

Б. Ю. ЛЕВИН

КОСМОГОНИЯ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЦА

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 18 V 1953)

Исследование хода эволюции Солнца является чрезвычайно важной, но еще не разрешенной задачей космогонии. В настоящее время ряд астрономов придерживается идеи о том, что Солнце возникло в виде горячей массивной звезды и достигло своего современного состояния, продвигаясь вдоль верхней части главной последовательности, вследствие потери массы ^(1,2).

Существование вокруг Солнца планетной системы, образовавшейся путем объединения в крупные тела роя твердых частиц, позволяет установить верхний предел изменения массы Солнца в прошлом.

1. Допустим, что Солнце в прошлом эволюционировало вдоль верхней части главной последовательности, постепенно теряя массу, и что образование планет произошло после вступления Солнца на главную последовательность. Для звезд верхней части главной последовательности светимость L связана с массой M приблизительно по закону

$$L \sim M^4. \quad (1)$$

После образования планет — крупных тел, обращающихся вокруг Солнца практически под действием одного только притяжения Солнца, уменьшение массы Солнца должно было сопровождаться увеличением размеров планетных орбит по закону

$$r \sim \frac{1}{M}, \quad (2)$$

означающему сохранение момента количества движения. Формула (2) позволяет найти, на каком расстоянии от Солнца находились планеты во время их образования, если это образование протекало при том или ином значении M . Тем самым мы узнаем, на каком расстоянии от Солнца находились в это время частицы, сформировавшие ту или иную планету.

Температура T частиц, находящихся в равновесии с солнечным излучением, определяется равенством получаемой и излучаемой энергии. Если a — радиус сферической частицы и σ — постоянная Стефана — Больцмана, то

$$4\pi a^2 \sigma T^4 = \pi a^2 \frac{L}{4\pi r^2}.$$

Для равновесной температуры частиц, обладающих заданным удельным моментом количества движения, учитывая (1) и (2), получаем

$$T^4 \sim \frac{L}{r^2} \sim M^6$$

или

$$T \sim M^{1.5}.$$

Если ввести современное расстояние планеты от Солнца R и выразить его в астрономических единицах, а массу M — в единицах современной массы Солнца, то

$$T = \frac{277}{\sqrt{R}} M^{3/2}. \quad (3)$$

Эта формула дает температуру, которую должны были иметь при массе Солнца M частицы, которые находились от него на том же расстоянии, на котором находилась тогда планета, имеющая ныне (при $M = 1$) расстояние от Солнца R .

Формула (3) выведена в предположении прозрачного пространства, тогда как множество пылевых частиц, образующих очень сплюснутое облако, может создать колоссальную непрозрачность. Но мы применим эту формулу для оценки верхнего предела возможной массы Солнца в прошлом. Мы будем искать такую массу Солнца, как звезды верхней части главной последовательности, при которой существование твердых частиц на нужном расстоянии от него заведомо невозможно. В таком случае частицы не могут существовать и ближе к Солнцу и перехватывают его лучи и, следовательно, формула (3) вполне применима.

Некоторые авторы (например, В. А. Крат^(3, 4)) предполагают, что масса Солнца во время образования планет была в 5—10 раз больше современной. Формула (3) показывает, что это предположение ведет к противоречию. При $M = 10$ даже для частиц с удельным моментом Земли (не говоря уже о Меркурии) по формуле (3) получается $T \approx 9000^\circ$, что показывает, что в этих условиях существование твердых частиц невозможно.

Для того чтобы каменные частицы не расплавились и не испарялись, необходимо, чтобы их температура была ниже 1500 — 1700° . Требуя выполнения этого условия для частиц, образовавших Меркурий, мы приходим к заключению, что если планеты образовались в то время, когда Солнце эволюционировало вдоль верхней части главной последовательности, то масса Солнца должна была быть меньше $2^{1/2}$, т. е. Солнце было звездой спектрального класса А или более позднего.

Если ставить вопрос не о том, чтобы частицы не испарялись, а о том, чтобы они могли конденсироваться из разреженной газовой среды, то температурный предел будет ниже и соответственно меньшей будет допустимая масса Солнца.

2. В выступлении В. Г. Фесенкова на совещании по планетной космогонии говорится об образовании планет из диска рассеянной материи, «выделившегося из первоначального сгущения непосредственно перед образованием Солнца или одновременно с ним»⁽⁵⁾. Следовательно, допускаются две возможности — в случае одновременного образования Солнца и протопланетного облака, планеты, очевидно, возникают уже тогда, когда Солнце стало звездой, а в случае, если протопланетное облако образовалось до образования Солнца, планеты могли возникнуть на протозвездной стадии. Рассмотрим обе эти возможности.

Предположение о том, что Солнце образовалось в виде очень массивной звезды высокой светимости, только в том случае можно было бы совместить с гипотезой об одновременном образовании Солнца и протопланетного облака если бы планеты образовывались постепенно, начиная с периферии облака. Вначале твердые частицы могли существовать только вдали от Солнца. Если бы облако сохраняло свое существование при дальнейшей эволюции Солнца, то по мере уменьшения массы и светимости Солнца происходила бы конденсация газов в твердые частички, причем зона конденсации приближалась бы к Солнцу. Следом за распространением зоны конденсации происходило бы образование планет. Планеты должны были бы возникать в одинаковых темпера-

турных условиях — в зоне конденсации на внутреннем краю пылевой части протопланетного облака. Это могло бы привести к закономерному непрерывному изменению масс и химического состава планет в зависимости от их расстояния от Солнца, но не могло бы привести к делению планет на две группы, на стыке которых с одной стороны находится гигант Юпитер, а с другой, — маленький Марс.

