

## II. ИЗ НАСЛЕДИЯ Н. А. КОЗЫРЕВА: МАЛОИЗВЕСТНЫЕ РАБОТЫ

*Н. А. Козырев*

### **ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД НА ОСНОВЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ<sup>1</sup>**

С физической точки зрения, наиболее существенными характеристиками звезд, которые могут быть получены из наблюдений, являются абсолютная яркость (светимость) звезды, или полное количество энергии, излучаемое звездой в единицу времени,  $L$ , масса звезды  $M$  и поверхностная температура  $T$ . Вместо поверхностной температуры в ряде случаев удобнее пользоваться радиусом звезды  $R$ , который получается с помощью  $L$  и  $T$ , по закону Стефана–Больцмана. Между этими тремя величинами  $L$ ,  $M$  и  $R$ , как показывает обширный наблюдательный материал, существуют попарные соотношения: 1) соотношение масса–светимость и 2) зависимость  $L$  от спектрального типа звезды, или зависимость  $L$  от  $R$  — знаменитая диаграмма Ресселла–Гертцшпрунга. Первая зависимость выражена наиболее четко и имеет простое аналитическое представление: приблизительно светимость звезды пропорциональна кубу массы. Что касается второй зависимости, то существование нескольких звездных последовательностей (основной, гигантов, белых карликов и т. д.) делает эту зависимость многозначной и более сложной. Звезды существуют в течение столь длительного срока, что большинство из них должно находиться в состоянии равновесия. Поэтому из существования упомянутых двух зависимостей следует заключить, что при заданной массе звезда может быть в равновесии только в том случае, если она будет иметь совершенно определенную светимость

---

<sup>1</sup> Опубликовано в «Вестн. Ленингр. ун-та». 1948. № 11. — С. 32–35.  
© Н. А. Козырев, 2008.

и некоторые определенные значения радиуса. Таким образом, существование двух фундаментальных зависимостей астрофизики должно быть объяснено теорией внутреннего строения звезд как теорией равновесных конфигураций. Весьма затруднительно а priori получить правильное представление о состоянии материи и энергии внутри звезд. Можно рассчитать большое количество звездных моделей при различных гипотезах и все же пройти мимо единственно правильной. Поэтому представляется целесообразным обратиться к задаче, выясняя постепенно условия, существующие в звездных недрах, путем анализа наблюдаемых закономерностей. При такой постановке задачи условия внутри звезд становятся предметом исследования, а не предметом априорных суждений. Прежде всего, необходимо совершенно ясно представить себе, в силу каких обстоятельств условия равновесия приводят к двум упомянутым выше эмпирическим зависимостям между  $L$ ,  $M$  и  $R$ .

Находясь в равновесии, звезда должна удовлетворять условиям механического равновесия и равновесия теплового. В силу первого условия давление газа внутри звезды должно уравнивать вес вышележащих слоев. Средняя плотность звезды определяется из наблюдаемых  $M$  и  $R$ . Таким образом, первое условие позволяет определить с помощью  $M$ ,  $R$  и среднее давление газа в звезде. Термодинамически, вообще говоря, должна существовать зависимость между давлением, плотностью и температурой — так называемое уравнение фазового состояния материи. В случае, например, идеального газа (при малом лучевом давлении), разделив полученное выражение для давления на среднюю плотность, можно получить простое выражение для средней температуры звезды, деленной на средний молекулярный вес, в зависимости от  $M$  и  $R$ . С другой стороны, при любом энергетическом транспорте значение температуры внутри звезды будет определять поток выходящей энергии. Поскольку светимость звезды определяется произведением этого потока на площадь поверхности звезды, мы получаем из одного условия механического равновесия первую зависимость:

$$f_1(L, M, R) = 0.$$

В случае вырожденного газа  $L$  из этой зависимости выпадает. Действительно, при полном вырождении в уравнение фазо-

вого состояния температура не входит, и условие механического равновесия сразу приводит к простой зависимости:  $\varphi(M, R) = 0$  — соотношению масса–радиус. Температура внутри звезды будет определяться только условием энергетического транспорта и может быть вычислена в этом случае в зависимости от  $L$  и  $M$ .

Второе условие теплового равновесия требует, чтобы светимость звезды равнялась средней производительности источников энергии в одном грамме звездной материи, умноженной на массу звезды. Без всяких специальных предположений о природе источников звездной энергии мы должны считать, что их интенсивность зависит некоторым образом от физических условий внутри звезды; иначе будет невозможной устойчивость равновесной конфигурации. Но физические условия внутри звезды уже связаны с наблюдаемыми параметрами звезд, поэтому требование теплового равновесия всегда приведет нас ко второй зависимости:

$$f_2(L, M, R) = 0.$$

Конкретный вид зависимости  $f_1(L, M, R) = 0$  легко получить для простейшего случая звезды, состоящей из идеального газа. В этом случае энергетический транспорт в звезде будет осуществляться лучеиспусканием, за исключением некоторых зон конвективной неустойчивости, где возможна свободная конвенция, роль которой легко учесть теоретически. В такой задаче условие механического равновесия при малом лучевом давлении приводит к наблюдаемому выражению — светимость пропорциональна кубу массы звезды — с той разницей, что коэффициент этого выражения оказывается пропорциональным четвертой степени среднего молекулярного веса, обратно пропорционален коэффициенту поглощения света и практически совершенно не зависит от характера распределения источников звездной энергии. Поэтому наиболее простое согласование теоретической зависимости с наблюдаемой получается предположением о постоянстве коэффициента поглощения и химического состава во всех звездах. Важно отметить, что при значительном лучевом давлении то же рассуждение приводит к выражению светимости просто пропорциональной массе. Таким образом, остается считать, что во всех даже самых массивных звездах лучевое давление мало в сравнении с газовым.

