

Н. Н. Горькавый, А. М. Фридман. Коллективные процессы и структуры в кольцах планет. Из четырех планет Солнечной системы, у которых известны сейчас кольца (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун), структура колец Сатурна обладает наибольшим разнообразием. Прежде всего обращает на себя внимание так называемая иерархическая структура колец Сатурна (подобно русской матрешке): наиболее плотное кольцо B шириной 25,5 тыс. км составлено из набора тысячекилометровых колец, состоящих, в свою очередь, из стокилометровых, и т. д. Наиболее узкие колечки имеют ширину ~ 100 м (толщина кольца Сатурна $\simeq 30$ м). Распределение частиц по массам близко к так называемому солпитеровскому закону, $n(m)/n(m_0) \sim (m_0/m)^{1,5}$, где $n(m)$ — число частиц с массой от m до ∞ . Однако при размерах «частиц» $a \gtrsim 5$ м происходит резкий «завал» спектра: $n(a) \sim a^{-(5 \div 6)}$ [1].

Кольца Сатурна состоят из ледовых частиц и потому столкновения мелких частиц существенно неупругие. С увеличением размеров частиц их плотность резко падает и уже для частиц с $a \gtrsim 1$ м столкновения становятся только гравитационными (неконтактными). Основными уравнениями, описывающими динамику такой системы, являются кинетическое уравнение в неинерциальной системе отсчета

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + (\mathbf{e} + [\mathbf{v}, \mathbf{h}]) \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = C_G + C_* \quad (1)$$

и уравнение Пуассона

$$\Delta\Phi = 4\pi G \int f d^3v. \quad (2)$$

Здесь введены обозначения

$$\mathbf{e} \equiv -\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial t} - \nabla \left(\Phi - \frac{\mathbf{W}^2}{2} \right), \quad \mathbf{h} \equiv \text{rot } \mathbf{W}, \quad (3)$$

где $\mathbf{W}(\mathbf{r}, t)$ —относительная скорость неинерциальной и инерциальной систем координат; \mathbf{v} —скорость частицы в неинерциальной системе координат; C_G и C_* —столкновительные члены, описывающие упругие (гравитационные) и неупругие (контактные) соударения соответственно; Φ и G —гравитационные потенциал и константа соответственно.

Если из правой части (1) исключить C_* , то (1) совпадает с кинетическим уравнением для заряженной частицы в электромагнитном поле. При этом в (1) стоит стоф-член C_G Чандрасекара [2], который с точностью до переобозначений совпадает со стоф-членом Ландау [3]. Интересуясь динамическими процессами в протокольцах Сатурна, приводящими к наблюдаемому структурированию колец, заметим, что основной вклад в массу колец вносят крупные частицы, для которых $C_G \gg C_*$. Это значит, что при построении теории переноса в кольцах Сатурна можно воспользоваться теорией переноса плазмы в магнитном поле [4], учитывая, во-первых, что коэффициенты переноса в кольцах планет не являются константами; во-вторых, если через τ_G обозначить время свободного пробега частиц, а через Ω —угловую скорость вращения колец, то для частиц разных размеров осуществляются различные условия $\Omega\tau_G \ll 1$, $\Omega\tau_G \gg 1$, $\Omega\tau_G \sim 1$. Первый случай дает возможность использовать метод Чепмена—Энскога [5], второе неравенство соответствует случаю замагниченной плазмы [4], последний случай—наиболее трудоемкий. Существенным усложнением являются также как дифференциальность вращения $\Omega(r)$, так и наличие внешнего потока пыли на планету, скользящую вдоль плоскости колец. Последний является следствием эффекта Пойнтинга—Робертсона: потеря частицами пыли своего момента вращения при столкновениях с частицами солнечного ветра. В результате первое же моментное уравнение—уравнение неразрывности—является неоднородным. В уравнении баланса тепла новым является также слагаемое, обусловленное неупругими столкновениями.

