

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИСТОЧНИКИ ЗВЕЗДНОЙ ЭНЕРГИИ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД*)

А. Унзольд

ВВЕДЕНИЕ

Прошло 200 лет с тех пор, как Кант осмелился перенести проблемы космогонии из области теологии в область естествознания и рассмотреть их на основе законов Ньютона. Почти 100 лет отделяют появление (первоначально в виде анонимного произведения) «Общей естественной истории и теории неба» от того момента, когда в 1838 г. Бесселю и В. Струве действительно удалось измерить расстояние до неподвижной звезды. Только в нашем столетии началось бурное развитие астрономии, почти совпадающее по времени с созданием теории относительности и теории квантов и стоящее наряду с ними: вселенная как целое, весь космос в своей пространственной структуре и временной эволюции стали предметом изучения точных естественных наук.

1. КОСМИЧЕСКИЕ РАССТОЯНИЯ

Исследование пространственной структуры сначала нашей Галактики, а затем и всего Космоса внегалактических туманностей базировалось, наряду с созданием все более эффективных приборов, на методике так называемого фотометрического измерения расстояний.

В свое время Бессель и Струве при помощи точных тригонометрических измерений (рис. 1) определили для некоторых ближайших к нам звезд параллакс p , т. е. угол, под которым должен быть виден радиус земной орбиты со звезды.

Расстояние звезды, для которой $p=1''$, равно 1 парсеку (pc). Легко вычислить, что $1 pc=3,26$ световых лет ($св. лет$)= $3,08 \cdot 10^{18}$ см. Так, например, параллакс Сириуса $p=0,375''$, т. е. расстояние Сириуса от Земли равно $2,7 pc$ или $8,6 св. лет$.

Этот метод тригонометрических параллаксов является основой всех измерений космических расстояний. Однако вследствие свойственных этому методу измерительных ограничений он охватывает только нашу «ближайшую окрестность»—до расстояния $\sim 50 pc$. Другие геометрические методы позволяют пойти не намного дальше.

Фотометрическое измерение расстояний основано на следующем положении. Если для звезд определенного типа, исходя из данных, относящихся к немногим близким объектам, определена абсолютная

*) Доклад на 99-м съезде немецкого Общества естествоиспытателей и врачей 24 сентября 1956 г. в Гамбурге, Naturwissenschaften 44, № 6 (1957). Перевод С. А. Каменецкого.

яркость (по определению отнесенная к расстоянию в 10 пс), то можно для удаленных объектов такого же типа из сравнения кажущейся и абсолютной яркости по фотометрическому закону $1/r^2$ непосредственно вычислить их расстояния (мы не рассматриваем здесь некоторых осложнений, возникающих вследствие межзвездного поглощения света).

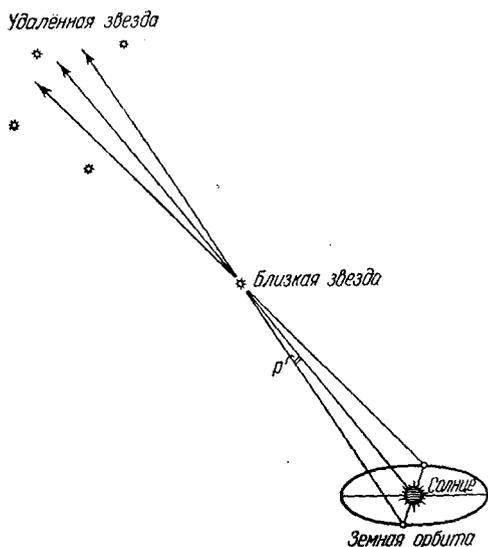


Рис. 1. Параллакс звезды p . Параллакс ближайшей звезды α Центавра равен $0,76''$. Параллаксу, равному p дуговых секунд, соответствует расстояние $1/p$ парсеков.
 $1 \text{ пс} = 3,26 \text{ св. лет} = 3,08 \cdot 10^{18} \text{ см}$; $1 \text{ кпс} = 10^3 \text{ пс}$.

на основе новейших исследований, проведенных в Лейденской обсерватории³¹. Млечный Путь представляется как несколько сплющенное

В 1918 г. Шепли применил эту методику фотометрического измерения к шаровым звездным скоплениям (рис. 2), используя для этой цели содержащиеся в этих скоплениях переменные звезды—так называемые короткопериодические цефеиды. Оказалось, что шаровые скопления звезд представляют собой системы несколько сплюсненной формы, свойственной также нашему Млечному Пути. Исходя из этого, далее Шепли, Оорт, Ляндبلاد и др. дали современную картину нашего Млечного Пути. На рис. 3 показано распределение плотности массы и скоростей обращения в Млечном Пути на основе

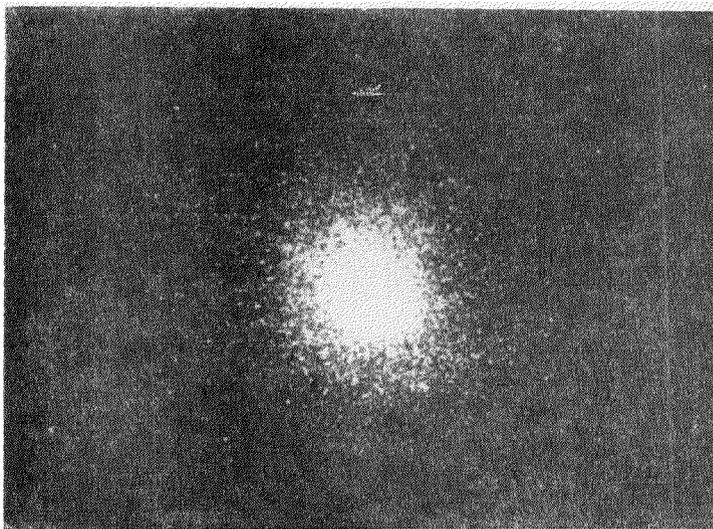


Рис. 2. Шаровое звездное скопление M 13 (NGC 6205); расстояние от Земли $8,3 \text{ кпс}$ (по фотоснимкам обсерваторий Маунт Вилсон и Маунт Паломар).

образование с диаметром $\sim 30 \text{ кпс} = 30\,000 \text{ пс}$. Наше Солнце обращается вокруг ядра Млечного Пути на расстоянии $8,2 \text{ кпс} = 27\,000 \text{ св. лет}$

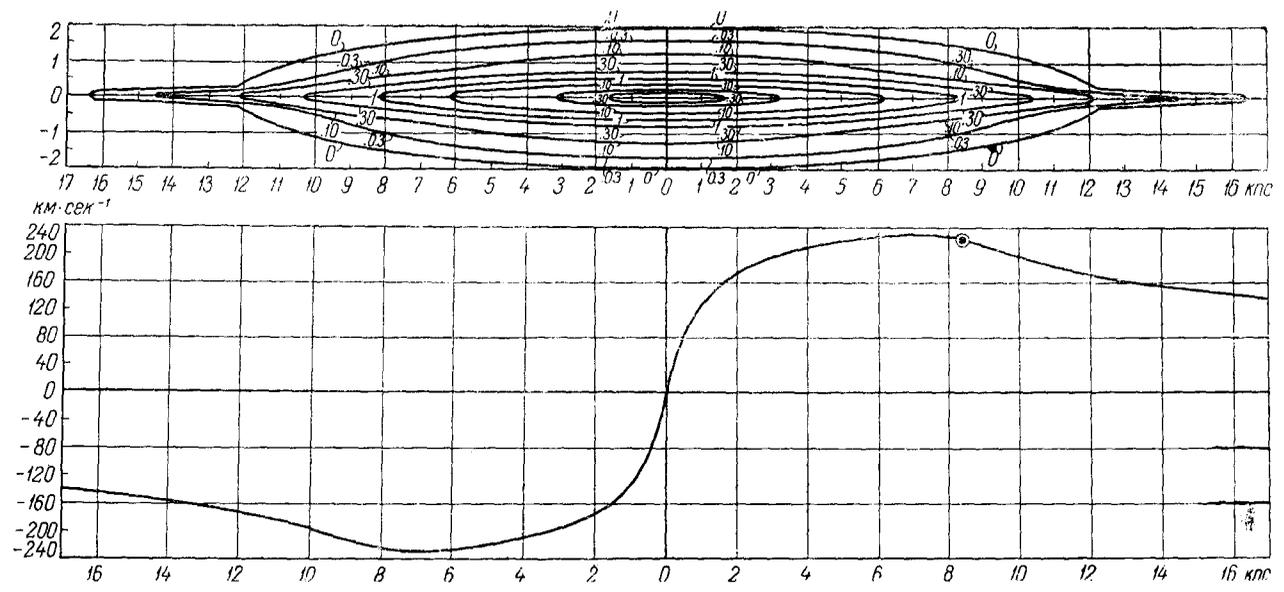


Рис. 3. Наша система Млечного Пути. Вверху: плотность массы, отнесенная к плотности в окрестности Солнца $\rho_{\odot} = 6,34 \cdot 10^{-24} \text{ г/см}^3$. Внизу: скорость вращения в км/сек в зависимости от расстояния до центра в кпс. Солнце отстоит от центра на расстоянии 8,2 кпс или 27 000 св. лет и движется со скоростью 216 км/сек в направлении на созвездие Лебедя (Шмидт³¹).

