

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ  
И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР**

**(28—29 мая 1986 г.)**

28 и 29 мая 1986 г. в конференц-зале Института физических проблем им. С. И. Вавилова АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

*28 мая*

1. Э. Л. Андроникашвили, Г. М. Мревлишвили. Низкотемпературная теплоемкость ДНК.

2. Н. Н. Горькавый, А. М. Фридман. Резонансная природа колец Урана и предсказание его новых спутников.

*29 мая*

3. С. П. Михеев, А. Ю. Смирнов. Осцилляции нейтрино в среде с переменной плотностью.

4. В. Л. Гинзбург, В. П. Фролов. Квантовые эффекты в ускоренных системах, аномальный эффект Доплера и принцип эквивалентности\*).

Краткое содержание трех докладов приводится ниже.

**Н. Н. Горькавый. А. М. Фридман. Резонансная природа колец Урана и предсказание его новых спутников.** Десять узких, эксцентриситетных и далеко отстоящих друг от друга колец Урана разительно отличаются от широкого кругового кольца Сатурна, разделенного несколькими щелями. Сразу после открытия в 1977 г. колец Урана начались интенсивные поиски причин, определяющих столь необычные свойства колец.

Дермотт и Голд <sup>1</sup> выдвинули утверждение, что кольца Урана соответствуют положению трехчастотных резонансов от Ариэля — Титании, от Ариэля — Оберона — известных крупных спутников Урана. Эта гипотеза, объясняющая 5 из 9 колец, подверглась критике, так как в зоне колец имеются более действенные резонансы, например от Ариэля — Миранды. Годом позже Стейгман <sup>2</sup> модифицировал гипотезу Дермотта и Голда, рассмотрев соответствие положений 5 колец Урана с трехчастотными резонансами от Ариэля — Миранды и Миранды — Урана VI (гипотетического спутника на орбите с радиусом 105 221 км). По трем причинам: 1) этот гипотетический спутник не был обнаружен «Вояджером-2»; 2) отсутствие трехчастотных резонансов с 4 остальными кольцами; 3) отсутствие ответов на вопрос, почему в местах более сильных резонансов от спутников колец не обнаружено, — интерес специалистов переключился на обсуждение других гипотез. Таковыми, например, явились выдвинутые в 1979 г. гипотезы о существовании в каждом кольце внутренних спутников, определяющих динамику частиц колец <sup>3, 4</sup>. Однако наибольшую популярность завоевала гипотеза Гольдрайха и Тримейна <sup>5</sup> о существовании вокруг каждого кольца пары спутников — «пастухов», которые не позволяют частицам кольца распыляться из-за взаимных соударений (годом позже, в 1980 году, спутники — «пастухи» были открыты возле узкого кольца F Сатурна).

В работе авторов <sup>6</sup> показано, что кольца расположены в зоне интенсивного столкновительного разрушения частиц, соударяющихся, вследствие дифференциального вращения колец, со значительными скоростями  $\sim \Omega a$  ( $a$  — размер частиц,  $\Omega$  — угловая скорость орбитального вращения). Образование спутников в зоне колец запрещено и они должны располагаться за внешней границей этой зоны — в области меньших столкновительных скоростей. Сосуществование колец и спутников возможно только в узкой переходной зоне между областями колец и спутников. Поэтому трудно согласиться как с гипотезой спутников-«пастухов», так и с моделью внутренних спутников, предполагающих наличие во всей зоне колец большого количества спутников. С другой стороны, в кольцах Сатурна, в начале 80-х годов, открыты узкие (часто эксцентриситетные) колечки, положение которых хорошо коррелирует с линдбладовскими (типа  $n : (n + 1)$ ) резонансами низшего порядка ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) от внешних спутников. Авторами была выдвинута гипотеза <sup>7, 8</sup> о резонансной природе колец Урана, по которой положения колец определяются низшими ( $1 : 2, 2 : 3, 3 : 4$ ) линдбладовскими резонансами от серии мелких неоткрытых спутников за внешней границей колец. Действительно, между кольцами и ближайшим известным спутником Урана — Мирадой простирается значительное (около 80 тыс. км) пространство, которое не может быть пустым в силу непрерывного распределения вещества в протодиске. Аналогичные серии небольших спутников в последние годы обнаружены за внешней границей колец Сатурна и Юпитера. Побудительной причиной для высказывания данной гипотезы послужила обнаруженная авторами удивительная закономерность в распределении колец Урана по радиусу: кольца могут быть разбиты на такие пары, для каждой из которых

