

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 8—1950

## АСТРОНОМИЯ

А. Г. МАСЕВИЧ

### ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ<sup>1</sup>

Вопрос об эволюции звезд тесно связан с теорией их внутреннего строения. Представляется совершенно естественным, что изменение состояния звезды со временем в основном определяется внутренними причинами, в частности, энергетическим балансом звезды, который в свою очередь зависит от характера источников звездной энергии. Действительно, современная теория строения и источников энергии звезд дает вполне определенные указания на направление звездной эволюции. Излучение звезд, обусловленное ядерными реакциями в их недрах, должно приводить к изменению их внутреннего химического состава (содержание гелия увеличивается за счет содержания водорода), т. е. к увеличению среднего молекулярного веса  $\mu$  звезды ( $\mu$  — средняя масса, приходящаяся на свободную частицу). В результате увеличения  $\mu$  увеличивается непрозрачность звездного вещества и отдача энергии, т. е. меняются основные параметры звезды. Как меняются с течением времени основные характеристики звезды, ее светимость ( $L$ ), радиус ( $R$ ) и масса ( $M$ ) — это и есть основной вопрос звездной эволюции.

Из наблюдений известно, что природа звезд, во всяком случае с внешней стороны, весьма разнообразна. Наглядно это иллюстрируется известной диаграммой светимость—спектр (диаграммой Рессела). В сущности диаграмма эта — более удобное выражение диаграммы светимость—радиус, так как радиус вычисляется непосредственно для любой звезды с известной светимостью и спектральным типом (температурой поверхности).

На рис. 1 представлена диаграмма светимость—радиус.

Звезды располагаются на диаграмме не хаотично, а вдоль определенных последовательностей, каждая из которых характеризуется вполне определенными закономерностями. Пересмотр всех эмпирических данных для звезд с известными массами, проведенный П. П. Паренаго и А. Г. Масевич в 1949 г. [1], показал, что для звезд каждой последовательности существует свое определенное соотношение между массой и светимостью (для субкарликов и субгигантов — между массой — светимостью и радиусом). Соотношение масса — светимость для различных типов звезд (кроме субкарликов и субгигантов) представлено на рис. 2. Сама Главная Последовательность также состоит из двух самостоятель-

<sup>1</sup> Доклады на «Ломоносовских чтениях» 1950 г.

ных групп: звезды от спектрального типа О до G3 и звезды типов G7—M, каждая из которых имеет свои закономерности. Изучение движений 3 000 звезд, проведенное П. П. Паренаго [2], показывает, что отдель-

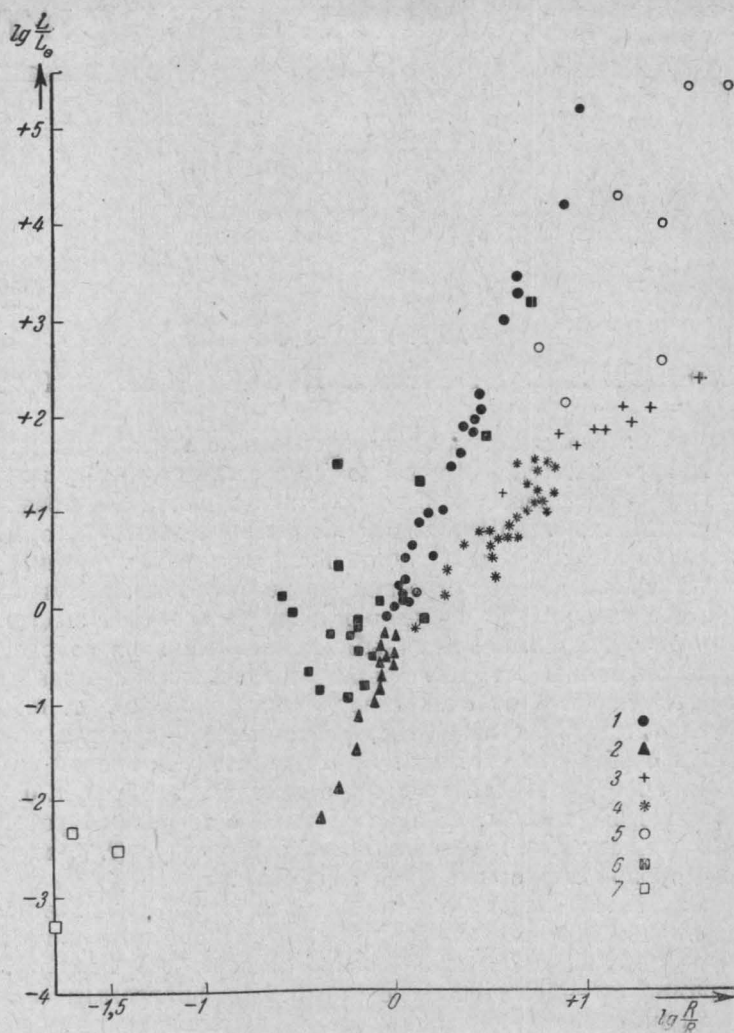


Рис. 1. Диаграмма светимость—радиус (согласно П. П. Паренаго и А. Г. Масевич [1])