со скоростью 216 км/сек или с периодом обращения $2,3 \cdot 10^8$ лет. Таким образом, за время, истекшее с карбоновой эпохи, мы совершили один оборот вокруг галактического центра, находящегося в области созвездий Скорпиона—Стрельца.

В 1924 г. Хаббл удалось применить несколько улучшенную технику фотометрического определения расстояний вне галактических туманностей. Наша ближайшая соседка в межга-



Рис. 4. Туманность Андромеды М 31 (NGC 223) и сопровождающие ее шаровая туманность М32 (вверху) и эллиптическая туманность NGC 205 (влево внизу). Фотоснимок обсерватории Маунт Паломар.

лактическом пространстве—туманность Андромеды (М 31)*) удалена от нас на расстояние 460 *кпс* или 1,5 миллиона *св. лет*. Новейшие исследования Бааде показали, что размеры этой туманности, ее строение и т. д. вплоть до деталей соответствуют нашей системе Млечного Пути. Таким образом, рис. 4 показывает одновременно и нашу систему Млечного Пути, какой она должна быть видна межгалактическому астронавту. С другой стороны, обе маленькие эллиптические туманности М 32 и NGC 205, сопровождающие туманность Андромеды, дают представление о соотно-

*) Туманности обозначаются номерами по каталогу Мессье (Messier 1784) или Дрейера (Dreyer New General Catalogue, 1887). Так, туманность Андромеды имеет номер М 31 или NGC 223.

нении величин внегалактических объектов различного типа. Путем фотометрического сравнения с несколькими хорошо изученными туманностями в нашем «соседстве» можно определить расстояния миллионов менее ярких малых туманностей, удаленных от нас на миллиарды световых лет и более.

2. РАСШИРЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ, ЕЕ ВОЗРАСТ. ВОЗРАСТ ЗЕМЛИ. ВОЗРАСТ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ РАСПРОСТРАНЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ

Спектроскопические наблюдения Слайфера, Хаббла, Хьюмасаона и др. привели к новым данным относительно известного, увеличивающегося линейно с расстоянием, красного смещения или лучевой скорости внегалактических туманностей. Мы приписываем его расширению Вселенной, необходимо вытекающему из общей теории относительности. Если экстраполировать на основе наблюдаемого закона красного смещения движения туманностей в прошлое, то можно прийти к заключению, что в некоторый момент в прошлом вещество во Вселенной было значительно более уплотнено, чем в настоящее время. Поэтому мы говорим (как мы покажем, это имеет смысл и по другим соображениям) о возникновении и возрасте Вселенной. По новейшим исследованиям Хьюмасаона, Мейела и Сэндиджа²⁰ красного смещения и удаления внегалактических туманностей, для возраста Вселенной получается значение (предположительное), равное *)

$$\text{возраст Вселенной: } (5,4 \pm 1,1) \cdot 10^9 \text{ лет.} \quad (1)$$

С другой стороны, можно измерить космические интервалы времени при помощи периодов распада достаточно долгоживущих и «не имеющих родителей» радиоактивных элементов, в частности $U^{235} \rightarrow Pb^{207}$, $K^{40} \rightarrow A^{40}$, $Rb^{87} \rightarrow Sr^{87}$. Таким образом, был определен интервал времени, протекший с момента образования минеральной оболочки Земли. Часто просто говорят о «возрасте Земли». Результаты многочисленных новейших исследований сводятся к численному значению:

$$\text{возраст Земли: } (4,5 \pm 0,3) \cdot 10^9 \text{ лет.} \quad (2)$$

Поскольку интервалы времени (1) и (2) совпадают с точностью до ошибок определения, следует признать, что Земля и тем более Солнце возникли в самом начале «космического развития».

Радиоактивные превращения, о которых сказано выше, помимо этого, являются также свидетельством относительно возраста самих радиоактивных элементов. Так, например, отношение распространенностей изотопов урана U^{235}/U^{238} в настоящее время, как известно, составляет 1/139. Так как U^{235} распадается значительно быстрее, чем U^{238} , то прежде это отношение должно было быть гораздо больше. Поскольку первоначально (в соответствии с известными законами распространенности элементов) отношение обоих изотопов составляло приблизительно 1/10—1/3, легко вычислить, что уран возник приблизительно $3,6 \cdot 10^9$ лет назад. Рассмотрение других радиоактивных распадов приводит к интервалам времени такого же порядка. Полученный результат, а именно то, что возникновение радиоактивных

*) Эта оценка относится, конечно, не к «возрасту всей Вселенной», а лишь к «возрасту» доступной нам части Вселенной; кроме того, «красное смещение» имеет смысл экстраполировать «назад» лишь до тех пор, пока можно пренебречь гравитационным взаимодействием между галактиками (см. В. А. Фок, Теория пространства, времени и тяготения, Гостехиздат, 1956, §§ 94—95). *Ред.*

элементов практически совпадает с возникновением Вселенной, мы свяжем со столь же удивительным результатом количественного спектрального анализа звезд, а именно, что

во всяком случае в подавляющем большинстве звезд имеется такая же распространенность химических элементов (мы вернемся к некоторым исключениям). Даже самые отдаленные спиральные туманности обнаруживают, в среднем, те же спектральные линии (H и K Ca II), как и, например, туманность Андромеды, откуда мы и заключаем, что отношение распространенности Ca/H в различных объектах должно быть приблизительно одинаковым.

Из описанных наблюдений напрашивается вывод, что при «возникновении Вселенной» господствовали столь высокие температуры ($T \approx 10^{10} \text{ }^\circ\text{K}$, что соответствует $kT \approx 1 \text{ Мэв}$) и плотности, что могли происходить все ядерные реакции. По мере прогрессирующего охлаждения и разрежения вещества затем установилась «универсальная распространенность элементов». Гамов, Альфер, Герман (см., например, ²) более детально рассмотрели картину возникновения Вселенной и элементов и прежде всего отметили, что распространенность элементов как функция атомного веса A , изображается кривой, ход которой близок к зеркальному отражению кривой эффективных сечений нейтронов с энергией $\sim 1 \text{ Мэв}$. Обе кривые (рис. 5) почти линейно спадают до значения $A \sim 100$, а при $A > 100$ принимают почти постоянное значение. И только ядра с «магическими» числами нейтронов, т. е. с замкнутыми оболочками, выпадают как из кривой распространенности, так и из кривой эффективных сечений. Таким образом, если отвлечься от всяких тонкостей, то во всяком случае ясно, что при возникновении рас-

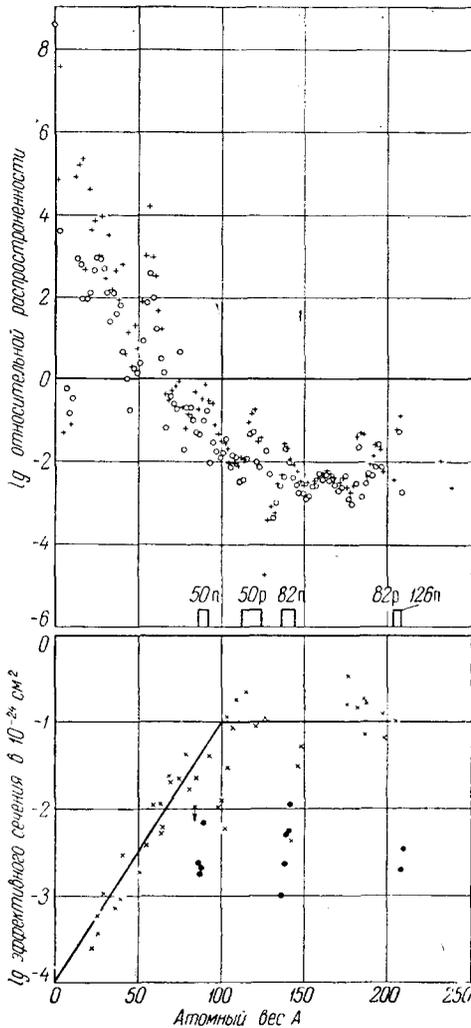


Рис. 5. Вверху: распространенность атомных ядер (точнее — изотопов, т. е. сумм изобаров) в функции атомного веса A . Кругами обозначены четные, крестиками — нечетные значения A . Внизу отмечены некоторые области замкнутых оболочек ядер — «магические числа». Соответствующие им ядра имеют распространенность несколько выше средней. Внизу: эффективные сечения захвата нейтронов с энергией 1 Мэв . Ядра, имеющие близкие к «магическим» числа нейтронов $50n$, $82n$ и $126n \pm 1$ (обозначенные зачерненными кружками) и соседние с ними имеют малые эффективные сечения (по Альферу и Герману²).

пространности элементов свободные нейтроны с энергиями $\sim 1 \text{ Мэв}$ играли важную роль. Мы не собираемся здесь углубляться в предположения

(конечно в высшей степени интересные) относительно того, как при «первичном взрыве» из исключительно горячего и плотного «яйца» могла возникнуть Вселенная со всей иерархией космических образований, со спиральными туманностями, звездными скоплениями, звездами и т. д., со всеми их характерными свойствами, а обратимся к вопросу о том, каким образом при помощи астрономических наблюдений в сочетании с твердо установленными законами физики удастся непосредственно заглянуть в процесс эволюции определенных звезд и звездных групп. Таким способом мы хотя и не приходим к окончательной картине эволюции Вселенной, однако приобретаем твердую почву под ногами и можем надеяться установить соответствующие исходные пункты для будущих исследований.

