

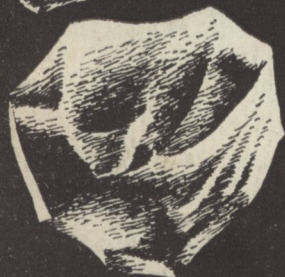
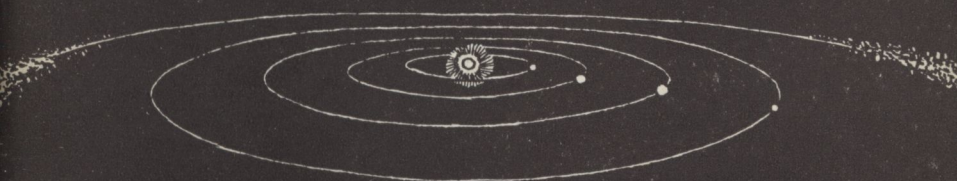
НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

5/1977

СЕРИЯ
КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

А. Н. СИМОНЕНКО
ПОЯС
АСТЕРОИДОВ



НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

Серия «Космонавтика, астрономия»
№ 5, 1977.
Издается ежемесячно с 1971 г.

А. Н. Симоненко,
кандидат физико-математических наук

ПОЯС АСТЕРОИДОВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»
Москва 1977

Симоненко А. Н.

С37 Пояс астероидов. М., «Знание», 1977.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Космонавтика, астрономия», 5. Издается ежемесячно с 1971 г.)

В брошюре излагаются современные представления об астероидах — малых телах Солнечной системы, движущихся преимущественно в обширной области («поясе») между орбитами Марса и Юпитера. Дается общая характеристика закономерностей движения астероидов, описываются их физические свойства и обсуждается возможное происхождение пояса астероидов. Внимание уделяется и описанию метеоритов — осколков астероидов, падающих время от времени на Землю.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

20604

526

Введение

В середине XVIII в. знали всего шесть планет Солнечной системы — Меркурий, Венеру, Землю, Марс, Юпитер и Сатурн. Причем было известно, что от последних двух первые планеты разделены непомерно большим расстоянием. В самом деле, расстояние между орбитами Меркурия и Венеры составляет 0,33 а. е.¹, между орбитами Венеры и Земли — 0,28 а. е., между орбитами Земли и Марса — 0,52 а. е., а дальше — до орбиты Юпитера — простирается зона в 7 раз более широкая — 3,7 а. е. (или 555 млн. км). На нее еще в 1595 г. обратил внимание Иоганн Кеплер, открывший законы движения планет и пытавшийся, правда, безуспешно, найти «гармонию» в строении Солнечной системы. Со времен Кеплера астрономы и философы не забывали о наличии этой зоны и даже иногда высказывали предположение о существовании в ней неизвестной планеты.

В 1766 г. очень скромный и мало известный профессор физики из Виттенберга И. Тициус впервые сформулировал закон планетных расстояний в переведенной им на немецкий язык книге «Созерцание природы» знаменитого в то время французского естествоиспытателя и философа Ш. Бонне. Тициус даже не указал своей фамилии, а просто вставил свой закон в подходящем месте в текст Бонне (лишь во втором немецком издании книги Бонне через 6 лет он дал его как примечание переводчика).

«Обратите внимание на расстояния между соседними планетами, — писал он, — и вы увидите, что почти все они возрастают пропорционально радиусам самих

¹ 1 астрономическая единица (1 а. е.) равна 150 млн. км. Этой единицей, равной среднему расстоянию Земли от Солнца, пользуются в астрономии для измерения больших расстояний.

орбит. Примите расстояние от Солнца до Сатурна за 100 единиц, тогда Меркурий окажется удаленным от Солнца на 4 такие единицы; Венера — на $4+3=7$ тех же единиц; Земля — на $4+6=10$; Марс — на $4+12=16$. Но смотрите, между Марсом и Юпитером происходит отклонение от этой такой точной прогрессии. После Марса должно идти расстояние $4+24=28$ единиц, на котором мы сейчас не видим ни большой планеты, ни спутника... Давайте твердо верить, — продолжал Тициус, — что это расстояние, без сомнения, принадлежит пока еще не открытым спутникам Марса... После этого неизвестного нам расстояния получается орбита Юпитера на расстоянии $4+48=52$ единицы, а дальше — расстояние орбиты самого Сатурна $4+96=100$ таких единиц. Какое удивительное соотношение!»