Условные обозначения:

- 1—Гл. Последов. I
- 2—Гл. Последов. II
- 3—Гиганты
- 4—Субгиганты
- 5—Сверхгиганты
- 6—Субкарлики
- 7—Белые карлики

ные последовательности (в том числе и I и II части Главной Последовательности) различаются также и по своим кинематическим характеристикам. К аналогичным выводам приводит и изучение пространственного распределения звезд различных типов. Таким образом, разделение

звезд на диаграмме 1 на различные подгруппы не является случайным, а имеет вполне определенный физический смысл. С этим обстоятельством необходимо считаться как теории строения звезд, так и теории звездной эволюции. В частности, для теории внутреннего строения звезд отсюда прямо следует вывод, что не существует единой звездной модели, пригодной для всех звезд.

Попытки объяснить строение всех звезд одной моделью делались неоднократно и сейчас еще предпринимаются некоторыми зарубежными

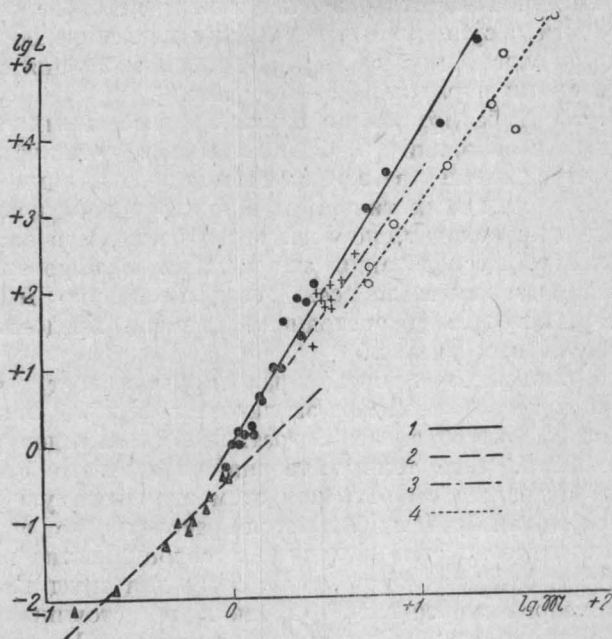


Рис. 2. Соотношение масса—светимость для первой и второй части Главной Последовательности, гигантов и сверхгигантов (согласно [1]) Условные обозначения:

- 1—I часть Гл. Послед.  $\log L = 3.9 \lg m$
- 2—II  $\lg L = 2.3 \lg m - 0.39$
- 3—Гиганты  $\lg L = 3.38 \lg m$
- 4—Сверхгиганты  $\lg L = 3.2 \lg m - 0.25$

учеными (Хойль, Эрик, Васютинский и др.). Попытки эти неизменно приводят к чисто формальным результатам и разногласиям с данными наблюдений, что совершенно закономерно в свете вышеизложенного.

Рассматривая эволюцию звезды, необходимо учитывать две возможности: 1) звезда может в течение своей жизни перемещаться вдоль какой-нибудь последовательности, меняя свои характеристики таким образом, чтобы они не выходили за пределы закономерностей данной группы звезд, и 2) переходить в течение эволюции с одной последовательности на другую, т. е. превращаться в звезду другого типа. Каков эволюционный путь звезды на диаграмме светимость—радиус и что можно сказать о генетической связи между отдельными последовательностями? Изучение закона пространственного распределения звезд может дать, как было показано Б. В. Кукаркиным [3], определенные указания для ответа на этот вопрос. Распределение звезд в пространстве, поставленное в связь

с возрастными особенностями, позволяет делать выводы относительно направления развития и эволюционной связи тех или иных объектов. Полное сходство пространственного распределения и кинематических характеристик, конечно, не может служить однозначным доказательством непосредственной генетической связи. Однако резкое различие законов распределения в пространстве двух каких-либо типов звезд уже достаточно для того, чтобы утверждать, что они не могут эволюционировать один в другой в течение астрономически приемлемых сроков. Так, например, заведомо нельзя говорить о эволюционном переходе звезд Главной Последовательности в субкарлики, поскольку последние образуют типичную сферическую подсистему [см. 4]. Подобная эволюция могла бы произойти лишь в сроки порядка  $10^{13}$ — $10^{14}$  лет.

Работы В. А. Амбарцумяна по изучению рассеянных звездных скоплений и звездных ассоциаций [5, 6] показывают, что необходимо считаться со значительными возрастными различиями среди звезд, и не только звезд различных типов, но и внутри одной и той же группы. Образование звезд происходит по всей вероятности, и в настоящее время в нашей Галактике. Исследования эти полностью опровергли гипотезу об одновременном зарождении всех звезд несколько миллиардов лет назад — гипотезу, которую до настоящего времени продолжает проповедывать ряд зарубежных ученых.