3. ИСТОЧНИКИ ЗВЕЗДНОЙ ЭНЕРГИИ

В качестве важнейшего «проявления жизни» звезд исследуем сначала генерирование энергии в них:

а) Гравитационная энергия, независимо от того, является ли она следствием внедрения межзвездного вещества (Р. Майер, 1846) или сжатия самой звезды (Гельмгольц, 1854; лорд Кельвин, 1861), может покрыть потребность в лучистой энергии, например, Солнца максимум в течение нескольких десятков миллионов лет. Для звезд меньшей массы получаются более длительные, для больших звезд более короткие промежутки времени. Этот процесс на основе современных данных был впервые подробно рассчитан Хенизем, Ле-Левье и Левэ¹⁸. Таким образом, в качестве единственного приемлемого источника остается ядерная энергия.

б) Ядерная энергия (Перрен, Эддингтон, 1919—1920). При тех температурах и плотностях, которые получаются для внутренних зон звезды по современной теории внутреннего строения звезд, по Бете и Вейцекеру (1938) возможны два процесса, которые в конечном результате приводят к превращению водорода в гелий. Мы приводим оба процесса (в общепринятых обозначениях: p —протон, β^- —электрон, β^+ —позитрон, ν —нейтрино) с указанием выделяемой энергии в $M_{\odot}c^2$ и времен реакции, которые были вычислены Фаулером¹³ для параметров состояния в центральной области Солнца по Эпштейну и Мотцу¹² ($T=13 \cdot 10^6$ °К; плотность \times концентрацию массы водорода $\rho X_H = 100$ г/см³). В скобках

1. p-p цикл (Бете, Кричфилд и Салпетер)

	Выделяемая энергия в $M_{\odot}c^2$	Среднее время реакции
$H^1(p, \beta^+ \nu) D^2$ $\beta^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ $D^2(p, \gamma) He^3$ $He^3(He^3, 2p) He^4$	2,0,164+(2,0,257) 2,1,022 2,5,494 12,847	14·10 ⁹ лет 5,7 сек. 10 ⁶ лет
$4H^1 \rightarrow He^4$	26,207+(0,514) $M_{\odot}c^2$	

(Первые три реакции появляются во всем цикле дважды.)

указана та часть генерируемой энергии, которая выделяется вместе с нейтрино. Вследствие своего крайне малого эффективного сечения нейтрино могут свободно проникать через звезды и всю Вселенную.

2. CN-цикл (Бете, Вейцекер)

	Выделяемая энергия в Мэв	Среднее время реакции
$C^{12} (p, \gamma) N^{13}$	1,945	$1,3 \cdot 10^7$ лет
$N^{13} (\beta^+ \nu) C^{13}$	1,502+(0,720)	7,0 мин.
$C^{13} (\beta, \gamma) N^{14}$	7,542	$2,7 \cdot 10^6$ лет
$N^{14} (p, \gamma) O^{15}$	7,347	$3,2 \cdot 10^8$ лет
$O^{15} (\beta^+ \nu) N^{15}$	1,729+(0,976)	82 сек.
$N^{15} (p, \alpha) C^{12}$	4,961	$1,1 \cdot 10^6$ лет
$4H^1 \rightarrow He^4$	25,026+(1,696) Мэв	

При температурах ниже $\sim 15 \cdot 10^8$ °К преобладает pp-процесс и тогда генерирование энергии на г/сек растет как $\epsilon \sim T^{4,1}$. При более

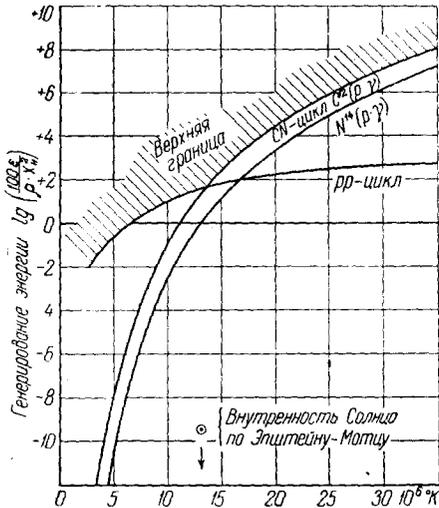


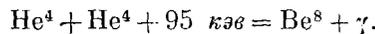
Рис. 6. Генерирование энергии ϵ в эрг/г.сек веществом звезды в зависимости от температуры T (по Фаулеру¹³). X_H —доля водорода, X_{CN} —доля C+N по массе, ρ —плотность. Здесь принято $X_{CN} : X_H = 0,5\%$.

высоких температурах преобладает CN-процесс. Согласно приведенной выше таблице реакция $N^{14} \rightarrow O^{15}$ определяет скорость всего процесса и тем самым отдачу энергии, которая тогда равна $\epsilon \sim T^{20,3}$. Если бы ядро N^{14} обладало резонансным уровнем в области $\sim 10 \div 50$ кэв, что, по-видимому, не исключено, то первая реакция $C^{12} \rightarrow N^{13}$ дала бы верхний предел скорости реакции и генерации энергии, которая тогда соответствовала бы соотношению $\epsilon \sim T^{18,3}$ (ср. рис. 6).

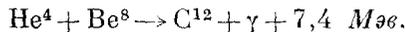
3. Процесс Салпетера

Только при температурах $\sim 2 \cdot 10^8$ °К (т. е. примерно в 10 раз превышающих температуру в центре звезд главной последовательности) начинается новый, отмеченный Салпетером (1951) ядерный процесс, при котором сгорает уже не водород, а только гелий; соответственно этому выход энергии становится меньше.

Процесс начинается со слегка эндотермической реакции



Неустойчивый Be^8 с концентрацией порядка 10^{-10} находится все еще в термодинамическом равновесии, а затем переходит в C^{12} по схеме



В общем, на каждый затраченный атом гелия возникает лишь 2,43 Мэв, между тем как образование одного атома гелия по схеме (1) или (2) дает 26,2 или соответственно 25,0 Мэв.

4. ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА И ЗВЕЗД ГЛАВНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрим сначала, в качестве примера, энергетический баланс Солнца. Масса Солнца $M = 1,983 \cdot 10^{33}$ г и состоит приблизительно на 57% из водорода. Полное превращение этого водорода в гелий по pp-процессу дало бы $0,71 \cdot 10^{52}$ эрг*). При теперешней светимости Солнца оно расходует $3,84 \cdot 10^{33}$ эрг/сек, т. е. 10% своего водорода Солнце израсходует в $6 \cdot 10^9$ лет. Это привело бы к заметному изменению свойств Солнца. Но с момента своего возникновения, приблизительно за $5 \cdot 10^9$ лет, Солнце едва изменилось. То, что Солнце действительно является старой звездой, доказывается возрастом Земли и различными наблюдениями в нашей планетной системе.

А как обстоит дело с энергетическим и водородным балансом других звезд? Рассмотрим сначала звезды так называемой главной последовательности. К ней принадлежит подавляющее большинство звезд нашей окрестности. Они, по крайней мере в своих внешних слоях, обнаруживают практически один и тот же химический состав. Масса, светимость (т. е. выход энергии в единицу времени) и все другие характеристики являются однозначными функциями абсолютной яркости или спектрального класса. Более подробно это можно видеть из таблицы I.

Таблица I

Звезды главной последовательности и время их эволюции

Спектральный класс	Температура поверхности T_e	Масса M/M_\odot	Светимость L/L_\odot	Время эволюции в годах t_E
O 7,5	38 000°	25	80 000	$2 \cdot 10^6$
B 0	33 000°	16	10 000	$1 \cdot 10^7$
B 5	(17 000°)	6	600	$6 \cdot 10^7$
A 0	9500°	3	60	$3 \cdot 10^8$
F 0	6900°	1,5	6	$1,5 \cdot 10^9$
G 0	5800°	1	1	$6 \cdot 10^9$
K 0	4800°	0,8	0,4	$12 \cdot 10^9$

Если для какой-нибудь звезды известны масса (в единицах солнечной массы M/M_\odot) и светимость, т. е. выход энергии (также отнесенное к Солнцу L/L_\odot), то мы можем легко вычислить также и время, в течение которого эта звезда израсходует 10% своего водорода. Будем называть это время кратко временем эволюции t_E этой звезды

$$t_E = 6 \cdot 10^9 \frac{M/M_\odot}{L/L_\odot} \text{ лет.} \quad (3)$$

Из таблицы I видно, что относительно холодные звезды главной последовательности, примерно ниже F5, с массами менее $1,3 M_\odot$, очевидно, со времени своего возникновения (которое могло произойти максимум $5 \cdot 10^9$ лет назад) израсходовали лишь несущественную долю своего водорода. С другой стороны, горячие звезды более ранних спектральных классов могли «возникнуть» только сравнительно недавно, за время порядка t_E . Возраст звезд классов O и B даже меньше времени обращения

*) Из CN-процесса получается почти такое же количество энергии. Поэтому в дальнейшем мы можем не делать никакого различия между генерированием энергии по процессу pp и по процессу CN.