Полная система уравнений переноса написана в [6–8, 10]. Нахождение собственных значений этой системы уравнений привело к обнаружению ряда неустойчивостей колец [6–10], генерирующих наблюдаемые структуры.

Физика *джинсовской (гравитационной) неустойчивости* состоит в том, что после модуляции поверхностной плотности первоначально однородного кольца любая пробная частица будет притягиваться к ближайшему горбу плотности—модуляция будет еще более усиливаться.

Физика *диссипативной неустойчивости волн отрицательной энергии* состоит в том, что суммарная энергия волны плотности в кольце может оказаться отрицательной, если гравитационная энергия (будучи отрицательной) по модулю превосходит сумму кинетической энергии частиц (во вращающейся системе координат) и энергии их хаотического движения. В этом случае диссипацию положительной энергии волны можно рассматривать как увеличение ее отрицательной энергии—энергия волны по абсолютной величине растет.

Физика *неустойчивости отрицательной диффузии* обусловлена неупругим характером столкновений. В результате в области плотных колец, где столкновения более часты по сравнению с соседним разрежен-

ным кольцом, потери кинетической энергии из-за неупругих столкновений также оказываются большими, что ведет к замедлению частиц — частицы в плотном кольце все более накапливаются. Точно так же увеличивается толпа людей возле узкого прохода — житейский пример неустойчивости отрицательной диффузии.

Рассмотренные выше три неустойчивости планетных дисков приводят к образованию узких колечек. Широкие колечки формируются при развитии открытой авторами аккреционной неустойчивости, связанной с потоком внешней космической пыли, скользящей к планете вдоль плоскости колец. Природа этой неустойчивости родственна механизму образования барханов в пустыне потоком песка. Итак, широкие колечки — это барханы космической пыли в кольцах Сатурна.

Кольца Урана принципиально отличаются от колец Сатурна. Они узкие и плотные, расстояния между ними на несколько порядков превосходят их ширины. Выяснению резонансной природы колец Урана, позволившей предсказать новые спутники, посвящена наша предыдущая заметка в «УФН» [11]. Высокий коэффициент корреляции [12] (0,78) между кольцами Урана и открытыми «Вояджером-2» спутниками является лишним доказательством генетической связи колец Урана с его новыми спутниками.

Подробно физика планетных колец будет опубликована в обзоре авторов, подготовленном для «УФН».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Magouf E. A., Tyler G. L., Zebker H. A.//Icarus. 1983. V. 54. P. 189.
2. Чандрасекар С. Принципы звездной динамики.— М.: ИЛ, 1948.
3. Ландау Л. Д.//ЖЭТФ. 1937. Т. 7. С. 203.
4. Брагинский С. И.//Вопросы теории плазмы. Вып. 1.— М.: Госатомиздат, 1963.
5. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов.— М.: ИЛ, 1960.
6. Горькавый Н. Н., Фридман А. М.//Нелинейные волны: Структуры и бифуркации/Под ред. А. В. Гапонова-Грехова, М. И. Рабиновича.— М.: Наука, 1987.
7. Fridman A. M., Gor'kavui N. N.//Joint Conference of the 7th Kiev International Conference on Plasma Theory and the 7th International Congress on Waves and Instabilities in Plasma: Proceedings.— Kiev: Naukova Dumka, 1987.— V. 2. P. 80.
8. Fridman A. M., Gor'kavui N. N.//Proceedings of Xth European Regional Astronomy Meeting of the IAU.— Prague, 24—29 August, 1987.
9. Фридман А. М., Горькавый Н. Н.//Вестн. АН СССР. 1987. № 6. С. 18.
10. Fridman A. M., Gor'kavui N. N.//Sov. Sci. Rev. Sec. A: Physics. 1989. V. 12. P. 289.— (Harwood Academic Publishers, United Kingdom).
- ¶11] Горькавый Н. Н., Фридман А. М.//УФН. 1986. Т. 150. С. 628.
12. Горькавый Н. Н., Тайдакова Т. А., Фридман А. М.//Письма Астрон. ж. 1988. Т. 14. С. 1037.