Все вышеизложенное лишней раз подчеркивает, что создание подлинно научной теории звездной эволюции возможно лишь на основе методологически верного объединения достижений и выводов различных отраслей астрономии, а не только теории внутреннего строения звезд, хотя последняя и должна сыграть при этом значительную роль.

Целью настоящей работы является рассмотрение эволюции звезд Главной Последовательности, исходя из совокупности наших знаний о закономерностях звездного мира, поскольку для звезд Главной Последовательности теория внутреннего строения и источников их энергии наиболее полно разработана. Представление о звезде Главной Последовательности как о равновесном газовом шаре с конвективным ядром в центре (в конвективном ядре заключена лишь  $\sim 1/10$  массы звезды) и ядерным источником энергии (превращение водорода в гелий путем ядерных реакций), в общем, хорошо согласуется с данными наблюдений. В частности, например, химический состав (содержание водорода и гелия), вычисленный для Солнца теоретически на основании этой модели, совпадает с тем, что дают спектроскопические исследования солнечной атмосферы ( $\sim 50\%$  водорода и  $\sim 40\%$  гелия по массе). Это, конечно, существенно говорит в пользу теории.

Наибольшим затруднением в теории строения звезд является вопрос о коэффициенте поглощения звездного вещества. Коэффициент поглощения в звездах является, как следует из общих физических соображений, функцией температуры и плотности вида

$$k = k_0 \rho^\alpha T^{-\beta}, \quad (1)$$

где  $k_0$  — постоянная, зависящая от химического состава. Точные численные значения показателей  $\alpha$  и  $\beta$  неизвестны ( $\alpha$  порядка 1,  $\beta \sim 3,5$ ). Поэтому при построении звездной модели приходится заранее задаваться некоторыми значениями  $\alpha$  и  $\beta$ , что, естественно, вносит определенный произвол. В упомянутом выше расчете для Солнца, давшем результаты, хорошо согласующиеся с наблюдениями, было принято  $\alpha = 0,75$ ,  $\beta = 3,5$ . Если же задан закон поглощения (т. е. значения  $\alpha$  и  $\beta$ ), то для любой звезды можно вычислить теоретически молекулярный вес (содержание

водорода и гелия) из двух соотношений между параметрами звезды  $L$ ,  $M$ ,  $R$  и  $\mu$ , одно из которых получается в результате построения самой модели, а другое из условия, что принятый источник энергии обеспечивает звезде, построенной по такой модели, излучение, соответствующее ее действительно наблюдаемой светимости.

Однако, проводя аналогичные расчеты для различных звезд Главной Последовательности, исследователи всегда приходили к выводу, что молекулярный вес для массивных звезд должен быть меньше (т. е. содержание водорода больше), чем для звезд меньшей массы (см., например, [7]).

Результат этот легко получить, если сопоставить эмпирические соотношения масса — светимость и масса — радиус для звезд Главной Последовательности с теоретическим соотношением между  $L$ ,  $M$ ,  $R$  и  $\mu$ , которое получается при построении звездной модели из необходимости выполнения граничных условий на поверхности и в центре звезды. Соотношение это, даваемое теорией, имеет вид:

$$L = \text{const} \frac{\mu^{4+\beta}}{k_0} M^{3+\alpha-\beta} R^{3\alpha-\beta}. \quad (2)$$

В то же время эмпирические соотношения для первой части Главной Последовательности (в дальнейшем мы все время рассматриваем именно эту часть, т. е. звезды спектральных типов от  $O$  до  $G3$ ), согласно [1], будут (см. также рис. 2):

$$L = M^{3,9}; R = M^{0,75}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) имеем:

$$\frac{\mu^{4+\beta}}{k_0} = \text{const} \cdot M^{-1,25\alpha-0,25\beta-0,9}, \quad (4)$$

или

$$\mu \sim M^{-m}; \quad (5)$$

т. е.  $\mu$  уменьшается (а, следовательно, содержание водорода увеличивается) в сторону возрастающих масс и более ранних спектральных типов вдоль Главной Последовательности (подробнее об этом см. в [8]).

Спрашивается, какими же физическими причинами можно объяснить различие молекулярного веса вдоль Главной Последовательности? С этим затруднением исследователи строения звезд сталкиваются беспрестанно.

Как уже указывалось, теория ядерных источников звездной энергии приводит к выводу об изменении химического состава звезды с течением времени. Нельзя поэтому рассматривать состояние звезды вообще, а необходимо изучать ее состояние в данное время. Если в момент  $t_0$  звезда характеризуется некоторыми  $M_0$ ,  $L_0$ ,  $R_0$ ,  $\mu_0$ , то через промежуток времени  $\Delta t$  вместо  $\mu_1$  уже будет  $\mu_0 > \mu_0$  (содержание водорода в звезде уменьшится, и соответственно увеличится содержание гелия, в то время как содержание смеси тяжелых элементов останется постоянным). Изменение остальных параметров звезды при этом и будет характеризовать эволюционную кривую на диаграмме светимость — радиус.