Млечного Пути в нашей окрестности; такие звезды, следовательно, возникли практически в их сегодняшнем окружении.

Этот интересный взгляд получил недавно прямое подтверждение, которое одновременно может служить указанием на механизм возникновения звезд.

В. А. Амбарцумян³ и др. убедительно указали на то, что абсолютно яркие звезды ранних спектральных классов образуют в Млечном Пути группы — так называемые ОВ-ассоциации (*). А. Блау^{7а} на основании анализа собственных движений звезд показал, что звезды подобных ассоциаций, например в созвездиях Персея и Ящерицы, разбегаются от общего начала

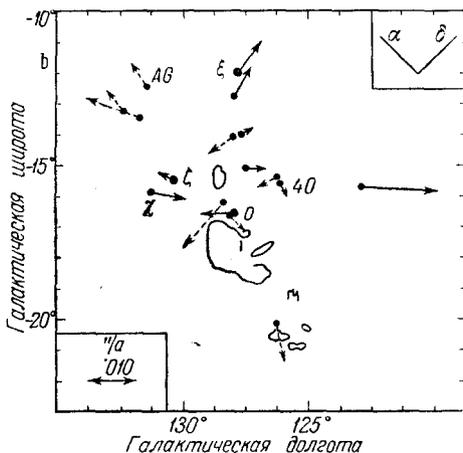


Рис. 7. Собственные лучевые движения звезд в ассоциации ζ -Персея. Стрелками указаны собственные движения в дуговых секундах в год (внизу приведен масштаб). Сплошными стрелками приведены значения, известные с вероятной ошибкой $< \pm 0,003''$ в год; пунктирными стрелками указаны значения, известные с меньшей точностью. Нанесены контуры темной туманности Барнарда (по Дельхайе и Блау⁷).

$\rho \approx 6 \cdot 10^{-22}$ г/см³, то следует заключить, что вещество звезды, имеющей массу в 20 солнечных единиц, первоначально было распределено по шару с радиусом $0,8 \text{ пс} = 2,7 \text{ св. лет}$. Для того чтобы от таких расстояний прийти к сформированной звезде массой 20 солнечных единиц, этому веществу уже требуется $5,4 \cdot 10^6$ лет. Сама по себе конденсация, по-видимому, в некоторой степени возможна, однако начальные стадии ее пока плохо выяснены. Расширение ассоциаций, пожалуй, можно, в соответствии с работами Оорта и Спитцера²⁸, отнести за счет ионизации и нагревания межзвездного вещества излучением первоначальной звезды О, что напоминает некоторого рода «реактивный» эффект.

Однако в последнее время Блау и Морган⁸ обнаружили, что в области туманности Ориона звезды АЕ Возничего (О 9,5 V), μ Голубя (В 0 V) и 53 Овна (В 2 V) начали движение: первые две — 2,6 миллиона лет назад

*) Мы не можем здесь останавливаться на так называемых Т-ассоциациях Амбарцумяна (скопления относительно холодных карликовых звезд в области большой туманности).

со скоростями $\sim 10 \text{ км/сек}$. Если мысленно проследить их движение назад, то окажется, что, например, для ассоциации ζ Персея (рис. 7) получится возраст в $1,5 \cdot 10^6$ лет, а для ассоциации Ящерицы $4,2 \cdot 10^6$ лет. С другой стороны, самые ранние звезды ассоциации Персея принадлежат к спектральному классу О7, а ассоциации Ящерицы — к спектральному классу О9. Согласно таблице 1, вычисленное «время эволюции» самих ранних звезд обеих ассоциаций удивительно хорошо совпадает с наблюдаемым возрастом. ОВ-ассоциации всегда связаны с большими массами межзвездного вещества и из эмпирических соображений можно почти наверное утверждать, что эти звезды образовались из этого межзвездного вещества. Однако полное понимание образования звезд в деталях представляет еще некоторые трудности.

Если исходить из плотности диффузного вещества, соответствующей 100-кратной плотности нормального межзвездного вещества, т. е.

со скоростью 127 км/сек, а последняя—4,8 миллионов лет назад со скоростью 73 км/сек! Такие совершенно исключительно высокие для ранних спектральных классов скорости этих звезд ассоциации Ориона пока совершенно непонятны.

5. ДИАГРАММА ГЕРЦШПРУНГА—РЕССЕЛА

Прежде чем далее проследить эволюцию звезд, мы должны установить необходимые астрономические основы. Для того чтобы обозреть звезды, будь то звезды нашей окрестности в системе Млечного Пути, или звезды какого-нибудь галактического звездного скопления, или шарового звездного скопления, мы наносим их на диаграмму Герцшпрунга—Рессела. Это значит, что мы наносим для каждой звезды ее абсолютную яркость M_v^* в зависимости от ее спектрального класса, ее температуры или ее (очень точно измеряемого фотоэлектрически) показателя цвета. В последнем случае говорят также о диаграмме цвет—яркость.

Диаграмма Герцшпрунга—Рессела для звезд нашей окрестности (рис. 8) хорошо известна со времени классических работ Герцшпрунга и Рессела (1914), причем большинство звезд группируются на уже упомянутой главной последовательности. Справа от нее мы находим отделенные некоторым промежутком звезды-гиганты. С другими, более редкими группами звезд мы частично познакомимся далее. Важнейшим открытием новейшей астрономии является то, что определенные, очевидно генетически связанные группы звезд (например, звездные скопления) имеют также определенную характерную для них диаграмму Герцшпрунга—Рессела. В частности, Бааде в 1944 г. открыл, что как в нашем Млечном Пути, так и в подобных внегалактических туманностях следует различать так называемые звезды населения типа I, к которым принадлежат спиральные рукава (следовательно, в частности, также наша окрестность), OB-ассоциации, галактические звездные скопления и т. д., и звезды населения типа II, к которым принадлежат ядро системы и исходящие из него быстро движущиеся звезды, а также шаровые звездные скопления и т. д. В то время как диаграмма Герцшпрунга—Рессела для населения типа I соответствует нашей окрестности, диаграмма Герцшпрунга—Рессела для населения типа II выглядит совершенно иначе. Разумеется, нельзя слишком схематически представлять разделен-

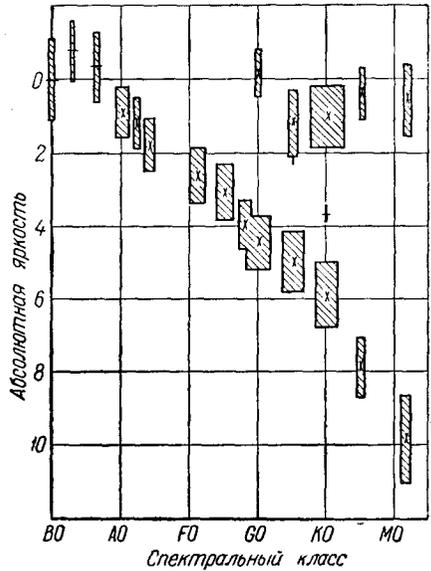
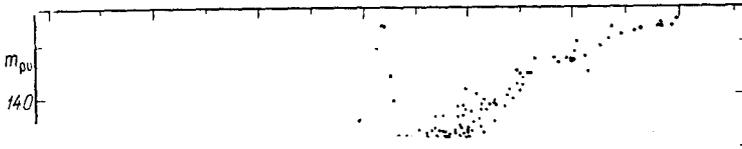


Рис. 8. Диаграмма Герцшпрунга—Рессела населения I нашей окрестности, полученная по методу тригонометрических параллаксов. (Высота прямоугольников соответствует дисперсии значений абсолютной яркости M_v ; ширина их соответствует числу измеренных значений для группы).

*) Для звезд одного и того же расстояния r (пс), в соответствии с известным определением звездных величин кажущаяся яркость m и абсолютная яркость M различаются на постоянную величину — так называемый модуль расстояния $m-M=5 \lg(r/10)$ (если имеется межзвездное поглощение, то следует заранее внести поправку на него в значение m).

ние звезд на населения двух типов. Очевидно, каждое космическое образование одного и того же происхождения имеет одну характерную для него диаграмму Герцшпрунга—Рессела. Таким образом, сравнение диаграмм Герцшпрунга—Рессела родственных образований представляет исключительное средство для изучения эволюции этих образований.

Если мы на мгновение отвлечемся от рассматриваемых непосредственно ниже различий главных последовательностей, то бросается в глаза, что они отклоняются вверх при $M_p \approx 3^m, 5$ так же, как и в случае «архаического»



ниже ветви шаровых скоплений круглым счетом на 2^m . Быть может, следовало бы здесь говорить о некотором «старом населении типа I»? Во всяком случае следовало бы далее дифференцировать эту схему двух населений, как это происходит с течением времени со всеми понятиями.