В 1772 г. 25-летний немецкий астроном И. Боде, ставший впоследствии широко известным ученым, прочитав второе издание «Созерцания природы», был потрясен тем, насколько точно истинные размеры планетных орбит описываются законом Тициуса². И он описал этот закон в своей книге «Руководство по изучению звездного неба», но забыл сослаться на Тициуса! Правда, в отличие от Тициуса Боде предсказывал на расстоянии 2,8 а. е. от Солнца существование не спутников Марса, а «большой планеты».

В 1781 г. была открыта седьмая планета Солнечной системы — Уран. Она оказалась удаленной от Солнца на огромное расстояние (дальше Сатурна), но величина этого расстояния (19,2 а. е.) совпадала с предсказываемой законом Тициуса. В связи с этим Боде стал еще больше его пропагандировать и со временем начал упоминать его автора (тем не менее впоследствии этот закон называли правилом Тициуса — Боде). При этом в еще большей степени окрепла идея о неизвестной планете между Марсом и Юпитером, основанная лишь на непонятной, лишенной какого бы то ни было объяснения закономерности в ряде чисел, увлекающая многих ученых. Что ж, астрономия того времени еще только училась стройной логике, основанной на математической обработке наблюдаемых фактов, а основные законы природы еще только начинали осмысливаться.

² Большая полуось орбиты Меркурия составляет 0,387 а. е., Венеры — 0,723 а. е., Земли — 1 а. е., Марса — 1,524 а. е., Юпитера — 5,203 а. е., Сатурна — 9,539 а. е.

Одним из самых горячих сторонников идеи «замарсианской» планеты стал молодой австрийский астроном Ф. Цах, которому в то время едва исполнилось 18 лет. Ему пришлось более 10 лет уговаривать астрономов организовать систематические поиски планеты, пока, наконец, соответствующая договоренность не была достигнута в 1796 г. на астрономической конференции в городе Готе, где жил Цах. Пять человек, по выражению самого Цаха, образовали «отряд небесной полиции» с целью «выследить и поймать беглого подданного Солнца». Но сделать они ничего не успели, так как... «планета» была совершенно случайно обнаружена другим ученым.

Открытие пояса астероидов

В первую новогоднюю ночь XIX в. сицилийский астроном Д. Пиацци проводил в Палермо наблюдения положений звезд для составления своего звездного каталога. В созвездии Близнецов он вдруг заметил слабый звездообразный объект с блеском около 7^m ³. В следующие ночи Д. Пиацци выяснил, что объект изменил свое положение по отношению к соседним звездам. Но еще много ночей следил он за странной «звездой», не веря, что это планета, пока болезнь не прервала его наблюдения. А потом найти объект Пиацци уже не смог. Он разослал астрономам сообщение о своем открытии, описал объект и просил поискать его, однако его так и не нашли.

Как раз в это время 23-летний немецкий математик К. Гаусс увлекся развитием методов обработки астрономических наблюдений. Свой метод наименьших квадратов, а также метод определения орбиты небесного тела по данным наблюдений, проведенным в три разных момента времени, он применил к сообщенным ему Пиацци положениям объекта. Гаусс получил, что орбита объекта не только лежит между орбитами Марса и Юпитера, но и что полуось орбиты точно совпадает с предсказанным Тициусом значением 2,8 а. е. Это была

³ Блеск звезд обычно выражают в звездных величинах. При переходе к соседней звездной величине яркость звезд уменьшается в 2,5 раза. Самые яркие звезды на небе имеют нулевую звездную величину, самые слабые, видимые невооруженным глазом в ясную ночь, 6^m

искомая планета. Пиацци назвал ее Церера Фердинанда.

Гаусс достаточно точно предвычислил координаты планеты, чтобы ее можно было найти снова. Оказалось, что она должна будет долго скрываться в лучах Солнца и лишь в сентябре 1801 г. станет вновь видна с Земли. Однако до самого Нового года мешала непогода, и только в новогоднюю ночь 1802 г. (в годовщину открытия) Ф. Цах, а затем Г. Ольберс отыскиали Цереру (как стали называть ее позднее).