Выше мы видели, что для идеального газа температура, полученная из  $M$  и  $R$ , пропорциональна среднему молекулярному весу. Поэтому для того, чтобы уменьшить роль лучевого давления, необходимо принять минимальное из возможных значений молекулярного веса (половина), соответствующее смеси протонов и электронов. При таком значении молекулярного веса лучевое давление будет существенным лишь для звезд с массой около ста солнечных масс. Поскольку более массивные звезды почти не встречаются, совершенно естественно полагать, что именно роль лучевого давления накладывает предел существующим звездным массам.

Это весьма важное заключение о малой роли лучевого давления почти во всех звездах, включая гиганты, находит подтверждение в наблюдаемом соотношении период — средняя плотность Цфеид. Действительно, как показывает теория колебаний звезд, это соотношение будет выполняться лишь в том случае, если отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме остается одинаковым для всех звезд. При большой же роли лучевого давления это отношение будет изменяться в зависимости от массы звезд.

Пользуясь полученным значением молекулярного веса (половина), из сравнения теоретически вычисленных светимостей звезд по их массам с наблюдаемыми светимостями можно определить значение коэффициента поглощения на один грамм, которое оказывается порядка единицы. Томсоновское рассеяние света свободными электронами для смеси протонов и электронов имеет значение как раз этого порядка и обладает тем существенным для сделанных выводов свойством, что оно не зависит от физических условий. Легко показать, что при высоких температурах для ионизованного водорода томсоновское рассеяние будет превышать другие возможные виды поглощения. Однако при этом получается весьма жесткое ограничение в отношении возможной примеси других, тяжелых элементов (не более нескольких сотых процента в весовом отношении).

Итак, основной вывод, который можно сделать из сравнения теоретической зависимости масса—светимость с наблюдаемой, заключается в том, что звезды почти полностью состоят из ионизованного водорода и этот газ удовлетворяет закону Бойля—Мариотта.

Это заключение справедливо для всех звезд за исключением белых карликов и субкарликов. В этих особых звездах газ может быть вырожденным, вероятно, по этой причине эти звезды и не удовлетворяют обычной зависимости масса—светимость. Однако, как мы видели, и для вырожденных конфигураций косвенно, через зависимость источников энергии от физических условий, должна существовать своя зависимость масса—светимость, которая благодаря этому обстоятельству может оказаться неоднозначной и не четко выраженной.

Средняя температура звезды, как было показано, пропорциональна молекулярному весу. Поэтому водородная звезда обладает той особенностью, что она имеет низкую среднюю температуру. Центральная температура, которая, по всей вероятности, обуславливает процесс выделения энергии, может быть значительно выше среднего значения. Это отношение центральных и средних значений физических характеристик материи в звезде определяется структурой звезды — степенью концентрации материи. Структура звезды может быть изучена теоретически при известных условиях внутри звезды, путем решения безразмерных дифференциальных уравнений равновесия. Такого рода анализ показывает, что при наиболее правдоподобных предположениях относительно условий внутри звезд звезды должны быть сравнительно однородными. Этот вывод подтверждается некоторыми данными наблюдений. Дело в том, что структурные характеристики могут быть оценены и чисто эмпирически, путем изучения динамических особенностей некоторых звезд. Например, период пульсации Цефеид должен зависеть от распределения материи внутри звезды. Точно так же эллиптичность звезд, которая проявляется в кривых изменения блеска затменных переменных, согласно теории Клеро, зависит от степени концентрации материи внутри звезды. Из расчета этих наблюдаемых эффектов следует, что звезды построены весьма однородно, наподобие больших планет — Сатурна и Юпитера, для которых центральная плотность превышает среднюю в шесть или семь раз. У ряда затменных переменных хорошо обнаруживается движение линии апсид. Существование этого движения подтверждает сравнительную однородность звезд, так как при сильной концентрации материи, несмотря на большую приливную и вра-

щательную деформацию фигур звезд, будет сохраняться кеплеровское движение. Из приведенных соображений следует, что центральные температуры звезд не должны сильно отличаться от их средних значений. Тогда внутри Солнца должна быть температура лишь около 6–7 миллионов градусов. Эта температура значительно ниже той температуры в несколько десятков миллионов градусов, которая обычно принималась для центра Солнца.

При температурах ниже 10 миллионов градусов ядерные реакции не могут обеспечить необходимый выход энергии. Поэтому вероятно, что энергия в звездах вырабатывается совершенно особым, пока не известным процессом. Это заключение подтверждается видом диаграммы Расселла–Гертцшпрунга. Так как в выражение  $f_1(L, M, R) = 0$  радиус на самом деле не входит, то вид диаграммы, выражающей зависимость  $L$  от  $R$ , должен полностью определяться выражением  $f_2(L, M, R) = 0$ , т. е. зависимостью источников энергии от физических условий. Поэтому многозначность зависимости  $L$  от  $R$ , с точки зрения обычной термодинамики реакций, может быть объяснена лишь искусственным предположением о том, что в звездах осуществляется несколько различных типов реакций. Если же из вида диаграммы Расселла–Гертцшпрунга делать непосредственные заключения о характере источников звездной энергии, то свойства источников энергии оказываются совершенно неожиданными. Приходится думать, что процесс выделения звездной энергии не известен земному эксперименту и не может быть предусмотрен современным состоянием теоретической физики. Но этот интереснейший вопрос научного естествознания можно пытаться решать дальнейшим постепенным анализом наблюдаемых особенностей звезд.