найдется внешняя орбита, находящаяся с данной парой колец в резонансных соотношениях типа 1 : 2, 2 : 3 или 2 : 3, 3 : 4. Это позволяет вычислить орбиты наиболее вероятных спутников \*). На рис. 1 изображена выдвинутая авторами гипотетическая система спутников и положения их резонансов

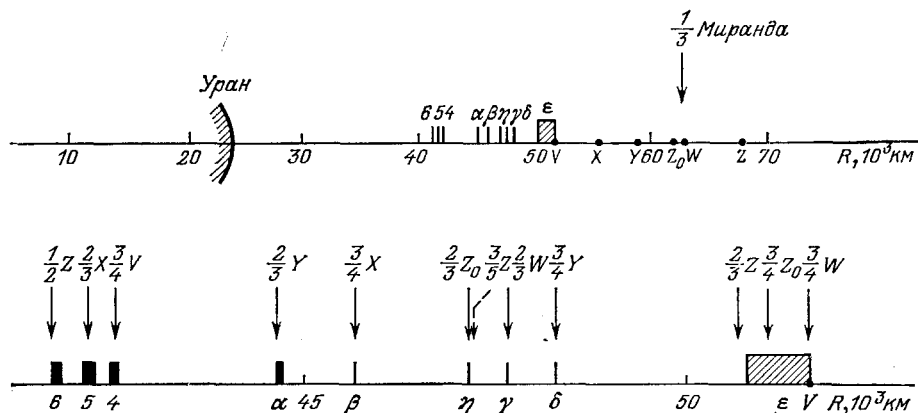


Рис. 1. Общее расположение колец Урана и предполагаемых спутников.

Рисунок взят из работы <sup>2</sup> с добавлением спутника  $z_0$  (с радиусом орбиты 61 860 км) из первого, неопубликованного, варианта работы <sup>2</sup>. Кольца обозначены линиями (или прямоугольниками), ширина которых соответствует размытию положения колец из-за эксцентриситета; стрелками указаны резонансные орбиты от внешних спутников в зоне колец

в зоне колец. Исключением является спутник V: он имеет только один резонанс в зоне колец, зато выполняет дополнительную функцию: «пасет» кольцо  $\epsilon$  — самое широкое и эллиптическое из всех колец (на рис. 1 указаны не сами кольца, а зоны их эксцентриситетного движения, сами кольца очень

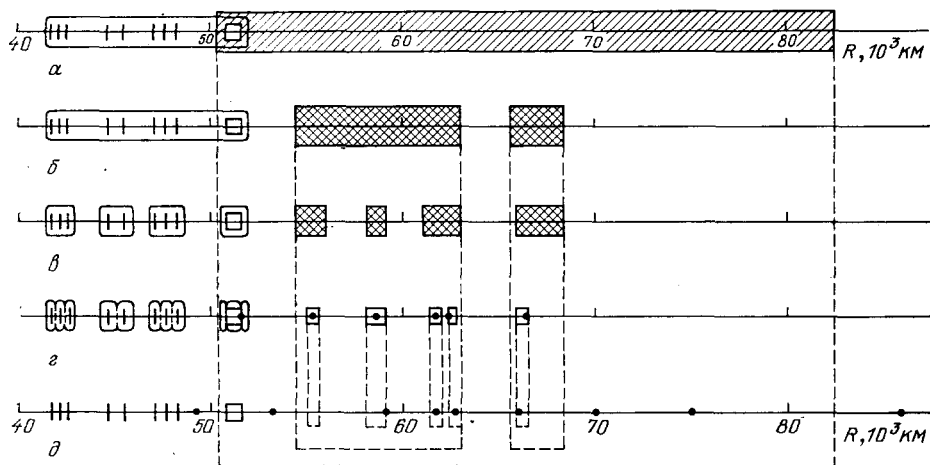


Рис. 2. Алгоритм выделения наиболее вероятных зон расположения неоткрытых спутников и сравнение их положений с открытыми спутниками.