Состояние звезды, согласно известной теореме Фогта — Рессела, однозначно определяется заданием ее массы и химического состава. Поскольку из теории источников энергии уже следует изменение химического состава со временем, то для получения однозначной эволюционной кривой мы должны знать, как меняется масса звезды в течение ее жизни. Здесь имеются, вообще говоря, три возможности: 1) масса звезды остается практически постоянной, 2) масса звезды увеличивается и 3) масса звезды уменьшается.

Рассмотрим по порядку все три возможности (все время предполагается, что изменение происходит непрерывно и в рамках одной и той же модели).

1. Масса звезды постоянна. Два вышеупомянутых соотношения между  $M$ ,  $L$ ,  $R$  и  $\rho$ , даваемые теорией для определения содержания водорода и гелия, имеют вид (полагая в законе поглощения  $\alpha = 0,75$ ,  $\beta = 3,5$ ):

$$\frac{M^{5,75}}{LR^{1,25}} = \frac{\left[ 2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}(1-X-Y) \right]^{7,5} (1+X)(1-X-Y)}{1,34}; \quad (6)$$

и

$$\frac{M^{19}}{LR^{20}} = \frac{\left[ 2X + \frac{3}{4}Y + \frac{1}{2}(1-X-Y) \right]^{17}}{1800(1-X-Y)X}. \quad (7)$$

$L$ ,  $M$ ,  $R$  = выражены в солнечных единицах,  $X$  — содержание водорода,  $Y$  — содержание гелия. Так как содержание тяжелых элементов  $(1-X-Y)$  с течением времени не меняется, то  $Y$  выражается через  $X$  и  $(1-X-Y) = \text{const}$ . Рассмотрим эволюцию Солнца в предположении постоянной массы. Для Солнца  $(1-X-Y) = 0,12$ . Тогда (6) и (7) можно переписать в виде:

$$\frac{M^{5,75}}{LR^{1,25}} = \frac{(1+1,736X)^{7,5} (1+X)}{131,2} \quad (6')$$

$$\frac{M^{19}}{LR^{20}} = \frac{(1+1,736X)^{17}}{57520X}. \quad (7')$$

Исключая из (6) и (7) последовательно  $L$  и  $R$ , получим уравнения изменения  $R$  и  $L$  в зависимости от  $X$ :

$$R = 1,383 M^{0,71} \left[ \frac{(1+X)X}{(1+1,736X)^{9,5}} \right]^{18,75}; \quad (8)$$

$$L = \frac{87,46 M^{4,867}}{X^{0,067} (1+X)^{1,067} (1+1,736X)^{6,867}}. \quad (9)$$

Так как  $M = \text{const}$ , получим для Солнца ( $M = 1$ ) по мере выгорания водорода следующее изменение  $L$  и  $R$ :

$X$	$L$	$R$
0,47	1	1
0,4	1,767	1,027
0,3	5,088	1,064
0,2	10,365	1,102
0,1	30,699	1,134
0,01	89,87	1,072
0,001	117,2	0,956

При выгорании водорода светимость звезды значительно возрастает, радиус ее при этом слегка увеличивается, затем резко спадает (при  $X \sim 0,0$ ) (рис. 3). Физически это находит объяснение в том, что при превращении водорода в гелий увеличивается непрозрачность звездного вещества, вследствие этого повышается температура в недрах, что в свою очередь приводит к резкому возрастанию выхода энергии, так как ядерные реакции чрезвычайно чувствительны к изменению температуры. Состояние

звезды меняется таким образом, что она выходит за пределы Главной Последовательности, т. е. нарушаются связи (3). Чем массивнее звезда, тем значительнее эти изменения, как легко усмотреть из (8) и (9). К тому же превращение водорода в гелий происходит гораздо быстрее у горячих звезд. Так, например, в Солнце (считая, что светимость сохраняется неизменной) за  $3 \cdot 10^9$  лет превратится в гелий лишь несколько процентов его общей массы водорода, тогда как для Сириуса за тот же срок количество это возрастет уже до 50%. Следовательно, массивные и горячие звезды быстрее должны «уходить» с Главной Последовательности, и отклонение от связей (3) для них значительнее.

Если бы эволюция звезд Главной Последовательности протекала таким путем, то мы должны были бы наблюдать в природе большое количество звезд, особенно ранних спектральных классов, уже сошедших с Главной Последовательности и не подчиняющихся соотношению масса—светимость. Наблюдения этого не только не подтверждают, но показывают как раз обратное. Таким образом, предположение о постоянстве массы звезды с течением времени находится в противоречии с данными наблюдений и должно быть оставлено как неверное.