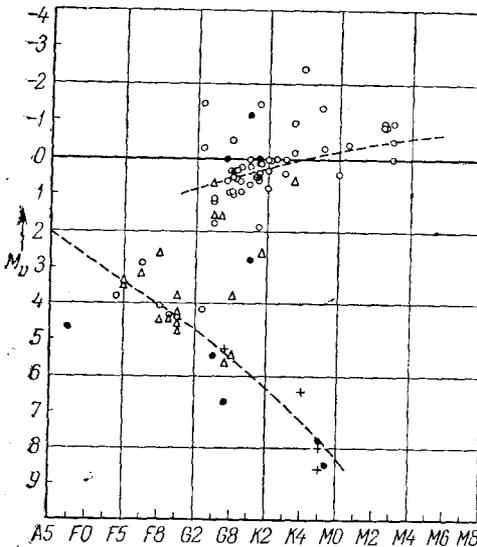


Рис. 12. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела для «бегунов» (>85 км/сек) нашей системы Млечного Пути. Абсолютные яркости M_v : \circ — полученные спектроскопическим методом; \bullet — полученные из тригонометрических или динамических соображений; Δ — средние из обоих значений; $+$ — некоторые наблюдения обсерватории Маунт-Вилсон. Для сравнения пунктиром нанесена диаграмма населения типа I (по Кинану и Келлеру²⁴).

Более подробное рассмотрение прежде всего показывает, что группа «бегунов», выделенная сначала только с кинематической точки зрения, может быть разбита на несколько подгрупп, различающихся физически и кинематически, например, на звезды типа Миры Кита (переменные красные гиганты с периодами от ~ 150 до 350 суток), звезды типа RR Лиры (короткопериодические цефеиды) и субкарлики. Последние ярче всего обнаруживают природу «бегунов» и образуют значительную долю звезд с большими компонентами скорости в направлении, перпендикулярном плоскости Млечного Пути. Это замечание Арпа⁴ (ср. также¹⁵) приводит к тому, что преобладание субкарликов в M13 во всяком случае уже не представляется столь удивительным. В теоретическом отношении связь между физическими и кинематическими свойствами звезд пока еще совершенно неясна. Цел...

главных последовательностей отдельных скоплений слева (рис. 9) является, таким образом, «стандартной главной последовательностью» звезд, которые полностью конденсировались, но еще не израсходовали существенной доли своего водорода. Звезды, лежащие в нижней части диаграммы Герцшпрунга—Рессела вправо от стандартной главной последовательности, согласно этому представлению еще не вполне конденсировались (ср. Хеннэй и др.¹⁸, а также Уокерс³⁵—наблюдения над NGC 2264); звезды, лежащие сверху справа, должны были бы израсходовать уже заметную часть своего водорода. Шенберг и Чандрасекар³², Гаррисон¹⁷ и др. теоретически проследили начальные стадии этого последнего процесса в предположении, что водород испытывает превращение в гелий только в некоторой ограниченной зоне реакций внутри звезды и что остальное вещество не перемешивается с этими «областями горения». Новейшие теоретические исследования говорят за то, что диффузия и конвекция в общем не могут влиять на перемешивание звездного вещества. Однако эта исключительно важная астрофизическая проблема должна быть подвергнута дальнейшим исследованиям. Теория более поздних стадий эволюции звезд скоплений или, говоря более общо, звезд населения типа I в настоящее время еще не существует. Было высказано предположение, что последовательность самых старых звезд, например, белых карликов, кончается далеко влево под главной последовательностью. Так, Джонсон и Накл²² нашли в Гиадах (при $B-V > 0,4$) на расстоянии приблизительно 2^m под главной последовательностью слабо населенную последовательность субкарликов; их место в последовательной эволюции также не выяснено.

Оставим теперь объекты населения I, составляющего «диск» нашего Млечного Пути и соответствующих спиральных галактик, и изучим почти не концентрирующиеся к центральной плоскости объекты населения II; мы начнем с шаровых звездных скоплений.

7. ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД НАСЕЛЕНИЯ ТИПА II.

ШАРОВЫЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ. БЫСТРО ДВИЖУЩИЕСЯ ЗВЕЗДЫ

Мы уже упоминали об основоположных работах Шепли (начиная с 1918 г.) над определением расстояний шаровых скоплений при помощи короткопериодических цефеид. В последние годы были получены новые чрезвычайно существенные результаты с помощью мощных приборов обсерваторий Маунт-Вилсон и Маунт-Паломар группой молодых астрономов: Арп, Баум, Сэндидж, Уокер и др. под руководством Бааде.

На рис. 10 приведена исследованная Сэндиджем^{30a} вплоть до $m_{pv} = -21^m$ диаграмма Герцшпрунга—Рессела для шарового звездного скопления M3. Только эти новейшие работы позволили обнаружить слабые звезды главной последовательности ниже $m_{pv} > 19^m$. Самыми яркими звездами скопления (вверху справа) являются красные гиганты. Отсюда начиная—совершенно иначе, чем на прежних наших диаграммах—при $m_{pv} \approx 16^m$ простирается ветвь влево (горячие звезды); в промежутке все звезды переменны; здесь находятся уже упомянутые переменные короткопериодические цефеиды (они не нанесены на рис. 10). Известная абсолютная яркость $M_v = 0,0$ позволяет определить, по Шепли, только расстояния отдельных скоплений и нанести их диаграммы Герцшпрунга—Рессела соответственно друг над другом. На рис. 11 это сделано по Бауму⁵⁶ для трех шаровых звездных скоплений M3, M92 и M13. Для сравнения нанесена (схематически) также диаграмма Герцшпрунга—Рессела звезд населения I нашей окрестности (пунктир).

Если мы на мгновение отвлечемся от рассматриваемых непосредственно ниже различных главных последовательностей, то бросается в глаза, что они отклоняются кверху при $M_v \approx 3^{m,5}$ так же, как и в случае «архаического»

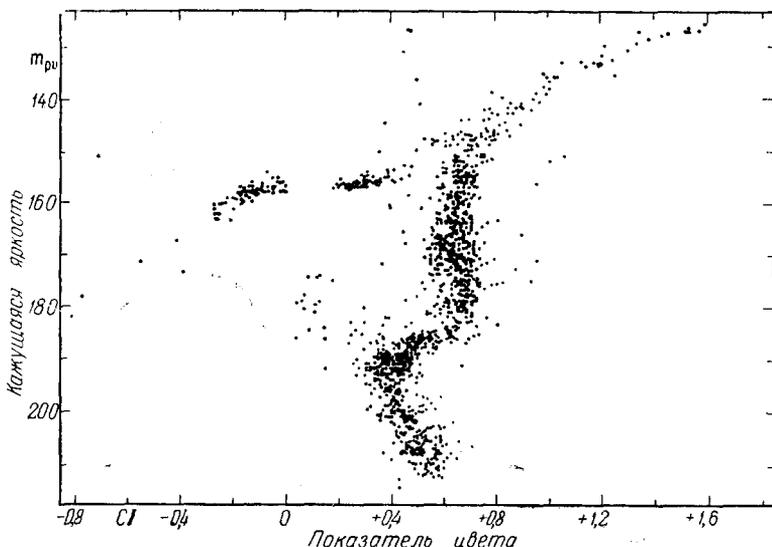


Рис. 10. Диаграмма цвет — яркость шарового звездного скопления М 3 (по Сэндиджу^{30а}).

галактического звездного скопления М 67. Таким образом, мы приходим к выводу, что отклоняющаяся вырво ветвь красных гигантов и пологая верхняя ветвь короткопериодических цефеид на диаграмме Герцшпрунга —

Рессела шарового скопления состоит из звезд с массой от одной до двух солнечных единиц (звезды существенно более массивные настолько быстро эволюционировали, что, можно полагать, они исчезли), которые первоначально находились при $M_v \approx 3^{m,5}$ на главной последовательности, а затем, израсходовав свой водород, эволюционировали далее. Сэндидж^{30б}, Шварцшильд и Хойл¹⁹ и др. пытались следующим образом истолковать теоретически этот процесс эволюции: сначала во внутренней «зоне горения» звезды (следовательно, перемешивание не должно иметь места) водород постепенно превращается в гелий. В соответствии с этим диаграмма Герцшпрунга—Рессела этой звезды смещается вправо (т. е.

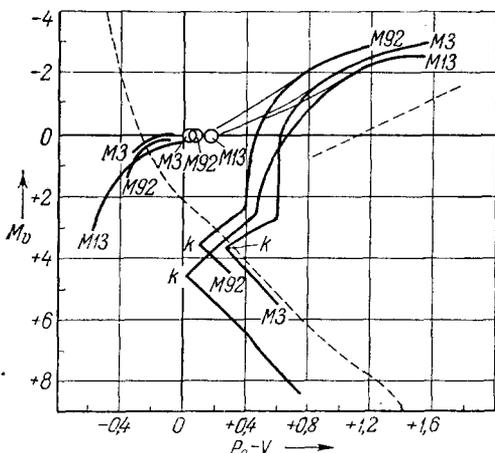


Рис. 11. Диаграмма цвет — яркость шаровых звездных скоплений М 3, М 92 и М 13 по Бауму⁵.

звезда становится краснее) и несколько выше (т. е. она становится несколько ярче). Когда израсходовано приблизительно 20% всего водорода, конвекция во внешних слоях приобретает большее значение, и звезда сме-

щается вверх, а затем вправо вверх, т. е. к ветви красных гигантов, до тех пор, пока не израсходует приблизительно 50% водорода. Тогда температура внутренней части звезды поднимается несколько выше 10^8 ° К и становится возможным процесс Салпетера ($3\text{He}^4 \rightarrow \text{C}^{12}$), позволяющий звезде относительно быстро переместиться влево до израсходования $\sim 80\%$ водорода. Звезда становится во внешней части горячее, однако она сжимается так, что в конечном счете ее светимость падает.