Зона расположения спутников, имеющих: один резонанс типа 1 : 2, 2 : 3, 3 : 4 в зоне колец (а); два резонанса в зоне колец (б); резонансы в двух группах колец и резонансы вблизи двух колец (в); точками указаны предполагаемые спутники, положение которых выбрано из требования максимальной близости резонанса к кольцам (г); на рис. д указаны спутники, открытые «Вояджером-2»

узки — от 600 метров до 100 км). На рис. 2, а — г показана последовательность постепенного сужения наиболее вероятных областей расположения спутников: а — зона спутников, которые имеют хотя бы один резонанс

\*) С наибольшей вероятностью можно определить радиусы орбит только тех спутников, которые определяют расположение сразу двух колец.

в области колец (имеются в виду только резонансы рассматриваемого типа); *б* — область расположения спутников с двумя резонансами в зоне колец; *в* — четыре области, в которых могут располагаться спутники с резонансами в двух группах колец; *г* — пять узких зон наиболее вероятного расположения спутников — с двумя резонансами вблизи пары колец. Точками указаны выбранные положения гипотетических спутников (из требования максимальной близости резонансов к кольцам).

На рис. 2, *д* изображены 10 спутников, открытых в январе 1986 г. американским аппаратом «Вояджером-2», пролетевшим вблизи Урана. Как и ожидалось, все спутники расположены за внешней границей колец (кроме одного, самого мелкого, обнаруженного, в «переходной» зоне вблизи внешней границы колец).

Радиусы орбит предсказанных спутников $R_{pr}$ , км	Радиусы орбит открытых спутни- ков *) $R_d$ , км	Точность совпаде- ния орбит $R_{pr}-R_d$ , км	Число и тип резонансов в зоне колец от спутника	Диаметр спутника, км
	85 980			
	75 100			
	69 920			
66 450	66 090	+360	2 (1 : 2, 2 : 3)	100
	64 350		1 (2 : 3)	80
62 470	62 700	-230	2 (2 : 3, 3 : 4)	50
61 860	61 750	+110	2 (2 : 3, 3 : 4)	80
58 600	59 100	-500	2 (2 : 3, 3 : 4)	50
55 380				
51 580	53 300	-1720	1 (3 : 4)	25
	49 300		0	15

\*) Точность определения орбит около 50 км.

В таблице приведены полученные «Вояджером-2» данные 10 новых спутников Урана и их сравнение с предсказанными орбитами. Ниже приводятся сравнения положений гипотезы с полученными полгода спустя после публикации этих данных результатами наблюдений «Вояджера-2».

#### Гипотеза

#### Наблюдения

1. За внешней границей колец Урана существует серия мелких спутников.
2. Внутри зоны колец спутники не образуются (за исключением узкой переходной области вблизи внешней границы колец).
3. Существование колец связано с резонансным воздействием типа 1 : 2, 2 : 3, 3 : 4 от неоткрытых спутников (расположенных в зоне 50—83 тыс. км).
4. Пять предполагаемых спутников должны оказывать резонансное воздействие сразу на пару колец каждый, что позволяет вычислить радиус их орбиты.
1. За внешней границей колец открыто 9 спутников.
2. В переходной зоне (вблизи внешней границы колец) расположен один, самый мелкий спутник.
3. Восемь из десяти спутников расположены в указанной зоне и имеют в области колец резонансы данного типа.
4. Четыре из десяти спутников определяют положение двух колец каждый; их орбиты хорошо совпадают с предсказанными орбитами новых спутников.

5. Особенности внешнего кольца  $\epsilon$  связаны с наличием спутника-«пастуха».
6. Предполагаемый диаметр спутников — около 100 км<sup>9</sup>.
5. Кольцо  $\epsilon$  оказалось единственным, возле которого открыты «пастухи».
6. Диаметр спутников в среднем 70 км (от 15 до 165 км).

Подтверждение гипотезы о резонансной природе колец Урана доказывает, что резонансное воздействие внешнего спутника способствует возникновению узкого кольца. Образование узких колец Урана начинается, видимо, с появления в резонансных точках околопланетного протодиска серии спиральных волн плотности и изгибных волн.