Надо отметить также, что объяснить различный химический состав звезд Главной Последовательности, исходя из этой точки зрения ( $M = \text{const}$ ), можно, только предположив, что он был различным уже при образовании звезд. Тогда для объяснения существующей зависимости масса—светимость необходимо вводить еще дополнительные гипотезы о связи между  $\rho$  и  $M$  в момент образования звезд, что в свою очередь еще осложняет проблему и, в конце концов, приводит к выводу об одновременном образовании этих звезд. Как указывалось выше, исследования Амбарцумяна полностью опровергают эту точку зрения.

2. Масса звезды увеличивается со временем. Такой случай принципиально допустим, но чрезвычайно мало вероятен. Механизм, позволяющий звезде сколько-нибудь значительно увеличивать массу, до сих пор неизвестен и не был предложен теоретически, если, конечно, не считать фантастические «теории» Хойля, Иордана и др. о непрерывном образовании вещества из «ничего». Эффект же захвата межзвездной материи мал и не может дать ощутимых результатов. В то же время из (8) и (9) следует, что для согласования этого предположения с наблюдениями, т. е. для того, чтобы звезда, эволюционируя, оставалась в пределах Главной Последовательности, требуется значительное изменение  $M$ .

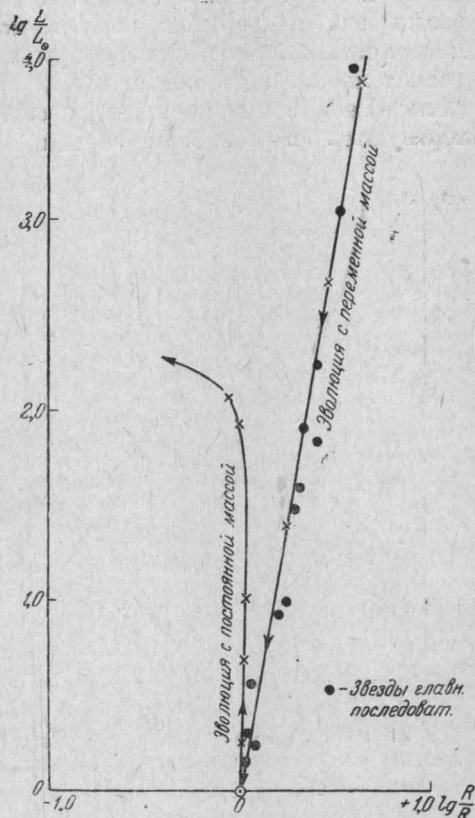


Рис. 3. Эволюция Солнца в предположении постоянной массы и массы, убывающей за счет корпускулярного излучения

Наглядно это видно из рис. 4, где представлено наблюдаемое изменение массы вдоль Главной Последовательности.

3. Масса звезды уменьшается со временем. Некоторая убыль массы звезды, естественно, происходит за счет лучеиспускания. Но изменение это настолько ничтожно, что не может иметь космогонического значения. Однако, как показывают наблюдения, убыль массы реально происходит для целого ряда звезд. Изучение звезд, окруженных протяженными атмосферами с эмиссионными линиями в спектре, показывает, что звезды эти непрерывно теряют массу вследствие истечения газа с их поверхности. Происходящая при этом убыль массы может быть весьма значительной, как показал Б. А. Воронцов-Вельяминов [9] для звезд Вольф-Райе и новоподобных звезд. Корпускулярным излучением характеризуются в основном звезды ранних спектральных классов. Однако

выбрасывание заряженных частиц наблюдается и с поверхности Солнца и ему подобных звезд.

Чрезвычайно интересным является то обстоятельство, что горячие гигантские звезды, как правило, имеют значительное вращение, тогда как звезды более поздних спектральных классов вращаются медленно. Повидимому, между вращением звезды и выбрасыванием вещества с ее поверхности существует определенная связь.

Вопрос о космогоническом значении корпускулярного излучения в связи с вращением звезд рассмотрен в новой космогонической гипотезе акад. В. Г. Фесенкова [10]. Согласно этой

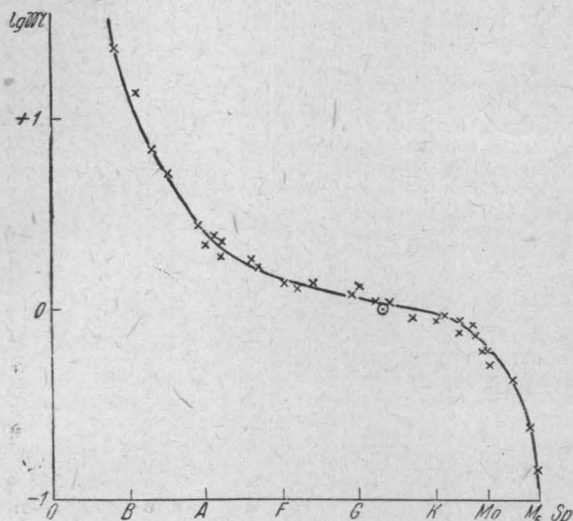


Рис. 4) Наблюдаемое изменение массы звезд Главной Последовательности (согласно [1])

гипотезе, Солнце начало свой жизненный путь как горячая массивная звезда, обладающая большим вращением, и постепенно теряло массу и, соответственно, вращательный момент, вследствие корпускулярного излучения. Потеря массы принимается пропорциональной светимости звезды.

