

УДК 550.42+550.89+551.21+552.3+552.112+553.212+546.212+549.691

ПРОТОСПУТНИКОВЫЙ ДИСК ВОКРУГ ЮПИТЕРА: Р-Т ПАРАМЕТРЫ**А.Б.Макалкин, В.А.Дорофеева*.**

Объединенный Институт физики Земли РАН, г. Москва

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И.Вернадского РАН, г. Москва

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 98-05-64943.

Вестник ОГТГН РАН № 2(12)2000, т. 2URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dggms/2-2000/empg_99/planet_5.htm#begin

© 2000 ОИФЗ РАН, ОГТГН РАН

Исходные данные. Исследования образования Юпитера в околосолнечном диске (солнечной туманности) выявили следующие основные стадии (Сафронов, Рускол, 1982; Поллак и др., 1996; Рускол, Сафронов, 1998). Первая стадия продолжительностью 10^7 лет - рост зародыша планеты до критической массы около $30M_{\oplus}$. Зародыш состоит из твердого ядра ($\approx 10 M_{\oplus}$) и газовой оболочки. После достижения растущей планетой критической массы, наступает стадия аккреции. Она начинается с быстрой аккреции газа в течение 10^4 лет, затем продолжается в течение периода $t_a=10^6-10^7$ лет до окончания образования планеты. Масштаб времени 10^7 лет для образования Юпитера согласуется с временами жизни газопылевых дисков вокруг молодых звезд солнечного типа. Пылевые частицы и планетезимали падали на растущий Юпитер вместе с газом. Минимальный планетоцентрический удельный угловой момент выпадавшего вещества составляет $\Gamma \approx \Omega_J r_H^2/4$ (Рускол, 1982), где Ω_J - угловая скорость орбитального движения Юпитера, r_H - радиус сферы гравитационного влияния Юпитера (сферы Хилла), $r_H = R_J(M_J/3M_{\odot})^{1/3}$, R_J расстояние Юпитера от Солнца, M_J и $M_{\odot}$ - массы Юпитера и Солнца. Часть падающего вещества должна образовывать диск вокруг Юпитера. Его радиус r_d , оцениваемый путем приравнивания центробежной и гравитационной сил, составляет $r_d \approx r_H/48$, то есть около $20r_J$, где r_J - современный радиус Юпитера. Образование Галилеевых спутников в юпитерианском диске с определенностью следует из их регулярно расположенных круговых орбит, лежащих в экваториальной плоскости Юпитера, и из совпадения направления их орбитального движения с направлением вращения Юпитера. Из наблюдений получено, что протопланетные диски вокруг молодых звезд солнечного типа с возрастными $\leq 10^6-10^7$ лет являются аккреционными дисками, то есть, радиальный поток массы через диск M падает на звезду (Беквиз и Саргент, 1996). Сходство регулярной спутниковой системой Юпитера с такими же системами у других планет-гигантов и солнечной планетной системой является сильным аргументом в пользу аккреционной модели протоспутникового диска вокруг Юпитера. В этой модели вещество диска получается непосредственно из вещества солнечной туманности, поступающего в сферу Хилла вокруг Юпитера. Турбулентная вязкость приводит к перераспределению вещества диска таким образом, что большая часть его движется к Юпитеру, а меньшая часть, в соответствии с законом сохранения углового момента, движется в сторону от Юпитера и увеличивает радиус диска. Наши оценки показывают, что он вполне может достичь 30-40 r_J . Регулярные спутники могли образоваться только на поздней стадии аккреции (Harris, 1978).

Модель. Ранее мы разработали и рассчитали модель протопланетного аккреционного диска вокруг молодого Солнца (Макалкин, Дорофеева, 1995, 1996). Теперь мы обобщаем эту модель, чтобы рассчитать основные физические параметры протоспутникового диска вокруг Юпитера (юпитерианской субнебулы). Мы принимаем α -параметризацию величины ν ,

