

АСТРОНОМИЯ

Л. Э. ГУРЕВИЧ и А. И. ЛЕБЕДИНСКИЙ

ГРАВИТАЦИОННАЯ КОНДЕНСАЦИЯ ПЫЛЕВОГО ОБЛАКА

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 25 VII 1950)

Одной из основных проблем космогонии является механизм образования планет из облака диффузной материи, окружавшего некогда Солнце и обладавшего массой и суммарным моментом количества движения современной планетной системы. Если это облако состояло из твердых частиц, то энергия хаотического движения этих частиц должна была при их столкновениях превращаться в тепло и уходить с радиацией. По мере уменьшения энергии при сохранении момента количества движения облако должно было уплотняться и превратилось бы со временем в плоскую систему типа колец Сатурна, если бы при сильном уплотнении облака в нем не наступила гравитационная конденсация.

Условия ее наступления и размеры образующихся сгущений определяются гравитационными силами, влияние которых рассмотрено Джинсом, и приливными силами, действие которых изучалось Рошем, Максвеллом, Пуанкаре и др. Эджворт⁽¹⁾ пытался оценить порядок величины размеров сгущений, пользуясь критериями приливных сил. Ниже выводится критерий гравитационной конденсации, включающий в себя оба указанных условия.

Сильно уплотненное облако создает на высоте z над средней плоскостью такой же потенциал $-\frac{2\pi\gamma\sigma}{H}z^2$, как и плоский слой. Здесь γ — постоянная тяготения, σ — масса на единицу площади средней плоскости облака, H — его полутолщина. Кроме того, Солнце создает на высоте z избыток потенциала по сравнению с $z = 0$, равный $-\frac{2\pi}{3}\gamma\rho_0z^2$, где ρ_0 есть плотность, которую имела бы масса Солнца, распределенная в сфере радиуса R , равного расстоянию до рассматриваемой точки (предполагается $R \gg |z|$). Поэтому полный избыточный потенциал на высоте z

$$\Phi = -\left(\frac{2\pi\gamma\sigma}{H} + \frac{2\pi}{3}\gamma\rho_0\right)z^2 = -bz^2. \quad (1)$$

Частицы распределены в поле этого потенциала по барометрической формуле $\exp \frac{m_1\Phi}{\Theta} = \exp\left(-\frac{m_1b}{\Theta}z^2\right)$, где m_1 — масса частицы, а $\Theta = \frac{1}{3}m_1\bar{v}^2$ есть эффективная температура частиц, зависящая, вообще говоря, от R . Эквивалентная высота атмосферы $H = \sqrt{\frac{\Theta}{m_1b}}$, откуда

$$\Theta = 2\pi\gamma m_1 H \left(\sigma + \frac{1}{3}\rho_0 H\right), \quad (2)$$

При достаточном уплощении облака в нем наступит гравитационная конденсация. Возникающие сгущения, как мы увидим, являются очень сплюснутыми образованиями, которые мы представим как эллипсоиды вращения с полуосями r и h , удовлетворяющими неравенству $h \ll r \ll R$. Условие конденсации (несколько мажорированное) заключается в том, чтобы гравитационная энергия на единицу массы $\frac{3\pi^2}{10} \gamma \rho h$ превышала вдвое энергию относительного движения и приливных сил. Энергия беспорядочного относительного движения равна $\frac{3}{2} \frac{\theta}{m_1}$; энергия упорядоченного (кругового) относительного движения, зависящего от изменения Δv круговой скорости с расстоянием:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (\Delta v)^2 = \frac{1}{2} \left[\left(y \frac{dV_0}{dR} \right)^2 + \left(x \frac{V_0}{R} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где первое слагаемое определяется изменением величины круговой скорости $V_0 = \sqrt{\frac{\gamma M_\odot}{R}}$ при перемещении в радиальном направлении от Солнца на расстояние y , а второе слагаемое — изменением ее направления при смещении перпендикулярно радиусу на расстояние x . Наконец, потенциал приливных сил

$$\Phi' = \frac{2\pi}{3} \gamma \rho_0 (2y^2 - x^2 - z^2). \quad (4)$$

Интегрируя (3) и (4) по объему сгущения, мы получим энергию на единицу массы, равную $\left(\frac{9}{40} r^2 - \frac{1}{10} h^2 \right) \frac{4\pi}{3} \gamma \rho_0$. Следовательно, условие конденсации

$$\frac{3\pi^2}{10} \gamma \rho h > 6\pi \gamma H \left(\sigma + \frac{1}{3} \rho_0 H \right) + \frac{3\pi}{5} \gamma \rho_0 r^2 - \frac{4\pi}{15} \gamma \rho_0 h^2.$$

Полагая $r = \xi H$, $h = \eta H$ и имея в виду, что $2\rho H = \sigma$, напомним это так:

$$\frac{A\xi\eta\sigma}{H} > B\rho_0\xi^2 + \frac{C\sigma}{H} + D\rho_0 - E\rho_0\eta^2,$$

где $A = 3\pi^2/10$, $B = 3\pi/5$, $C = 6\pi$, $D = 2\pi$, $E = 4\pi/15$.

