Доклады Академии Наук СССР
1951. Том LXXXI, № 2

АСТРОНОМИЯ

В. В. РАДЗИЕВСКИЙ

ТОРМОЖЕНИЕ ЛУЧИСТОЙ И КОРПУСКУЛЯРНОЙ РАДИАЦИЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ МАССЕ СОЛНЦА

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 21 IX 1951)

При исследовании гелиоцентрического эффекта лучевого торможения Пойнтинг, Робертсон и другие авторы не учитывали фактор вековой убыли массы Солнца M, вызывающей увеличение среднего радиуса R гелиоцентрической орбиты тела на основании известного соотношения $MR = \text{const}$. Поэтому представляет интерес установление обобщенного закона изменения R в связи с излучением массы Солнца.

С другой стороны, до сих пор рассматривались эффекты торможения, вызываемого лучистой радиацией Солнца. Между тем, за последнее время в литературе все чаще появляются указания на значительную роль его корпускулярного излучения. Так, по данным В. Г. Фесенкова ([1]), за последние 4—6 млрд. лет Солнце потеряло корпускулами, по крайней мере, несколько своих современных масс, что соответствует средней интенсивности излучения, примерно в 10^4 раз превосходящей по массе энергетическое излучение Солнца в нашу эпоху. Учитывая, что трансверсальная составляющая тормозящей силы в случае поглощения телом корпускулярной радиации совершенно не зависит от скорости движения корпускул и вполне определяется той массой, которую тело поглощает в единицу времени, мы вправе ожидать, что столь интенсивное корпускулярное излучение Солнца в прошлом могло существенно влиять на орбитальное движение даже таких крупных поглощающих тел, как планеты.

В случае отклонения корпускул электромагнитным полем тела последнее можно рассматривать как отражающее с эффективным радиусом, не меньшим его геометрического радиуса. Известно ([2]), что тормозящее действие лучистой радиации на гладкое сферическое тело, переизлучающее энергию радиально-изотропно, не зависит от его альбедо. В одной из следующих работ мы покажем, что торможение корпускулами, отклоняемыми полем тела, во всяком случае, не меньше того, которое имело бы место при непосредственном падении корпускул на тело. В настоящей же заметке мы ограничимся исследованием случая полного поглощения телом как лучистой, так и корпускулярной радиации Солнца.

Пусть поглощающее сферическое тело с массой m, радиусом a и плотностью δ (последнюю мы во всех случаях будем считать постоянной) обращается по круговой гелиоцентрической орбите радиуса R. Пусть, далее, за время dt Солнце излучает как в форме корпускул, так и в форме энергии массу dM. Тогда полная масса, поглощаемая телом за то же время и слагающаяся из корпускулярной компоненты

dm_1 и энергетической компоненты dm_2, при нашем исходном предположении будет

$$dm_1 + dm_2 = -\frac{a^2}{4R^2}\,dM. \qquad (1)$$

Допустим теперь, что тело переизлучает только энергетическую радиацию Солнца dm_2 и, в первом приближении, положим, что это переизлучение происходит радиально-изотропно. Тогда изменение орбитального момента количества движения тела $K = m\sqrt{GMR}$ можно будет представить так:

$$dK = \sqrt{GMR}\,dm + \frac{m}{2}\sqrt{\frac{GR}{M}}\,dM + \frac{m}{2}\sqrt{\frac{GM}{R}}\,dR = dK_1 - dK_2, \qquad (2)$$

где G — гравитационная постоянная; $dm = dm_1$ — полное изменение массы тела; dK_1 — момент количества движения, приносимый поглощаемой телом массой (практически он равен нулю); $dK_2 = \sqrt{GMR}\,dm_2$ — момент количества движения, уносимый излучаемой телом массой.

Подставляя эти значения дифференциалов в (2) и выражая m через a и δ, а также используя (1), легко находим:

$$\frac{dR^2}{dM} = \frac{3}{4\pi a\delta} - \frac{2R^2}{M}. \qquad (3)$$

Рассмотрим решение дифференциального уравнения (3) для двух экстремальных случаев.

1. $dm_1 \ll dm_2$, так что массу, а следовательно, и радиус тела можно считать постоянными. Тогда решением (3) будет

$$M^2R^2 = 0{,}25\,\frac{M^3}{\pi a\delta} + C, \qquad (4)$$

где C — постоянная интегрирования.

Следует, однако, отметить, что в этом случае полученный нами результат может быть значительно искажен за счет анизотропности переизлучения тела.

2. $dm_1 \gg dm_2$, так что, пренебрегая излучением тела, момент его можно считать постоянным:

$$K = m\sqrt{GMR} = m_т\sqrt{GM_тR_т} = \text{const},$$

откуда

$$a = a_т\,\frac{(M_т R_т)^{1/6}}{(MR)^{1/6}}, \qquad (5)$$

где индекс т приписывается современным значениям соответствующих величин.