Вопрос об интенсивности корпускулярного излучения Солнца, так же как и других звезд, экспериментально не изучен. Несмотря на то, что неоднократно предлагались различные механизмы выброса частиц, обусловленные физическими явлениями в верхних слоях звезд, однозначного решения до настоящего времени не существует. В сущности не решен даже вопрос, можно ли отнести этот механизм целиком к атмосферам звезд, или необходимо ввести в рассмотрение также и внутренние причины (например, бурную турбулентную конвекцию во всей массе звезды).

Однако закон убыли массы за счет корпускулярного излучения может быть получен и теоретически, независимо от предположений о самом механизме выброса, из теории внутреннего строения звезд. Можно также получить и эволюционный путь звезды на диаграмме светимость—спектр, объяснив эволюцией изменение химического состава звезд Глав-



ной Последовательности, исходя только из самого факта наличия корпускулярного излучения, который подтверждается наблюдениями. Вопросы эти были рассмотрены автором настоящей статьи [11, 12] в развитие идей В. Г. Фесенкова на основе современной теории строения звезд и источников звездной энергии.

Единственным произвольным допущением при этом является предположение, что звезды Главной Последовательности находятся на ней, т. е. подчиняются соотношениям (3), в течение длительного отрезка своей жизни. Предположение это не противоречит данным наблюдений, так как большинство звезд действительно находится на Главной Последовательности, и число звезд, лежащих непосредственно над или под ней, практически ничтожно. Оно находится также в согласии с идеями В. А. Амбарцумяна о происхождении звезд и с выводами П. П. Паренаго, согласно которым существует непрерывное изменение кинематических характеристик вдоль первой части Главной Последовательности, что могло бы быть объяснено эволюцией [2].

Считая, что звезда непрерывно теряет массу вследствие корпускулярного излучения по неизвестному пока закону, но так, что она не выходит за пределы данной группы звезд (т. е. соотношение  $L = M^{3,9}$  сохраняется), получим из 6' и 7' для Солнца:

$$\frac{M^{1,85}}{R^{1,25}} = \frac{(1 + 1,736 X)^{7,5} (1 + X)}{1,312 \cdot 10^2}; \quad (10)$$

$$\frac{M^{15,1}}{R^{20}} = \frac{(1 + 1,736 X)^{17}}{5,752 \cdot 10^4 X}. \quad (11)$$

Откуда, исключая  $R$ :

$$M^{14,5} = \frac{(1 + 1,736 X)^{103} (1 + X)^{16} \cdot X}{1,3403 \cdot 10^{29}}. \quad (12)$$

Поскольку содержание тяжелых элементов  $(1 - X - Y) = 0,12$ , то предельная возможная масса Солнца в прошлом получается из (12) при  $X = 0,88$ . Масса эта соответствует такому гипотетическому начальному моменту времени, когда Солнце почти целиком состояло из водорода и содержание гелия в нем было равно нулю.  $M_{\max} = 14,1 M_{\odot}$  и соответственно  $L_{\max} = 3,09 \cdot 10^4 L_{\odot}$ .

Аналогично можно подсчитать и максимально возможный радиус. Исключая из (10) и (11)  $M$  имеем:

$$R^{9,8} = \frac{(1 + 1,736 X)^{44,22} (1 + X)^{8,16} \cdot X}{3,330 \cdot 4 \cdot 10^{12}}. \quad (13)$$

Для  $X = 0,88$   $R_{\max} = 6,461 R_{\odot}$ .

Соотношение между  $\lg M$  и  $\lg R$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{для } X = 0,88 & \quad \lg R = 0,662 \lg M \\ X = 0,7 & \quad \lg R = 0,664 \lg M \\ X = 0,6 & \quad \lg R = 0,665 \lg M, \end{aligned} \quad (14)$$

в хорошем согласии с эмпирическим соотношением для первой части Главной Последовательности:  $\lg R = 0,75 \lg M$ . Результат этот нельзя считать тривиальным. Казалось бы, что, предполагая  $L = M^{3,9}$ , мы, таким образом, насильственно удерживаем звезду на Главной Последовательности. Однако наряду с соотношением  $L = M^{3,9}$  для Главной Последовательности существует еще эмпирическое соотношение  $R = M^{0,75}$ , которое в наших расчетах не участвовало, так что мы, вообще говоря, могли получить эволюционную кривую и значительно отклоняющуюся

от самой последовательности. Если же ввести в расчет еще и это второе эмпирическое соотношение  $R = M^{0,75}$ , то из (10) и (11) мы получим два уравнения для  $X$ , которые совпадут только, если теория верна. Как уже указывалось, существует лишь приближенная теория коэффициента поглощения в звездах. Поэтому то, что мы получили совпадение, говорит, естественно, в пользу теории.