Деление планет на две группы указывает на приблизительно одновременное образование всех планет. Как показано в п. 1, в окрестностях Солнца, уже являвшегося звездой верхней части главной последовательности, приблизительно одновременное образование могло иметь место лишь при массе Солнца, не превосходившей $2\frac{1}{2}$ современных масс.

Допустим теперь, что удастся объяснить образование планет и их деление на две группы в условиях окрестностей протосолнца, т. е. первоначального сгущения вещества, еще не начавшего излучать, как звезда. В этом случае верхний предел массы Солнца, как звезды, может быть получен из факта существования Меркурия. Он должен был сохраниться, находясь близко к Солнцу, в то время, когда оно стало яркой, массивной звездой главной последовательности.

Обращенная к Солнцу поверхность планеты должна была иметь более высокую температуру, чем небольшая частица, температура которой дается формулой (3). В точке, в которой Солнце находилось в зените, температура поверхности T_1 была в $\sqrt{2}$ раз больше:

$$T_1 = \frac{392}{\sqrt{R}} M^{3/2}. \quad (3a)$$

При температуре плавления каменистого вещества (1500 — 1700°) средняя квадратичная скорость молекул окислов, получающихся при его испарении, больше $\frac{1}{5}$ параболической скорости на поверхности Меркурия. Следовательно, плавление и испарение поверхности Меркурия не могло сопровождаться образованием стабильной атмосферы из паров каменистого вещества, а сопровождалось рассеянием этих паров в пространство. Согласно (3a), температура в 1500 — 1700° должна была иметь место при $M \approx 2$. Однако (3a) не учитывает затраты энергии на испарение. Для интенсивного испарения поверхности необходима была бы большая масса Солнца $M \approx 2\frac{1}{2}$.

При $M = 2\frac{1}{2}$ Меркурий находился бы на расстоянии $0,16$ а. е. от Солнца и так как при этом было бы $L \approx 40$, то «солнечная постоянная» для Меркурия составляла бы 3000 кал/см²·мин. Поэтому для испарения всего Меркурия потребовалось бы всего 10^3 — 10^4 лет.

Таким образом, факт существования Меркурия на расстоянии $0,4$ а. е. от Солнца показывает, что даже в случае образования планет на протозвездной стадии Солнце при своем вступлении на верхнюю часть главной последовательности имело массу, менее чем в $2\frac{1}{2}$ раза превышающую современную.

3. Даже при максимальной скорости вращения, допускаемой условием центробежной устойчивости, у звезд главной последовательности удельный момент количества движения вещества на экваторе много меньше удельного момента количества движения далеких от Солнца планет. Даже на стадии звезды класса В, а тем более на стадии звезды класса А и позднее, отделение вещества от Солнца не могло создать вокруг него протопланетное облако с необходимым моментом, из которого могла бы возникнуть ныне существующая планетная система (6). Поэтому в рамках гипотезы В. Г. Фесенкова об эволюции Солнца вдоль верхней части главной последовательности мыслимы следующие варианты:

а) Если Солнце возникло в виде звезды спектрального класса А или более позднего с массой, не превышающей $2\frac{1}{2}$ современных его масс,

то протопланетное облако могло образоваться либо на неясной предшествующей стадии его развития (захватом или иным путем), либо уже на звездной стадии, т. е. после вступления на главную последовательность и тогда — обязательно путем захвата.

б) Если Солнце возникло в виде очень массивной звезды высокой светимости, то протопланетное облако образовалось лишь впоследствии, после того, как масса Солнца стала менее $2\frac{1}{2}$, причем обязательно путем захвата.

4. На движение малых тел оказывает существенное влияние эффект радиативного торможения, создаваемый как фотонной, так и корпускулярной радиацией. Из формул В. В. Радзиевского (⁷), рассмотревшего этот эффект в общем виде при переменной массе Солнца, следует, что если бы малые тела, находящиеся ныне вблизи орбиты Земли, существовали как самостоятельные тела в течение того времени, за которое масса Солнца уменьшилась от 1,5 до 1, то они были бы пришельцами из области планет-гигантов или даже из еще более далеких областей. Для того чтобы тело поперечником в несколько метров возникло не далее орбиты Юпитера, необходимо, чтобы за время его индивидуальной жизни масса Солнца убывла менее, чем на 1%. Когда началась эта индивидуальная жизнь, к сожалению, неизвестно. Тем не менее, очень быстрая эволюция орбит малых тел при уменьшении массы Солнца заставляет думать, что предел, указанный в п. 3, преувеличен.

5. Изложенное выше показывает, что связь между вопросами звездной и планетной космогонии носит не односторонний, а двусторонний характер: не только планетная космогония должна учитывать возможную эволюцию Солнца за время, протекшее с момента образования планет, но также и звездная космогония должна учитывать ограничения, накладываемые на возможную прошлую эволюцию Солнца фактом длительного существования вокруг него планетной системы и уже установленными основными чертами процесса ее образования.

Геофизический институт
Академии наук СССР

Поступило
7 V 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. Г. Фесенков, А. Ж., 26, 67 (1949). ² А. Г. Масевич, А. Ж., 28, 36 (1951). ³ В. А. Крат, Изв. ГАО, № 149, 1 (1952). ⁴ В. А. Крат, Вопросы космогонии, 1, 34 (1952). ⁵ В. Г. Фесенков, Тр. 1-го совещ. по космогонии, изд. АН СССР, 1951. ⁶ В. С. Сафронов, А. Ж., 28, 244 (1951). ⁷ В. В. Радзиевский, ДАН, 81, 167 (1951).