турбулентной вязкости диска: $\nu = \alpha c_s h$. Здесь c_s - скорость звука в экваториальной плоскости, h - высота однородной атмосферы по давлению, равная c_s/Ω , где $\Omega = (GM_J/r^3)^{1/2}$ - угловая скорость на планетоцентрическом расстоянии r . В уравнения переноса углового момента и вязкой диссипации энергии внесены изменения для того, чтобы учесть гораздо более высокое отношение радиуса Юпитера к радиусам спутниковых орбит по сравнению с отношением радиуса Солнца к радиусам планетных орбит. В рассмотрение включены два источника нагрева диска: вязкая диссипация внутри диска и облучение диска молодым Юпитером и Солнцем. Относительный вклад облучения диска в его нагрев может быть для юпитерианского диска намного больше, чем для солнечного. При расчете облучения мы учитываем высоту и кривизну оптической поверхности диска. При расчете вертикальной структуры диска мы используем уравнения гидростатического равновесия и переноса тепла. Поскольку перенос тепла в диске с помощью излучения в 7-10 раз больше, чем с помощью турбулентности (Макалкин, Дорофеева, 1995), распределение температуры определяется непрозрачностью вещества диска. Мы аппроксимируем зависимость непрозрачности от температуры кусочно-непрерывной степенной функцией $\kappa = \kappa_0 T^{\beta}$ с различными κ_0 и β в трех температурных диапазонах: ниже температуры конденсации воды T_w , где в формировании непрозрачности доминируют частицы льда; между T_w и наибольшей из температур

конденсации форстерита, энстатита, и металлического железа T_{si} , где доминируют частицы Mg-силикатов и железа; наконец, выше T_{si} , где доминирует молекулярный водород.

Основными варьируемыми входными параметрами нашей модели являются поток массы через диск на Юпитер $\dot{M}$ (скорость аккреции) и параметр вязкости α . Для минимального значения потока массы $\dot{M}$ можно дать оценку $\dot{M} \sim M_d/t_d$, где M_d - минимальная масса диска, необходимая для образования Галилеевых спутников. Она равна полной массе спутников M_s , деленной на массовую долю сконденсированного вещества f_c . В юпитерианской зоне солнечной туманности H_2O находилась в твердом состоянии, а C и N в основном входили в состав газа. В этом случае для солнечной пропорции элементов $f_c \approx 0.01$. Таким образом мы получаем оценку $\dot{M}$ для диска на основной аккреционной стадии: $\dot{M} = 10^{14} - 10^{15}$ г/с. Еще два входных параметра - светимость и радиус молодого Юпитера L_{yJ} и r_{yJ} . Для поздней стадии аккреции, подходящей для образования спутников, оценки Сафронова и Рускол (1982) дают $L_{yJ} \approx 1000 L_J$ and $r_{yJ} \approx 1.4 r_J$, где L_J - современная светимость Юпитера. Эти величины соответствуют моменту времени $t = 10^7$ лет, когда 80% от полной массы было аккумуляровано планетой.

Результаты. Были рассчитаны две модели диска. В модели 1 распределение температуры в диске мы приводим в соответствие с содержанием воды в Галилеевых спутниках. Чтобы добиться этого, мы варьируем вязкость диска так, чтобы температура в экваториальной плоскости диска оказалась равной температуре испарения водяного льда вблизи (но не дальше) орбиты Ганимеда. Поскольку температура в экваториальной плоскости выше, чем вне ее, некоторая доля льда сохраняется в диске до меньших радиальных расстояний вплоть до орбиты Европы. Чтобы получить такую модель, вязкость должна быть умеренно высокой: $\alpha \approx 10^{-3}$. Радиальная скорость течения газа и пыли внутрь диска на расстоянии Европы равна $v_r \approx v/r \approx 7$ см s^{-1} . Температуры и давления для модели 1 показаны на Рис.1 кривыми, обозначенными 1. В этой модели вещество нагревается и фракционно испаряется по мере его дрейфа в сторону Юпитера. Давление в диске оказывается довольно низким, как и полная масса диска. В любой момент полная масса твердого вещества M_s составляет $\sim 10^{-3}$ от полной массы Галилеевых спутников M_G . Но величина потока массы $\dot{M}$ позволяет аккумуляровать необходимую массу твердого вещества в спутниках за время жизни диска, если большинство твердых частиц и тел, хотя и движутся в сторону Юпитера вместе с газом, но не покидают диска благодаря высокой эффективности их захвата растущими зародышами спутников.