Эта теория, требующая чрезвычайно сложных расчетов, содержит ряд пунктов, позволяющих внести дальнейшую ясность. С точки зрения наблюдателя, следовало бы далее спросить: «на чем основано различие трех диаграмм Герцшпрунга—Рессела на рис. 11»? Баум располагает эти и еще некоторые другие звездные скопления в виде последовательности

Шаровые звездные скопления . . .	M3	5	15	2	92	13	10
Число короткопериодических цефеид	165	71	60	13	13	4	0

Реальность такого расположения подтверждается тем, что число короткопериодических цефеид в ней убывает слева направо. Далее, скопления с небольшим числом переменных, помещенные в правой части таблицы, располагаются ближе к плоскости Млечного Пути, чем помещенные слева скопления, содержащие много переменных звезд.

Следует ли рассматривать вышеприведенное расположение как последовательную эволюцию и каковы в конечном счете астрофизические основания для такого расположения, пока неизвестно.

Совершенно неожиданным—даже с точки зрения вышеописанного теоретического развития—оказалось наблюдение Баума⁵⁶, состоящее в том, что главная последовательность M13 лежит приблизительно на 2^m ниже главной последовательности M3 и главной последовательности населения I (нанесенной на рис. 11 пунктиром). Следовательно, M13 имеет действительно только одну последовательность с у б к а р л и к о в, которая, впрочем, точно соответствует слабо намеченной последовательности в Гиадах под собственно главной последовательностью.

Прежде чем перейти к рассмотрению дальнейших вопросов, целесообразно подробнее изучить, для сравнения с шаровыми скоплениями, другие образования населения типа II. Э л л и п т и ч е с к и е т у м а н н о с т и (ближе всего к нам расположены две туманности—спутника туманности Андромеды) и ядро нашего Млечного Пути (в большей части закрытое плотными темными облаками) в настоящее время еще не поддаются подробному исследованию. Остаются отдельные группы быстро движущихся звезд, которые обычно причисляются к населению II—так называемые «б е г у н ы». Это—звезды, движущиеся по сравнительно сильно вытянутым орбитам вокруг галактического центра; поэтому они имеют в ы с о к и е с к о р о с т и относительно Солнца (так, субкарлик CD—29° 2277 имеет лучевую скорость +536 км/сек); векторы этих скоростей преимущественно направлены в противоположное нашему движению (галактическая долгота 55°) полушарис. Диаграмма Герцшпрунга—Рессела для бегунов (рис. 12) имеет известное сходство с диаграммой для шаровых звездных скоплений в том отношении, что главная последовательность также находится выше F4. Это наряду с некоторыми другими соображениями говорит за то, что мы здесь имеем дело со старыми звездами. Ниже этой главной последовательности, на среднем расстоянии от 1 до 2^m можно также различить последовательность субкарликов (подробнее см. ²³). В е т в ь г и г а н т о в на диаграмме «бегунов», напротив, практически совпадает с такой же ветвью населения I нашей окрестности и расположена

ниже ветви шаровых скоплений круглым счетом на 2^m . Быть может, следовало бы здесь говорить о некотором «старом населении типа I»? Во всяком случае следовало бы далее дифференцировать эту схему двух населений, как это происходит с течением времени со всеми поня-

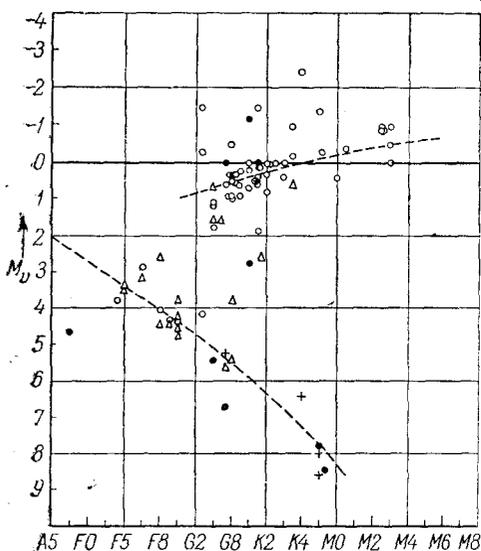


Рис. 12. Диаграмма Герцшпрунга — Рассела для «бегунов» (>85 км/сек) нашей системы Млечного Пути. Абсолютные яркости M_v : \circ — полученные спектроскопическим методом; \bullet — полученные из тригонометрических или динамических соображений; \triangle — средние из обоих значений; $+$ — некоторые наблюдения обсерватории Маунт-Вилсон. Для сравнения пунктиром нанесена диаграмма населения типа I (по Кинану и Келлеру²⁴).

воду того, что по О. Струве³⁴ звезды типа RR Лиры с периодами более 0,4 суток в среднем имеют значительно большие лучевые скорости, чем звезды с периодами меньшими, чем 0,4 суток!)

8. РАЗЛИЧИЕ НАСЕЛЕНИЙ I И II. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД

За всеми этими исследованиями и рассуждениями неизменно встает вопрос: «Почему звезды населений I и II и, в частности, звезды галактических и шаровых скоплений проходят различный путь эволюции? В чем, собственно, состоит их физическое различие?»

К этому вопросу можно подойти со спектроскопической стороны. Следовательно, мы будем искать спектральные различия звезд населения I нашей окрестности и звезд населения II, например шаровых скоплений, а также субкарликов или «бегунов» Млечного Пути. Практическую трудность, состоящую в том, что объекты второй группы в среднем имеют очень малую светимость, пока оставим в стороне.

Астроспектроскопия пытается классифицировать свои объекты практически сначала по двум параметрам: спектральный класс (Sp) и класс светимости (LC). Если принять, что звезды подчиняются одному и тому же соотношению между массой, светимостью и температурой, то

тением времени со всеми понятиями.

Более подробное рассмотрение прежде всего показывает, что группа «бегунов», выделенная сначала только с кинематической точки зрения, может быть разбита на несколько подгрупп, различающихся физически и кинематически, например, на звезды типа Миры Кита (переменные красные гиганты с периодами от ~ 150 до 350 суток), звезды типа RR Лиры (короткопериодические цефеиды) и субкарлики. Последние ярче всего обнаруживают природу «бегунов» и образуют значительную долю звезд с большими компонентами скорости в направлении, перпендикулярном плоскости Млечного Пути. Это замечание Арпа⁴ (ср. также¹⁵) приводит к тому, что преобладание субкарликов в M13 во всяком случае уже не представляется столь удивительным. В теоретическом отношении связь между физическими и кинематическими свойствами звезд пока еще совершенно неясна. Что, например, можно сказать по по-

можно также с успехом классифицировать звезды по спектральному классу и абсолютной яркости M_v . В соответствии с нашими современными представлениями такая классификация не подходит ко всем тем звездам, которые уже израсходовали существенную часть своего водорода, т. е., в частности, не подходит, например, к верхней части диаграммы Герцшпрунга—Рессела для шаровых скоплений.

С другой стороны, из теории звездных атмосфер следует, что спектр атмосферы звезды с известным химическим составом определяется двумя параметрами: (эффективной) температурой T_e и ускорением силы тяжести на поверхности звезды g^*). В предположении, что химический состав звезд один и тот же и что другие параметры (например, вращение звезд или «застывшие» магнитные поля в веществе) не играют никакой роли, следовало бы ожидать, что «практическая» классификация (S_p, LC) должна быть связана простым преобразованием координат с «теоретической классификацией» (T_e, g). Если какая-нибудь звезда выпадает из этого двухмерного многообразия, то она должна отличаться от других звезд либо своим составом, либо магнитным полем, либо каким-нибудь другим параметром.

После этих общих замечаний приведем несколько специальных наблюдений.

Для красных гигантов шаровых скоплений следовало бы, в соответствии с показателем цвета, прежде всего ожидать спектр класса $K 0$; вместо этого, например, у $M 92$ находят существенно более ранний спектральный класс, примерно $F 6$. На рис. 13 приведены (по Бауму⁵⁰) кривые зависимости между выбранным показателем цвета, спектральным классом S_p и классом светимости LC . Экспериментальные точки для красных гигантов трех шаровых звездных скоплений лежат все же левее кривой LC для сверхгигантов Ib . Эта последняя кривая сначала совсем не подходит для средней абсолютной яркости этих звезд. Однако, если мы будем исходить из того, что массы этих звезд ($\sim 1,3 M_\odot$) значительно меньше, чем массы соответствующих звезд населения I , то мы получим также «слишком малое» ускорение силы тяжести g и станет понятным, что эти спектры, так сказать, симулируют под сверх-сверхгигантов! Но и после пока еще качественного описания спектров, а также после учета этого эффекта остаются еще отклонения от нормальной схемы (S_p, LC), подобные более детально изученным эффектам, наблюдаемым у звезд населения II нашей системы Млечного Пути. Поэтому мы сейчас и обратимся к ним.

