

фектом Доплера. При этом из ф-лы Хаббла следует линейное соотношение между L , c и расстоянием до галактики: $v_r \approx H_0 D$, интерпретируемое в рамках нестационарной космологич. модели (А. А. Фридман, 1922) как локальное следствие общего расширения Вселенной (см. *Космология*). В. Ю. Терещиж.

ЛУЧISTОЕ РАВНОВЕСИЕ в звёздах — термин, широко используемый в теории строения звёзд для обозначения механич. равновесия всей звезды (или отдельных её частей) в условиях, когда энергия переносится только излучением (см. *Перенос излучения*).

Распространение излучения в звёздном веществе описывается ур-нием переноса, к-рое устанавливает баланс между изменением интенсивности излучения во времени и пространстве и процессами испускания, поглощения и рассеяния фотонов. В самом общем виде уравнение переноса, учитывающее все особенности этих процессов, приходится решать лишь для самых внеш. разреженных слоёв звезды (для *звёздных атмосфер*), где формируется спектральный состав покидающего звезду излучения. В глубоких внутр. слоях звезды, где сосредоточена осн. часть её массы, с огромной точностью применимо более простое (асимптотич.) решение ур-ния переноса в приближении лучистой теплопроводности.

Во внеш. слоях полностью равновесной звезды обычно отсутствуют к.-л. источники энергии и поэтому L , r любого элементарного объёма звёздного вещества означает равенство между значениями поглощённой и излучённой в единицу времени лучистой энергии. В противном случае происходило бы нагревание или охлаждение звёздного вещества и характеристики звезды изменялись бы со временем. Для самых внешних слоёв звезды, к-рые в первом приближении можно считать плоскопараллельными, из равенства между поглощаемой и излучаемой энергиями следует постоянство абс. величины вектора потока лучистой энергии H в пространстве, поскольку вещество звезды лишь передаёт энергию от внутр. слоёв к наружным, переизлучая её и оставаясь при этом в стационарном состоянии. Для сферически-симметрич. звезды постоянство H при заданном его значении и дополнит. заданных значений полной массы и радиуса звезды, а также хим. состава её внеш. слоёв позволяет с помощью ур-ния гидростатич. равновесия рассчитать строение атмосферы звезды и спектр испускаемого ею излучения. Конкретные значения H и радиуса звезды (с заданными полной массой и хим. составом) находятся из решения задачи о строении всей звезды (т. е. путём построения модели звезды; см. *Моделирование звёзд*).

Внутри звёзд происходит интенсивное освобождение энергии в *термоядерных реакциях*. При L , r звёздных недр поглощаемая лучистая энергия уже не равна в точности испускаемой: излучённая энергия немного превышает поглощённую — ровно настолько, чтобы отвести излишек энергии, выделенной в термоядерных реакциях. В результате абс. величина H уже не постоянна, как во внеш. слоях звезды, а изменяется с расстоянием от центра звезды: дивергенция H ($\text{div } H$) в точности равна энергии, выделяемой посредством термоядерных реакций в единицу времени в единице объёма. При этом звезда находится одновременно как в механич. равновесии (баланс между силами давления и силами гравитации), так и в тепловом равновесии (точное равенство между скоростями выделения и отвода энергии).

На определ. стадиях *эволюции звёзд* (относительно коротких по времени) термоядерные реакции оказываются неэффективными, но звёзды всё же светят за счёт запасов тепловой и гравитационной энергий. В таких условиях звезда находится лишь в механич. равновесии, но не в тепловом равновесии. Поток лучистой энергии оказывается непостоянным, вообще говоря, не только в недрах звезды, но и в её поверхностных слоях.

Матем. формулировка L , r основывается на общем ур-нии сохранения энергии, вытекающем из *первого начала термодинамики*:

$$\frac{d\mathcal{E}}{dt} + p \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{div } F + \varepsilon, \quad (1)$$

где \mathcal{E} и p — суммарные уд. энергия и давление вещества и излучения соответственно, $V=1/\rho$ — уд. объём, ρ — плотность вещества, F — полный поток энергии, ε — уд. энерговыделение ($\varepsilon\rho$ — энерговыделение единицы объёма), d/dt — полная (субстанциональная) производная по времени. Состояние L , r соответствует тому случаю, когда вместо F в (1) можно подставить поток лучистой энергии H . Связь между H и физ. параметрами среды (температурой, плотностью и др.) устанавливается ур-нием переноса излучения. Напр., в широко используемом в теории внутр. строения звёзд приближении лучистой теплопроводности

$$H = -\frac{4\sigma}{3\kappa\rho} \text{grad } (T^4), \quad (2)$$

где σ — *Стефана — Больцмана постоянная*, а κ — *непрозрачность* звёздного вещества, зависящая, вообще говоря, от T и ρ (непрозрачность определяет ср. длину пробега фотонов $l=1/\kappa\rho$). Случаю полного (теплого и механич.) равновесия звезды соответствует равенство нулю производных по времени в левой части (1). При отсутствии теплового равновесия эти производные уже не равны нулю и левая часть (1) фактически определяет закон выделения тепловой и гравитационной энергий. Особенно большое значение такой источник энергии приобретает на стадиях эволюции, предшествующих включению термоядерных реакций горения водорода (перед выходом звезды на гл. последовательность *Герцишпрунга — Расселла диаграммы*), когда он действует по всему объёму звезды. Его роль очень велика также во внеш. слоях звёзд в случае *аккреции* на них вещества (напр., в *тесных двойных звёздах*).

L , r нарушается, когда становятся эффективными способы передачи энергии, отличные от переноса излучения, либо когда отсутствует механич. равновесие звезды. Осн. конкурирующим с излучением механизмом переноса энергии является *конвекция*. Если градиент температур достаточно большой, то L , r оказывается конвективно неустойчивым и в звезде возникают области, в к-рых энергия переносится конвективными токами. Такие области наз. зонами конвективного равновесия. У массивных звёзд гл. последовательности с массой $M \geq M_\odot$ имеются конвективные ядра, а у звёзд с массой $M \leq M_\odot$ ($M_\odot = 1,99 \cdot 10^{30}$ кг — масса Солнца) конвективные ядра отсутствуют и внутр. слой находится в L , r , но возникают конвективные оболочки. Имеются также звёзды с конвективными ядром и оболочкой, разделёнными промежуточной зоной L , r . (примером могут служить красные гиганты).

В плотном веществе *белых карликов* осн. механизмом передачи энергии оказывается не перенос излучения, а теплопроводность *вырожденного газа* электронов. При этом, в отличие от случая конвекции, ур-ния, описывающие строение звезды, не претерпевают принципиальных изменений по сравнению со случаем L , r , поскольку полный поток энергии F в (1), равный сумме потоков лучистой энергии и энергии, переносимой электронной теплопроводностью, можно формально записать в виде (2), подобрав соответствующим образом выражение для κ .

При отсутствии механич. равновесия (что имеет место в нестационарных звёздах: новых, сверхновых, вспыхивающих и др.) энергия в основном переносится в результате макроскопич. движения звёздного вещества, в частности посредством распространения звуковых и ударных волн.