Церера, как и другие планеты, была холодной и светила отраженным от нее солнечным светом. Но как же слаб был этот свет! «Вечерняя звезда» Венера, да и некоторые другие планеты светили в сотни раз ярче. Оказалось, что между Марсом и Юпитером движется планета-«крошка» — планетоид, или астероид, как ее предложил называть В. Гершель.

28 марта 1802 г. немецкий врач Г. Ольберс, давно и увлеченно занимавшийся астрономией, вновь отыскивая Цереру в районе, предсказанном Гауссом, неожиданно обнаружил там совсем другую, новую планету, еще более слабую (около 9^m). Ольберс назвал ее Палладой, она двигалась по своей собственной орбите, сходной с орбитой Цереры (рис. 1).

Две планеты, хоть и маленькие, но на одном и том же расстоянии от Солнца? Это было непонятно. «Где тот прекрасный закономерный порядок, которому подчинялись планеты в своих расстояниях? — писал Ольберс Боде. — Мне кажется, еще рано философствовать по этому поводу; мы должны сначала наблюдать и определять орбиты, чтобы иметь верные основания для наших предположений. Тогда, может быть, мы решим или, по крайней мере, приблизительно выясним, *всегда ли* Церера и Паллада пробегали свои орбиты в мирном соседстве, *отдельно* одна от другой, или обе являются только обломками, только кусками прежней большей планеты, которую взорвала какая-нибудь катастрофа». Так Ольберсом была высказана его знаменитая гипотеза о разрыве планеты и образовании ее осколков — астероидов.

Ольберс решил сам проверить свою гипотезу. Изучив положение орбит Цереры и Паллады в пространстве, он обратил внимание на то, что эти орбиты сильно сближаются в двух диаметрально противоположных

точках, которые видны с Земли в созвездиях Девы и Кита. «Если катастрофа произошла, — думал Ольберс, — в одной из этих точек, то все осколки должны проходить через нее, и, следовательно, эти осколки нужно искать не по всему небу, а лучше всего в окрестно-

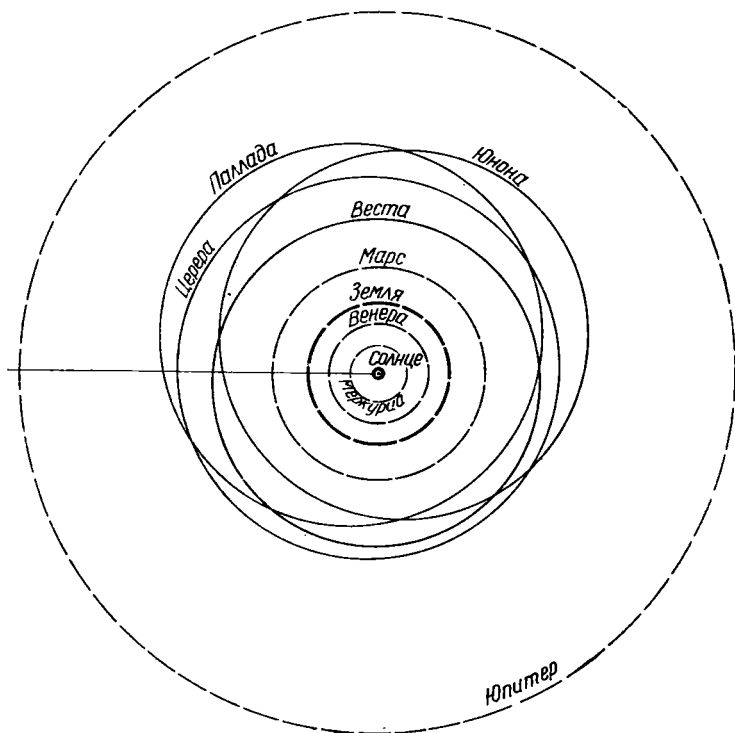


Рис. 1. Орбиты первых четырех астероидов — Цереры, Паллады, Юноны и Весты, лежащие между орбитами Марса и Юпитера.

стях этих точек». В частности, Г. Ольберс в письме к Боде писал: «Следуя моей гипотезе, я вывел, что все астероиды, которых может оказаться еще много, должны пробегать северо-западную часть созвездия Девы и западную часть Кита. Верна или нет гипотеза, это я пока не решаю. Я просто пользуюсь ею для цели, которой служат вообще все гипотезы: руководствуюсь ею при наблюдениях».