С у б к а р л и к и и, во всяком случае, значительная часть «бегунов» нашей системы Млечного Пути, т. е. типичные звезды населения II , имеют сравнительно малые, но ясно выраженные спектроскопические отличия

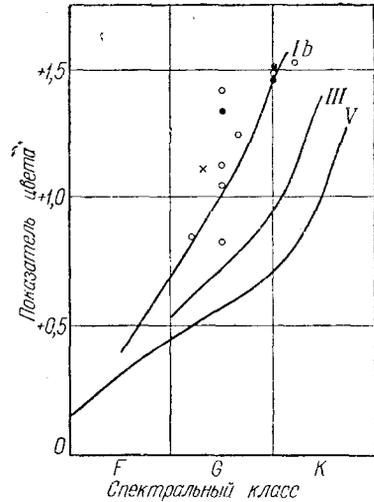


Рис. 13. Зависимость между спектральным типом, показателем цвета и классом светимости LC по Моргану. Кривые относятся к звездам населения типа I нашей окрестности с $LC=V$ (главная последовательность), III (гиганты) и Ib (сверхгиганты). На диаграмму нанесены красные гиганты шаровых звездных скоплений: \circ — $M 13$, \square — $M 3$, \times — $M 92$ (по Бауму⁵⁰).

*) Например, Солнце имеет эффективную температуру $T_e=5780^\circ K$, а ускорение силы тяжести на его поверхности $g=2,74 \cdot 10^4 \text{ см сек}^{-2}$ или в 28 раз больше ускорения на земной поверхности.

от «нормальных» звезд населения I. Однако здесь трудно дать какие-нибудь конкретные указания, так как, особенно в старой литературе, часто нельзя понять, какие критерии применялись для классификации (Sr , LC). Во всяком случае, по-видимому, можно считать твердо установленным, что звезды населения II спектральных классов F5—G5 имеют более слабые линии металлов, более сильную G-полосу молекулы CN и более слабое CN-поглощение, чем нормальные звезды.

Безусловно необходимое количественное определение этих эффектов находится еще в самом зародыше. Тщательные измерения Вельмана³⁶ дали для одной звезды со слабыми линиями (которая, во всяком случае, не принадлежит к бегунам) линии нейтральных и ионизованных металлов на 10—12% более сильные, чем для другой сравниваемой с ней звезды! Укажем, в частности, на работу Килана и Келлера³⁴, а также на исследования Кейпера, Поппера, Романа и др.

Интерпретация рассматриваемых критериев (полагая, что наблюдения правильны) осложняется тем, что для использования в качестве критерия линий металлов практически отсутствует твердый эталон (например, точный показатель цвета); интерпретация интенсивности полос очень сомнительна вследствие чувствительности полос, состоящих из многочисленных неразрешенных линий, к турбулентности, к эффектам насаивания и т. п. факторам, лишь слабо влияющим на фраунгоферовы линии.

Несмотря на эти трудности, Шварцшильд, Спитцер и Вильдт³³ взяли на себя смелость попытаться истолковать наблюдения в том смысле, что в звездах населения II распространенность легких неметаллических элементов (C, N, O) по сравнению с водородом примерно вдвое, а распространенность металлов примерно втрое меньше, чем в звездах населения I.

Население II, следовательно, существенно отличается от населения I химическим составом звездного вещества. Со спектроскопической точки зрения очень трудно сделать отсюда дополнительные выводы, так как точность количественного спектрального анализа звезд различного типа в настоящее время ограничивается множителем, равным примерно двум. Следовательно, здесь можно получить дальнейшие результаты только при помощи очень трудных дифференциальных измерений. С астрономической точки зрения, по-моему, взгляд Шварцшильда, Спитцера и Вильдта встречает большие трудности. Сами авторы допускают возможность того, что звезды населения I возникли из межзвездных облаков и что при этом вещество, уже сконденсированное в космическую пыль, дополнительно привнесло тяжелые элементы. Однако ввиду наличия турбулентности и внутреннего трения частичное разделение пыли и газа едва ли возможно и не наблюдалось. Кроме того, нельзя понять, почему звезды населения II должны химически отличаться от практически однородных с ними звезд населения I, как, например, Солнце. Быть может, следовало бы скорее исходить из кинематических различий звезд населения I и II и их возникновения, и также подумать о различиях в строении атмосфер звезд населения I и II (магнитные поля, турбулентность)?

Для астроспектроскопии естественно рассмотреть проблему эволюции звезд еще и с совершенно другой стороны.

Во внутренней части звезд, как мы видели, у водорода (у горячих звезд по CN-процессу, а у относительно холодных по pp-процессу) превращается в гелий. Не могло ли происходить, хотя бы иногда, перемешивание вещества звезд таким образом, что на поверхности оказывалось уже «использованное» вещество с большим количеством гелия? В самом деле, известны темные звезды, атмосферы

которых почти не содержат водорода, а содержат только гелий и более тяжелые элементы. На рис. 14 представлено, по Попперу²⁹, сравнение микрофотометрических кривых «гелиевой» звезды HD 124448 и аналогичной «нормальной» звезды типа ВЗ в Волка. Грубый количественный анализ аналогичной «гелиевой» звезды HD 160641, проведенный Аллером¹, показал, что отношение распространенности гелия к распространенности более тяжелых элементов (C, N, O, Ne, Mg, Si) у них приблизительно такое же, как и у нормальных звезд. Это как будто говорит в пользу гипотезы превращения элементов. Во всяком случае, для

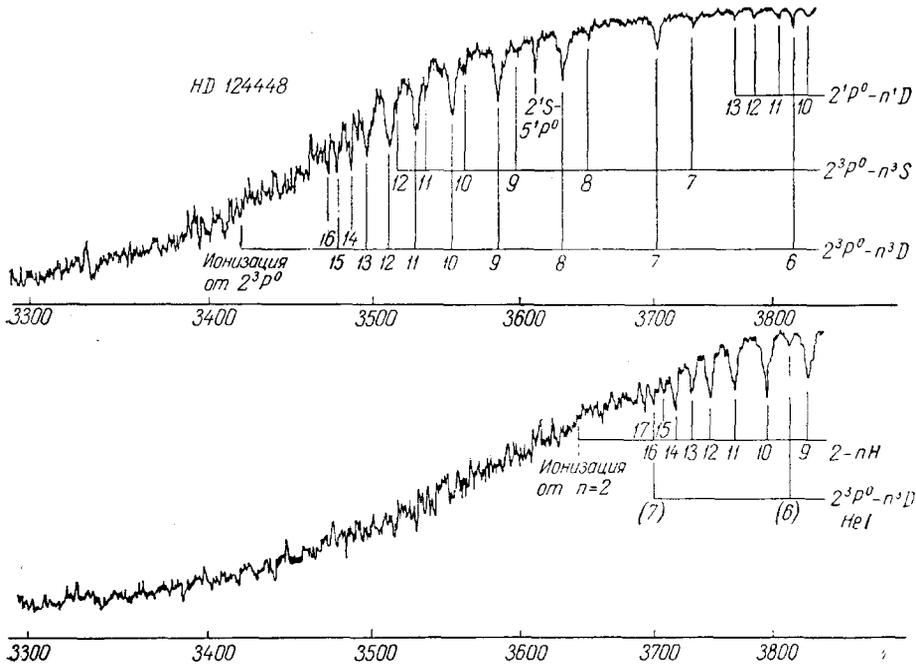


Рис. 14. Микрофотометрические кривые спектров «гелиевой звезды» HD 124448 и нормальной звезды ВЗ в Волка (внизу). В верхнем спектре полностью отсутствует серия Бальмера водорода (2—n, H), зато серии гелия представлены с большой полнотой (по Попперу²⁹).

большой уверенности можно было бы провести еще количественное исследование по вопросу о возбуждении различных квантовых состояний гелия в гелиевых звездах. Относительно космического положения гелиевых звезд можно только сказать, что их лучевые скорости не исключительны. Почему на этих звездах вещество должно быть перемешано, а на других нет, — это пока остается тайной.

Еще интереснее наблюдение, показывающее, что существуют также звезды N и R, у которых—судя по их полосатым спектрам—отношение распространенности изотопов углерода $C^{12} : C^{13}$ равно не ~ 90 , как на Земле и на других звездах, а имеет гораздо меньшие значения и снижается до $3,4 \pm 0,16$. Первоначально можно было бы думать, что здесь мы имеем дело со звездным веществом, которое полностью или частично испытало цикл CN. При тех условиях, которые мы в настоящее время принимаем для недра Солнца, это означало бы, в соответствии с приведенной выше таблицей (аналогом известных законов радиоактивного равновесия), отношение распространенности изотопов $C^{12} : C^{13} \approx 4,7$. С первого взгляда это кажется вполне

разумным, однако другое наблюдение приводит к большим затруднениям, а именно многие звезды типов N и R имеют очень интенсивную резонансную линию лития $\lambda 6708 \text{ \AA}$, а между тем литий при наличии протонов с большой энергией должен был моментально исчезнуть.