Отсюда

$$H < \frac{\sigma\eta}{\rho_0} \frac{A\xi - C/\eta}{B\xi^2 + D - E\eta^2}.$$

Правая сторона максимальна при $\eta = 1$ и

$$\xi = \frac{C}{A} \sqrt{\left(\frac{C}{A} \right)^2 + \frac{D-E}{B}} = 12,9. \quad (5)$$

При этом

$$r = \frac{\pi}{8} \frac{\sigma}{\rho_0}, \quad H = h = \frac{\pi}{12,9 \cdot 8} \frac{\sigma}{\rho_0}. \quad (6)$$

Так как расстояние между планетами порядка их расстояния от Солнца, то, считая, что $\sigma(R)$ соответствует современному распределению массы, можно положить для оценки $\sigma(R) = \frac{M_n}{2\pi R^2}$, где M_n — масса n -й (от Солнца) планеты. Тогда

$$r \approx \frac{M_n}{4M_\odot} R, \quad H = h \approx 0,02 \frac{M_n}{M_\odot} R. \quad (7)$$

Согласно (2) дисперсия скоростей при этом

$$v \approx 0,2 \frac{M_n}{M_\odot} V_0(R),$$

т. е. в области Юпитера порядка метров в секунду. Масса сгущения в зоне n -й планеты

$$m_n = \frac{4\pi}{3} r^2 h \rho = 0,015 M_n \left(\frac{M_n}{M_\odot} \right)^2.$$

В зоне Юпитера это дает $3 \cdot 10^{22}$ г, а в зоне Земли 10^{15} г.

Эти сгущения, встречаясь друг с другом, отклонялись от точных круговых орбит, и потому их скорости были не совсем одинаковы. Вследствие этого сгущения, двигавшиеся почти по одной и той же орбите, объединялись в более крупные тела, которые мы назовем вторичными сгущениями. Их массы в зоне Юпитера 10^{27} г, а в зоне Земли 10^{22} г. При таком объединении отношение центробежной силы на экваторе сгущений к силе тяжести убывало, и потому центробежная сила все меньше и меньше препятствовала их сжатию. Можно предполагать, что астероиды представляют собой такие вторичные сгущения, не объединившиеся в планету.

При образовании планет из аксиально-симметричного диффузного облака происходило постепенное укрупнение первоначальных сгущений, связанное с их объединением в более крупные тела и потому сопровождавшееся уменьшением числа отдельных тел при сохранении их общей массы. При этом осевая симметрия облака исчезала, и взаимные возмущения все менее многочисленных тел росли, искажая их первоначально почти круговые орбиты. При этом возрастали эксцентриситеты орбит ε и их наклонности i , причем стремление к равномерному распределению энергии создавало тенденцию к равенству $i = \varepsilon$. При встречах тел, не сопровождавшихся их слиянием, эксцентриситеты орбит, вначале малые, постепенно возрастали. При слиянии же тел, двигавшихся по эллиптическим орбитам, результирующее тело в среднем должно было двигаться по орбите с меньшим эксцентриситетом. Чем больше масса встречающихся тел и чем меньше их размеры, тем больше максимальный угол рассеяния и максимальное изменение эксцентриситета при сближении, не ведущем к слиянию тел. При постепенном укрупнении тел происходили два процесса: увеличение эксцентриситетов их орбит вследствие роста взаимных возмущений и уменьшение эксцентриситетов в актах слияния. В начальной стадии укрупнения преобладал первый процесс, который привел к объединению сгущений в планеты; в конечной стадии преобладал второй процесс, который привел к почти круговым орбитам планет.

Процесс образования планет состоит из образования вторичных сгущений из первичных и объединения вторичных сгущений в планеты. Первый из этих процессов происходит примерно за тысячу оборотов, т. е. за столь краткий срок, что можно практически считать, что гравитационная конденсация ведет непосредственно к образованию вторичных сгущений. Второй процесс протекает медленно.

Объединение вторичных сгущений в планеты происходит в результате их взаимных возмущений при близких встречах, заставляющих их двигаться по пересекающимся орбитам со значительными эксцентриситетами. Все тела, движущиеся по пересекающимся орбитам, должны в конечном итоге объединиться.

Процесс, происходивший в действительности, существенно отличался от изложенной нами схемы тем, что облако не было однородным, но в любой момент состояло из тел разной массы — от пылинок

до вторичных сгущений зоны Юпитера, т. е. тел с массами, близкими к земной. Процесс объединения сопровождался дроблением при уда-
рах, а вовсе не был рядом последовательных слияний тел равной
массы. В действительности происходил как бы „естественный отбор“,
в результате которого наиболее крупные тела росли, присоединяя к
себе мелкие, и продолжалось это до тех пор, пока не образовалось
небольшое число больших планет, движущихся по почти круговым
орбитам и поэтому не сталкивающихся между собою.

Реальный процесс образования планет можно рассматривать как
постепенное выпадение мелких тел на поверхность тела значительной
массы, представляющего собою ядро будущей планеты, т. е. реальный
процесс описывается гипотезой О. Ю. Шмидта.

Ленинградский государственный университет
им. А. А. Жданова

Поступило
24 VII 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Edgeworth, Monthly Notices RAS, No. 6 (1949). ² О. Ю. Шмидт, ДАН,
45, № 6 (1944).