Эволюционная кривая Солнца для случая убывающей массы также представлена на рис. 3. Меняя показатель  $n$  в отношении масса—светимость ( $L = M^n$ ), мы получим разные эволюционные кривые и разные предельные значения параметров звезды. Так, например, для  $n = 3,33$ :  $M_{\max} = 5,1 M_{\odot}$ , для  $n = 3$ ,  $M_{\max} = 3,95 M_{\odot}$  и т. д. Чем меньше  $n$ , тем меньше и предельная масса.

Солнце могло, таким образом, начать свой эволюционный путь как горячая массивная звезда раннего спектрального класса и по мере потери массы передвигаться вдоль Главной Последовательности в сторону малых светимостей. Наиболее существенным является вопрос о сроках эволюции. Аналогичную эволюционную кривую можно было бы получить формально и без корпускулярного излучения, учитывая лишь уменьшение массы за счет лучеиспускания. Однако тогда время, необходимое для того, чтобы горячая звезда класса В превратилась в Солнце, оказывается порядка  $10^{13} - 10^{14}$  лет. Не говоря уже о том, что подобные сроки не приемлемы с точки зрения современных взглядов на возраст нашей Галактики, мы здесь вступаем и во внутреннее противоречие с исходными физическими данными, так как за гораздо более короткое время значительная часть водорода в звезде должна превратиться в гелий и в сущности имел бы место случай, рассмотренный для  $M = \text{const}$ .

Для того чтобы получить изменение состояния звезды во времени, необходимо проинтегрировать уравнение сгорания водорода.

$$\frac{d(XM)}{dt} = -\frac{L}{\alpha} - [\text{выброс массы в сек.}] X, \quad (15)$$

$\alpha$  — энергия, освобождающаяся на 1 грамм водорода при ядерной реакции

$$\left[ \alpha = 6,4 \cdot 10^{18} \frac{\text{эрг}}{\text{г.}} \right]$$

Убыль массы:

$$\frac{dM}{dt} = - [\text{выброс массы в сек.}] - \frac{L}{c^2}, \quad (16)$$

где второй член — потеря массы на излучение. Из (15) и (16):

$$M \frac{dX}{dt} = -\frac{L}{\alpha} + \frac{XL}{c^2}. \quad (17)$$

Пренебрегая вторым членом, получим отсюда:

$$t = -\alpha \int_{X_0}^X \frac{M(X)}{L(X)} dX. \quad (18)$$

На рис. 5 изображено изменение массы и светимости со временем для Солнца. Как показывают расчеты, в начальные периоды, когда  $L$  и  $M$  велики, убыль массы значительна; затем убыль массы постепенно замедлялась, и в течение последних 3—4 млрд. лет масса Солнца практически не должна была меняться. Результат этот хорошо согласуется с наблюдаемым интенсивным истечением газов с поверхности звезд-гигантов ранних спектральных классов и сравнительно незначительным корпускулярным излучением Солнца в настоящее время. Полученный промежуток

времени, в течение которого Солнце практически не меняется (3—4 млрд лет), хорошо согласуется также с геологическим возрастом Земли. На рис. 5 нанесена также производная массы по времени. В пределах точности вычислений зависимость между  $\frac{dM}{dt}$  и  $L$  — линейная и можно положить:

$$\frac{dM}{dt} = -kL. \quad (19)$$

Коэффициент  $k$  легко вычислить для нашего случая:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dM}{dX} \frac{dX}{dt}. \quad (20)$$