Третья «планетка» (около 8^m), названная Юноной, была действительно открыта в созвездии Кита — 1 сентября 1804 г., ее там увидел К. Гардинг. Сам Ольберс вел поиски в созвездии Девы, и три года его терпеливых наблюдений увенчались успехом — 29 марта 1807 г. он открыл четвертую «планетку» — Весту (6^m), единственную из четырех, которую можно наблюдать невооруженным глазом.

В последующие почти 40 лет никаких открытий новых астероидов не было. Ольберс умер, так и не узнав, что между Марсом и Юпитером действительно движется огромное множество астероидов. Но они вовсе не проходят через место «пересечения» орбит первых четырех. Гипотеза Ольберса оказалась ошибочной. Это стало ясно спустя много лет.

В декабре 1845 г. в берлинских газетах появилось сообщение, что 8 числа бывший почтовый чиновник из Дрездена К. Генке открыл пятую малую планету ($9,5^m$) названную Астреей, а через 1,5 года — 1 июня 1847 г. — он же открыл еще одну, уже шестую по счету (Гаусс назвал ее Гебой). В том же 1847 г. американец Дж. Хемд обнаружил Ирис и Флору, и открытия астероидов последовали одно за другим (рис. 2). Поскольку астероиды обнаруживали на небе, как правило, в пределах довольно широкой полосы, тянущейся вдоль эклиптики⁴ и опоясывающей все небо, то отсюда и возникло название — «пояс астероидов» (хотя сейчас «поясом астероидов» называют обширную область между орбитами Марса и Юпитера, где движется большинство астероидов).

К 1891 г. с помощью визуальных наблюдений на небольших телескопах было открыто уже 322 астероида. Однако поиски астероидов становились все труднее, так как вскоре иссякли «запасы» сравнительно ярких астероидов.

С 1890 г. при поисках астероидов начали применять фотографические пластинки, и к 1924 г. стало известно уже 1000 таких объектов. Огромное число астероидов открывали и вновь «теряли». Так, в одном только 1931 г. было открыто 398 астероидов, но 75% из них наблюдались лишь один-два раза, в связи с чем оказалось невозможным определение их орбит, а потому в

⁴ Т. е. линия пересечения плоскости (ее также называют эклипстикой) орбиты Земли с небесной сферой.

разряд *известных* было зачислено в 1931 г. меньше 100 из 398 астероидов.

Первое время астероиды называли именами богинь, но затем им стали давать имена людей (как знаменитых, так и просто знакомых) и даже... океанских пародов, любимых собак и кулинарных блюд.

В настоящее время астероиду сразу после его открытия присваивается предварительное обозначение, содержащее год открытия (например, 1937 НА), а потом, если его орбита станет хорошо известной, ему присваивается постоянный порядковый номер и название. Следит за этим Планетный центр в Цинциннати (США). В настоящее время число *нумерованных* астероидов приближается к 2000.

Долгое время одно из первых мест в мире по числу открываемых и наблюдаемых астероидов занимала наша астрофизическая обсерватория в Симеизе. Бывший директор этой обсерватории Г. Н. Неуймин открыл свыше 400 астероидов, из которых более 60 получили номера и названия.

Среди астероидов, открытых русскими и советскими учеными, есть Москва, Владилена (названная в честь В. И. Ленина) и т. д.

Анализ движения многочисленных астероидов со временем становился все более трудоемкой задачей. В связи с этим было создано несколько мировых вычислительных центров. Например, у нас в стране в 1920 г. возник вычислительный институт в Ленинграде, впоследствии названный Институтом теоретической астрономии

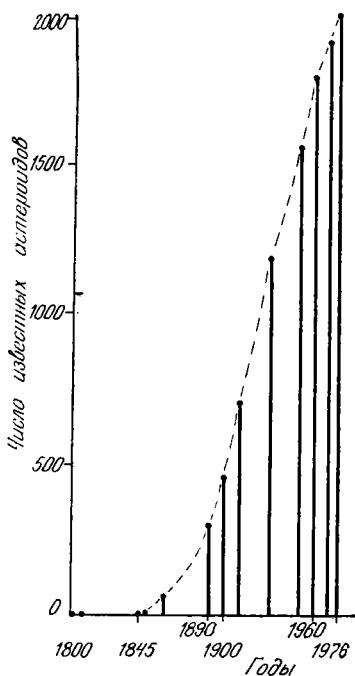


Рис. 2. Интенсивный рост числа открытых и занумерованных астероидов, который начался в середине XIX в. и продолжается до сих пор.