Альтернативная модель 2 - массивный диск с $M_s \approx M_G$. Масса диска составляет $M_d \approx M_s/f_c \approx 6 \times 10^{28}$ г. Столь большая масса может быть достигнута на поздней стадии аккреции Юпитера, если принять, что вязкость диска в 10^4 раз ниже ($\alpha \approx 10^{-7}$), чем в модели 1. Благодаря малой вязкости поток массы из диска на Юпитер оказывается меньше, чем приток массы в диск, поэтому масса диска нарастает. Как показывают расчеты P - T условий для этой модели (Рис.1, кривые 2), температура во внутренней области диска $r < 17 r_J$ равна температуре конденсации металлического железа, и она везде выше температуры конденсации воды. Для охлаждения диска и образования спутников в диске должно произойти затухание двух взаимосвязанных процессов: аккреции на Юпитер и вязкой диссипации. Еще одно условие для образования спутников - более высокие скорости процессов охлаждения диска и образования планетезималей по сравнению со скоростью диссипации газа из диска. Ввиду более высоких давлений в этой модели диска, конденсация происходит через жидкое состояние. Еще предстоит исследовать, какая из этих двух моделей является более перспективной для объяснения образования спутников.

Литература

- Beckwith, S.V.W., and Sargent, A.I. 1996. Circumstellar disks and the search for neighbouring planetary systems. *Nature* 383, 139-144.
- Harris, A.W. Satellite formation. II. 1978. *Icarus* 34, 128-145.
- Makalkin, A.B., and Dorofeeva, V.A. 1995. Structure of the protoplanetary accretion disk around the Sun in the T Tauri phase: I. Initial data, equations, and methods of modeling. *Solar System Res.* 29, 85- 104.
- Makalkin, A.B., and Dorofeeva, V.A. 1996. The structure of the protoplanetary accretion disk around the sun at the T Tauri stage. II. Results of model calculations *Solar System Res.* 30, 440-455.
- Pollack, J.B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., Lissauer, J.J., Podolak, M., and Greenzweig, Y. 1996. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas. *Icarus* 124, 62-85.
- Ruskol, E.L. 1982. Origin of planetary satellites. *Izvestiya Earth Phys.* 18, 425-433.
- Ruskol, E.L., and Safronov, V.S. 1998. Juper growth as an essential factor for the formation of the planetary system. *Solar System Res.* 32, 255-263.
- Safronov, V.S., and Ruskol, E.L. 1982. On the origin and initial temperature of Juper and Saturn. *Icarus* 49, 284-286.

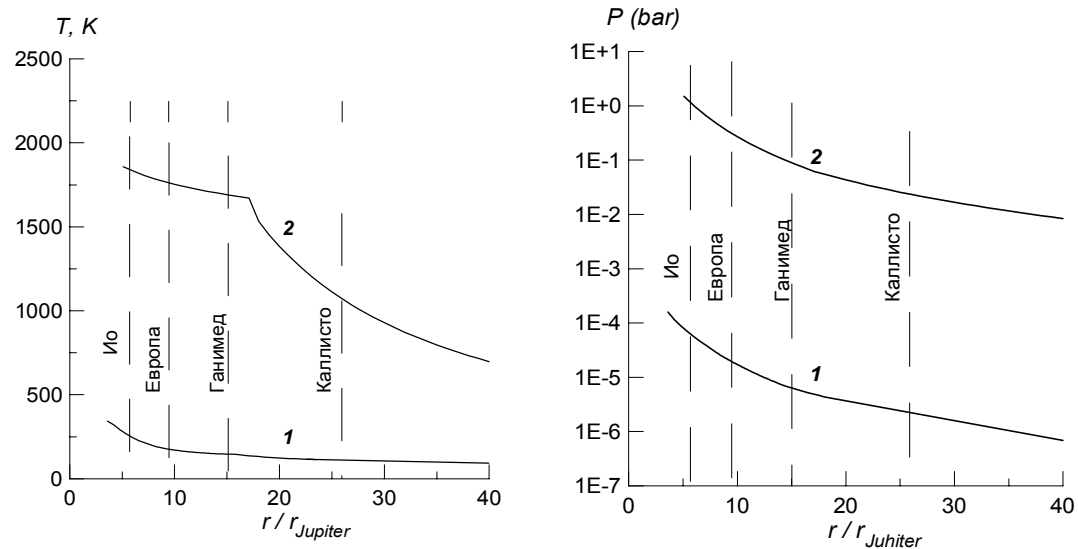


Рис. 1. Температуры и давления в экваториальной плоскости юпитерианского протоспутникового диска для моделей 1 и 2 (см. текст).
Отмечены радиусы орбит Галилеевых спутников.