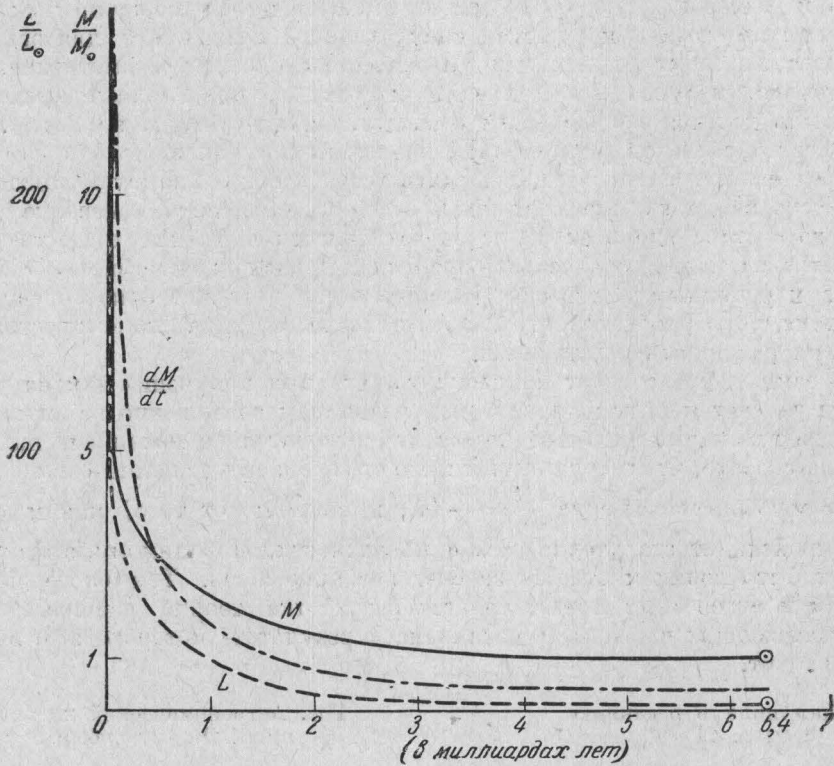


Рис. 5. Изменение массы и светимости Солнца со временем

Подставляя  $\frac{dX}{dt}$  из (17) получим:

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{L}{\alpha} \frac{1}{M} \frac{dM}{dX} = -\frac{L}{\alpha} \frac{d \lg M}{dX}, \quad (21)$$

т. е.

$$K = \frac{1}{\alpha} \frac{d \lg M}{dX}.$$

Логарифмируя и дифференцируя (12), получим выражение для  $k$  через  $X$ :

$$k = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{12,325}{1 + 1,735 X} + \frac{1,104}{1 + X} + \frac{0,0689}{X} \right), \quad (22)$$

С уменьшением  $X$ ,  $k$  слегка возрастает, однако изменение это в рассматриваемом интервале изменения  $X$  от 0,9 до  $\sim 0,5$  ничтожно. Следова-

тельно, закон убыли массы, полученный из теории внутреннего строения звезд, подтверждает предположение В. Г. Фесенкова о линейной зависимости между  $\frac{dM}{dt}$  и  $L$ .

Численно коэффициент  $k$  для Солнца (в его настоящем виде) ( $X = 0,47$ ,  $\alpha = 6,4 \cdot 10^{-18}$  равен  $1,201 \cdot 10^{-18}$  э/рг), т. е. потеря массы за счет выброса частиц должна быть примерно на три порядка больше, чем потеря массы на излучение. Это означает, что Солнце потеряет одну сотую своей массы за время  $> 100$  миллионов лет. Следовательно, задолго до того как масса Солнца заметно изменится, значительная часть водорода должна превратиться в гелий и принятая модель звезды уже не будет годиться. Поэтому полученный путь развития звезды применим лишь к звездам Главной Последовательности на промежутке между горячими гигантами и карликами спектрального класса G, а для звезд более поздних спектральных классов необходимо особое рассмотрение. Следовательно, и здесь мы приходим к выводу, что Главная Последовательность делится на две части в области спектрального класса G.

Рассмотренная теория звездной эволюции позволяет, исходя из теории внутреннего строения звезд, получить теоретически Главную Последовательность на диаграмме светимость—радиус, объяснить изменение химического состава вдоль этой последовательности в рамках существующих взглядов на источники звездной энергии и происхождение звезд. Она приводит к разумным срокам эволюции звезд и дает еще одно обоснование необходимости рассматривать Главную Последовательность как состоящую из двух различных групп звезд.

В заключение следует подчеркнуть, что при получении закона убыли массы за счет корпускулярного излучения нам совершенно не понадобилось делать каких-либо предположений относительно механизма выброса. Можно сказать, что теория внутреннего строения звезд вполне совместима с законом убыли массы вида  $\frac{dM}{dt} = -kL$ , независимо от того, каким способом происходит эта утечка газа с поверхности. Повидимому, эффект этот может быть целиком отнесен за счет внешних слоев. Тем более необходимым и интересным представляется разработка теории внешних слоев, выбрасывающих частицы, и механизма, в результате которого этот выброс происходит.

Поступила в редакцию  
22.5. 1950 г.

Гос. Астрономический институт  
им. П. К. Штернберга

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Паренаго П. П. и Масевич А. Г. Астр. ж. 27, № 3, 1950.
2. Паренаго П. П. Астр. ж. 27, № 3, 1950.
3. Кукаркин Б. В. Строение и развитие звездных систем. Гостехиздат, М.—Л., 1949.
4. Паренаго П. П. Сообщения ГАИШ № 30, 1949.
5. Амбарцумян В. А. Эволюция звезд и астрофизика. Изд. АН Арм. ССР, Ереван, 1948.
6. Амбарцумян В. А. Астр. ж. 26, № 1, 1949.
7. Масевич А. Г. и Пареного П. П. Астр. ж. 27, № 4, 1950.
8. Северный А. Б. Вводная статья к книге Чандрасекара. Введение в учение о строении звезд. Изд. ин. л. 1950.
9. Воронцов-Вельяминов Б. А. Новые звезды и газовые туманности. Изд. АН СССР, 1948.
10. Фесенков В. Г. Астр. ж. 26, № 2, 1949.
11. Масевич А. Г. Астр. ж. 26, № 4, 1949.
12. Масевич А. Г. Изв. АН СССР, серия физич., т. XIII, № 6, 1949.