Эти соображения были подчеркнуты открытием Меррилла ²⁶ у нескольких S-звезд линий неустойчивого и в свое время полученного лишь искусственным путем Сегре элемента технеция Tc ($Z=43$). Наличие

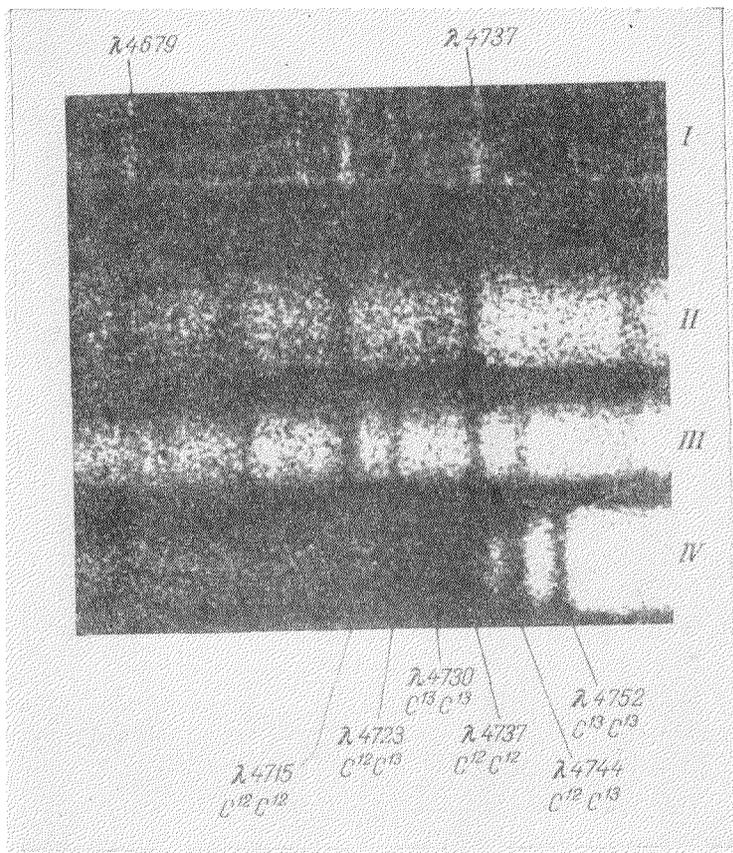


Рис. 15. Изотопный эффект в полосе C_2 : $\lambda 4737$ R-звезд (по Мак-Келлару ²⁵). I—дуговой спектр железа; II—спектр HD 182040; R2; III—спектр HD 5223; R3; IV—спектр HD 19557; R6.

линий технеция в холодных звездах, а также наблюдение вспышек космического излучения при больших извержениях на Солнце заставляет думать, что в атмосферах многих звезд возникают достаточно богатые энергией частицы (протоны и α -частицы), которые при помощи ядерных процессов могут внести заметные изменения в химический состав внешних слоев звезд (см. Бирман ⁶).

С другой стороны, Хойл, Фаулер и Гринстейн ¹⁴, а также Кемерон ⁹, предложили гипотезу, согласно которой вещество, испытывавшее на большой глубине изменение состава в результате ядерной реакции, при некоторых особых обстоятельствах может проникнуть на поверхность звезды. Такое предположение связано с представлением Хойла о том, что это вещество, обогащенное тяжелыми

элементами, затем проникает в межзвездную среду, а отсюда опять конденсируется в звезды населения I и т. д. Однако, на мой взгляд, никак невозможно объяснить столь большое превышение распространенности тяжелых элементов в звездах населения I по сравнению со звездами населения II. Если так, то Солнце, как старая звезда населения I, должно было бы иметь такой же состав, как звезды населения II. Вообще, по отношению к первоначально кажущейся очень привлекательной концепции законченной «астрономической картины Вселенной» в стиле Хойла следовало бы занять очень осторожную позицию. Нам представляется более целесообразным, исходя из определенных основных пунктов, полученных из наблюдений, идти настолько далеко насколько это возможно сделать с достаточной степенью уверенности: что же касается синтеза, конечно, чрезвычайно заманчивого, то его следует оставить будущим исследователям.

В связи с проблемой технеция, естественно, интересна также распространенность в космических образованиях различного типа лития, который быстро разрушается протонами с очень умеренной энергией. По Гринштейну и Ричардсону¹⁶, со времени образования Земли во внешних зонах Солнца уже расплавлена значительная часть лития; это представляется и теоретически вполне приемлемым. С другой стороны, как уже было отмечено, многие звезды R и N имеют очень интенсивную резонансную линию лития $\lambda 6708\text{\AA}$. К сожалению, количественный анализ этих холодных звезд представляет в настоящее время еще непреодолимые трудности.

На этом мы заканчиваем наше сообщение о том, что может дать с некоторой уверенностью исследование в настоящее время. Мы вовсе не делаем попытки представить в какой-либо степени законченную «картину Вселенной». Гораздо важнее, как нам кажется, подчеркнуть, что имеется целый ряд путей, следуя которым, исходя из надежной основы—наблюдения—применяя столь же надежные элементы теоретического анализа, можно прийти к конечной цели, а именно к пониманию строения и эволюции всей Вселенной.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Обзоры

1. O. Struve, Stellar Evolution. Princeton Univ. Press., 1950.
2. Les Processus Nucléaires dans les Astres. V. Colloque Internat. d'Astrophysique Liège, 1953. Mém. Soc. Roy. Liège (IV), 14 (1954).
3. Principes fondamentaux de classification stellaire. Colloques Internat. du CNRS; Paris, 1953.

Новая литература

1. L. H. Aller, V. Colloque Internat. d'Astrophysique Liege. Mém. Soc. Roy. Sci. Liège (IV) 14, 337 (1954).
2. R. A. Alpher u. R. C. Herman, Ann. Rev. Nucl. Sci. 12, 1 (1953).
3. В. А. Амбарцумян, Abh. aus der Sov. Astron. Folge 1, Berlin, 1951.
4. H. C. Arp, Astron. J. 60, 317 (1955).
5. W. H. Baum, Astron. J. a) 57, 222 (1952), b) 59, 422 (1954).
6. L. Biermann, Zeits. Astrophysik 41, 46 (1956).
7. A. Blaauw, a) Bull. Astr. Inst. Netherl. 11, 405, 414 (1952).
J. Delhaye u. A. Blaauw, Bull. Astr. Inst. Netherl. 12, 72 (1953).
A. Blaauw and W. W. Morgan, Astrophys. J. 117, 256 (1953).
8. A. Blaauw and W. W. Morgan, Astrophys. J. 119, 625 (1954).
9. A. G. W. Cameron, Nuclear Reactions in Stars and Nucleogenesis. Chalk River Project № 652 (1956).

10. J. W. Chamberlain and L. H. Aller, *Astrophys. J.* **114**, 52 (1951).
 11. A. Blaauw, *Astrophys. J.* **123**, 408 (1956).
 12. I. Epstein and L. Motz, *Astrophys. J.* **117**, 311 (1953).
 13. W. A. Fowler, *V. Colloque Internat. d'Astrophysique Liège. Mém. Soc. Roy. Sci. Liège (IV)* **14**, 88 (1954).
 14. W. A. Fowler and J. L. Greenstein, *Proc. Nat. Acad. Sci. U. S. A.* **42**, 173 (1956).
 15. W. Fricke, *Astron. Nachr.* **277**, 251 (1949); **278**, 49 (1949).
 16. J. L. Greenstein and R. S. Richardson, *Astrophys. J.* **113**, 536 (1951).
 17. M. H. Harrison, *Astrophys. J.* **103**, 193 (1946).
 18. L. G. Henyey, R. Le Levier and R. D. Levée, *Publ. Astr. Soc. Pacific* **67**, 154, 341 (1955).
 19. F. Hoyle and M. Schwarzschild, *Astrophys. J., Suppl.*, **2**, No. 13, (1955).
 20. M. L. Humason, N. U. Mayall and A. R. Sandage, *Astron. J.* **61**, 97 (1956).
 21. H. L. Johnson and A. R. Sandage, *Astrophys. J.* **121**, 616 (1955).
 22. H. L. Johnson and C. F. Knuckles, *Astrophys. J.* **122**, 209 (1955).
 23. A. H. Joy, *Astrophys. J.* **105**, 96 (1947).
 24. P. C. Keenan and G. Keller, *Astrophys. J.* **117**, 241 (1953).
 25. A. McKellar, *Publ. Domin. Astrophys. Obs. Victoria* **7**, 395 (1948).
 26. P. W. Merrill, *Trans. IAU* **8**, 832 (1952).
 27. J. H. Oort, *Bull. Astr. Inst. Netherl.* **12**, 177 (1954).
 28. J. H. Oort and L. Spitzer, *Astrophys. J.* **121**, 6 (1955).
 29. D. M. Popper, *Publ. Astr. Soc. Pacific* **59**, 320 (1947).
 30. A. R. Sandage: a) *Astron. J.* **58**, 61 (1953); b) *V. Colloque Internat. d'Astrophysique Liège. Mém. Soc. Roy. Sci. Liège (IV)* **14**, 254 (1954).
 31. M. Schmidt, *Bull. Astron. Inst. Netherl.* **13**, 15 (1956).
 32. M. Schönberg and S. Chandrasekhar, *Astrophys. J.* **96**, 161 (1942).
 33. M. Schwarzschild, L. Spitzer and R. Wildt, *Astrophys. J.* **114**, 398 (1951).
 34. O. Struve, *Publ. Astr. Soc. Pacific* **62**, 217 (1950).
 35. M. Walker, *Astron. J.* **59**, 333 (1954).
 36. P. Wellmann, *Zeits. Astrophys.* **36**, 194 (1955).
-