Используя (5), легко находим интеграл уравнения (3) в виде

$$(M_тR_т)^{1/6}\,(MR)^{11/6} = 0{,}23\,\frac{M^3}{\pi a_т\,\delta} + C, \qquad (6)$$

что для больших тел с достаточно медленно изменяющейся величиной произведения MR практически не отличается от (4).

Как видно из (4) и (6), постоянная интегрирования C в зависимости от начальных условий может быть положительной (как это имеет место для всех планет солнечной системы), равной нулю или отрицательной. Анализ (4) и (6) показывает, что при $C > 0$ и при достаточно большой массе Солнца уменьшение последней сопровождается сперва уменьшением, а затем увеличением радиуса орбиты тела. Когда масса Солнца становится настолько малой, что первым членом правой части (4) и (6) можно пренебречь по сравнению с C, изменение R начинает подчиняться закону $MR = \text{const}$.

Для определения минимального радиуса орбиты тела с заданным значением $C > 0$ достаточно приравнять нулю правую часть (3) и полученное уравнение решить совместно с (4) или с (6) и (5). В частности, таким образом легко находим, что минимальный радиус орбиты Меркурия, при любом предположении о характере излучения Солнца, составлял около $15 \cdot 10^6$ км и что это имело место, когда масса Солнца была больше современной примерно в 7 раз.

При $C \leqslant 0$ уменьшением M радиус орбиты тела непрерывно уменьшается до нуля, причем при $C = 0$ тело падает на Солнце теоретически одновременно с полным излучением его массы.

Как видно из (4) и (6), условие $C \leqslant 0$ выполняется в настоящее время (а следовательно, выполнялось и в прошлом) для астероидов, находящихся в районе орбиты Цереры и имеющих поперечники порядка 1 км и меньше. Астероиды такого размера на протяжении всей эволюции солнечной системы могли только сближаться с Солнцем при любом уменьшении его массы.

После того как Н. Н. Парийский [3] указал на практическую невозможность отхода планет, отделившихся от Солнца, под воздействием приливного трения, имели место попытки обойти трудность, связанную с распределением удельного момента количества движения в солнечной системе, за счет излучения массы Солнца, уменьшающего его удельный момент. Между тем, нетрудно видеть, что в результате поглощения излучаемой Солнцем массы удельный момент, по крайней мере у ближайших планет, уменьшается даже быстрее, чем у самого Солнца.

В самом деле, пренебрегая эффектом экваториального ускорения, легко находим уменьшение осевого удельного момента количества движения сферического Солнца за время dt:

$$dk_{\odot} = \frac{dK_{\odot}}{M} - \frac{K_{\odot}}{M^2} dM < \frac{dK_{\odot}}{M} = \frac{4\pi R_{\odot}^2}{3P_{\odot} M} dM, \tag{7}$$

где $R_{\odot}$ — радиус Солнца и $P_{\odot}$ — период его осевого вращения. В то же время уменьшение удельного момента тела $k = \sqrt{GMR}$ будет равно:

$$dk = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{GR}{M}}\, dM + \frac{1}{2}\sqrt{\frac{GM}{R}}\, dR, \tag{8}$$

что после деления на (7) и небольших преобразований с использованием (3) и третьего закона Кеплера дает

$$\frac{dk}{dk_{\odot}} > \frac{3}{8} \frac{P_{\odot} R_{\odot} \delta_{\odot}}{Pa\delta}, \tag{9}$$

где P — период обращения тела вокруг Солнца. Подставляя в (9) современные значения всех величин для Солнца и Меркурия, находим, что в настоящее время удельный момент Меркурия уменьшается, по крайней мере, в 12 раз быстрее, чем у Солнца. Очевидно, в эпоху гипотетического отделения Меркурия от Солнца имели место следующие соотношения: $P_{\odot} \approx P$, $R_{\odot} \delta_{\odot} \gg a\delta$, что соответствует еще большему значению нижнего предела отношения (9). Таким образом, у нас есть основание утверждать, что на протяжении всей эволюции солнечной системы удельный момент Меркурия уменьшался во много раз быстрее, чем у Солнца. Между тем, в эпоху отделения они были одного порядка, а сейчас удельный момент Меркурия в 10000 раз превосходит удельный момент Солнца.

Из сказанного ясно, что учет излучения массы Солнца не снимает тех трудностей, которые стоят перед любой космогонической гипотезой, связывающей образование планет с отделением их от Солнца.

Ярославский государственный педагогический институт им. К. Д. Ушинского

Поступило 21 IX 1951

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] В. Г. Фесенков, ДАН, 64, № 6 (1949). [2] H. Robertson, Monthly Not., 97, № 6, 423 (1937). [3] Н. Н. Парийский, Астр. циркуляр, № 34, 1 (1944).