Спиральные волны плотности, распространяясь наружу от резонансной орбиты, служат барьерами на пути мелкой пыли, движущейся к планете под действием, например, эффекта Пойнтинга — Робертсона или трения о газ. Пыль может останавливаться на внешнем крае области, возмущаемой спиральной волной, образуя кольцевые уплотнения. Таким образом, расстояние между резонансом и кольцом не может превышать характерного масштаба затухания спиральной волны (которая в кольцах Сатурна достигает нескольких сотен километров).

Изгибные волны, распространяясь к планете, могут являться областями повышенной скорости движения пыли. В таком случае пыль может скапливаться на внутреннем крае изгибной волны — на границе невозмущенной зоны.

Аналогичный механизм роста вследствие потока мелкой пыли исследовался авторами для случая спонтанных кольцевых флуктуаций диска<sup>10</sup>. Учет недиффузионного движения мелкой пыли приводит к следующему дисперсионному соотношению для кольцевых возмущений диска с редкими столкновениями частиц<sup>10</sup>:

$$\gamma = -Dk^2 + AK + B,$$

$$A \approx \left( \frac{\partial N^-}{\partial T_0} - \frac{\partial N^+}{\partial T_0} \right) \frac{T_0}{3\Omega^2} \cdot 2\pi G, \quad B = - \left( \frac{\partial N^-}{\partial \sigma_0} - \frac{\partial N^+}{\partial \sigma_0} \right), \quad T_0 \equiv c^2,$$

где  $D = 6\nu > 0$  — положительный коэффициент диффузии ( $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости),  $N^+$  — скорость увеличения поверхностной плотности  $\sigma_0$  диска при поглощении пыли,  $c^2$  — квадрат дисперсии скоростей хаотического движения частиц,  $k$  — волновой вектор. При  $A > 0$ ,  $B > 0$  начальное возмущение диска нарастает ( $\gamma > 0$ ), активно поглощая оседающую пыль. По такой схеме образуется крупномасштабное расслоение (от 50 до 1000 км) колец Сатурна; в достаточно плотном диске может быть  $D < 0$ , тогда развивается коротковолновая неустойчивость с масштабом расслоения в несколько сот метров<sup>10</sup>.

Эволюция кольцевого уплотнения, индуцированного резонансным возмущением от спутника, изучена пока недостаточно подробно.

Эксцентриситет кольца может противодействовать диффузионному расплыванию колец. Действительно, от кругового кольца частицы могут отрываться, переходя при взаимных соударениях на соседние квазикруговые орбиты, не пересекающиеся с «материнским» кольцом. Для частиц, убегающих с эллиптического кольца, не существует подобных близких орбит. Все орбиты оторвавшихся частиц неизбежно пересекаются с кольцом, вследствие дифференциальной прецессии орбит в несферичном поле Урана, т. е. частицы будут эффективно возвращаться на кольцо. Дифференциальная прецессия самого кольца стабилизируется самогравитацией при поверхностной плотности кольца около 25 г/см<sup>3</sup><sup>10</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dermott S. F., Gold T.//Nature. 1977. V. 267. P. 590.
2. Steigmann G. A.//Nature. 1978. V. 274. P. 454.
3. Van Flandern T. C.//Science. 1979. V. 204. P. 1076.
4. Dermott S. F., Gold T., Sinclair A.//Astron. J. 1979. V. 84. P. 1225.
5. Goldreich P., Tremaine S.//Nature. 1979. V. 277. P. 97.
6. Горькавый Н. Н., Фридман А. М.//Письма Астрон. ж. 1985. Т. 11. С. 633.
7. Горькавый Н. Н., Фридман А. М.//Ibidem. С. 717.
8. Горькавый Н. Н., Фридман А. М.//Астрон. цирк. 1985. № 1391. С. 1.
9. Афанасьев В. Л., Горькавый Н. Н., Смирнов М. А., Фридман А. М.//Ibidem. С. 3.
10. Горькавый Н. Н., Фридман А. М.//Нелинейные волны: Структуры и бифуркации/Под ред. А. В. Гапонова-Грехова, М. И. Рабиновича. — М.: Наука, 1986.