} + g_{13}\varepsilon_{33} + g_{14}\varepsilon_{12} + g_{15}\varepsilon_{23} + g_{16}\varepsilon_{31}, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (*) \\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ \sigma_{31} = g_{61}\varepsilon_{11} + g_{62}\varepsilon_{22} + g_{63}\varepsilon_{33} + g_{64}\varepsilon_{12} + g_{65}\varepsilon_{23} + g_{66}\varepsilon_{31}.\end{array}$$

Коэф. g_{11}, g_{12}, ..., g_{66} наз. М. у. и имеют размерность напряжения, т. е. единицы силы, отнесённой к единице площади, поскольку ε_{ij} — безразмерные величины.

Физ. смысл М. у. выявляется при рассмотрении осн. элементарных типов напряжённого состояния упругого тела: одностороннего нормального напряжения, чистого сдвига и всестороннего нормального напряжения. Для каждого из этих напряжённых состояний зависимость между напряжением и соответствующей ему деформацией определяется простейшей ф-лой: напряжение равно произведению соответствующей деформации на М. у. Одностороннему нормальному напряжению σ, возникающему при простом растяжении (сжатии), соответствует в направлении растяжения м о д у л ь   п р о д о л ь н о й   у п р у г о с т и E (модуль Юнга). Он равен отношению нормального напряжения к относит. удлинению, вызванному этим напряжением в направлении его действия: $E = \sigma/\varepsilon$ и характеризует способность материалов сопротивляться деформации растяжения.

Напряжённому состоянию чистого сдвига, при к-ром по двум взаимно ортогональным площадкам действуют только касат. напряжения τ, соответствует м о д у л ь   с д в и г а G. По величине он равен отношению касат. напряжения τ к величине угла сдвига γ, определяющего искажение прямого угла между плоскостями, по к-рым действуют касат. напряжения: $G = \tau/\gamma$ и представляет способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении его объёма.

Всестороннему равному нормальному напряжению σ, возникающему при гидростатич. давлении, соответствует м о д у л ь   о б ъ ё м н о г о   с ж а т и я K (объёмный М. у.). Он равен отношению величины нормального напряжения к величине относит. объёмного сжатия, вызванного этим напряжением: $K = \sigma/\theta$ (где $\theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ — относит. изменение объёма) и характеризует способность материала сопротивляться изменению его объёма, не сопровождающемуся изменением формы.

К пост. величинам, характеризующим упругие свойства материала, относится коэф. Пуассона ν. Величина его равна отношению абс. значения относит. поперечного сжатия сечения ε' (при одностороннем растяжении) к относит. продольному удлинению ε, то есть $\nu = |\varepsilon'|/\varepsilon$. Величины М. у. и коэф. Пуассона для нек-рых материалов приведены в табл. 1. Для однородного изотропного тела, напр. мелкозернистого металлич. поликристалла с беспорядочной ориентировкой зёрен (т. е. не имеющего текстуры), М. у. и коэф. Пуассона одинаковы по всем направлениям. Величины E, G, K и ν связаны соотношениями:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{E}{3(1-2\nu)}.$$

Следовательно, только две из них являются независимыми величинами и упругие свойства в случае изотропного тела определяются двумя упругими постоянными.

Табл. 1.

Наименование материала	$E \cdot 10^{-3}$, МН/м²	$G \cdot 10^{-3}$, МН/м²	$K \cdot 10^{-3}$, МН/м²	ν
Алюминий	71,9	27,2	74,6	0,24
Магний	45,2	17,7	33,9	0,28
Медь	125	46,4	142	0,34
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	100,6	37,3	111,8	0,35
Железо (отожжённое)	211,4	81,6	169,8	0,29
Сталь низкоуглеродистая	211,9	82,2	169,2	0,29
Сталь отожжённая (0,75%)	210,0	81,1	168,7	0,29
Сталь закалённая . .	201,4	77,8	165,0	0,29
Молибден	324,8	125,6	261,2	0,29
Цинк	104,5	41,9	69,4	0,25
Стекло	56	22	18,7	0,2
Гранит	49	—	—	—
Каучук	0,08	—	—	0,47

В случае анизотропного материала, напр. монокристаллов, E, G и ν принимают разные значения в разл. кристаллографич. направлениях и их величины могут изменяться в широких пределах. Для монокристаллов М. у. для разных направлений иногда наз. постоянными упругости. Величины М. у. для нек-рых металлич. монокристаллов приведены в табл. 2.