(ИТА) Академии наук СССР. Одной из его главных задач стала организация и координация всех теоретических исследований в Советском Союзе по астероидам.

Со временем началось изучение и физических свойств астероидов. Но их изучение затруднялось тем, что они наблюдались на разных инструментах и в различных погодных условиях (качество наблюдений при этом было неодинаковым). В связи с этим необходимо было пересмотреть данные по всем астероидам (или хотя бы только по нумерованным). Эта колоссальная работа была выполнена в 1950—1952 гг. на Йеркской и МакДоналдской обсерваториях. Дважды была почти полностью сфотографирована вдоль всей эклиптики полоса шириной 40° . Было снято 2000 пластинок, на которых оказались зафиксированы изображения астероидов до $14,5^m$. Этот обзор получил название МакДоналдского обзора.

Спустя 10 лет обзор астероидов был продолжен. В сентябре — октябре 1960 г. на обсерватории Маунт-Паломар в США было проведено систематическое фотографирование небольшой области неба, размером $8 \times 12^\circ$, расположенной на эклиптике около точки весеннего равноденствия⁵. За два месяца было сфотографировано около 2200 астероидов вплоть до 20^m , причем для 1811 из них удалось определить орбиты (вычисления проводились на Лейденской обсерватории). Этот обзор получил название «Паломар-Лейденского обзора».

Свет, идущий к нам от астероидов 20^m , в сотни раз слабее, чем свет от самых ярких астероидов — Цереры, Паллады, Юноны и Весты. Вероятно, если бы фотографирование таких слабых астероидов проводилось в более широкой полосе вдоль всей эклиптики, было бы зафиксировано в десятки раз большее число таких объектов.

Физические свойства астероидов

Размеры и массы. Размеры планет определяют, измеряя угол, под которым виден с Земли их диаметр. К астероидам этот метод неприменим: они так малы, что даже в телескопы кажутся точками как звез-

⁵ Точками весеннего и осеннего равноденствия называются точки пересечения эклиптики с линией небесного экватора.

ды (отсюда и название «астероиды», т. е. «звездоподобные»).

Только у первых четырех астероидов удается различить их диск. Угловой диаметр Цереры оказался самым большим: он достигает 1" (у Паллады, Юноны и Весты он в несколько раз меньше). Угловые размеры этих астероидов были весьма точно измерены еще в 1890 г. Э. Барнардом на Ликской и Йеркской обсерваториях. Определив в момент наблюдений расстояние до Цереры, Паллады, Юноны и Весты и произведя необходимые вычисления, Барнард получил, что их диаметры составляют соответственно 770, 490, 190 и 380 км (как видно, они все могли бы уместиться на площади, занимаемой Аляской!).

Как же определить размеры многих других, более мелких астероидов?

До самого последнего времени они оценивались на основании блеска астероидов, причем звездная величина астероида сопоставлялась со звездными величинами Цереры, Паллады, Юноны и Весты (размеры которых уже были известны). Однако блеск астероидов меняется: во-первых, с изменением расстояния астероида от Солнца (из-за изменения количества солнечного света, падающего на астероид); во-вторых, с изменением расстояния от Земли (из-за изменения количества достигающего Земли света, отраженного от астероида); в-третьих, с изменением фазового угла⁶, так как с ростом этого угла становится видна с Земли все меньшая доля освещенной поверхности астероида. Поэтому для определения угловых размеров сравнивают между собой не видимые звездные величины астероидов, а величины, которые имели бы данные астероиды, если бы их «поместить» на определенные (единичные) расстояния от Солнца и Земли и если их «расположить» так, чтобы их фазовый угол равнялся нулю.

До МакДоналдского обозрения эти приведенные звездные величины (называемые также абсолютными) разные наблюдатели выражали в своих, не сравнимых между собой, фотометрических системах, что давало сильный разброс в оценках размеров астероидов. В МакДоналдском обозрении для всех нумерованных

⁶ Фазовый угол (или угол фазы) — угол между направлениями на Солнце и Землю для воображаемого наблюдателя, находящегося на астероиде.

астероидов были установлены абсолютные звездные величины, выраженные уже в единой Международной фотографической системе (та же система использована в Паломар-Лейденском обозрении).

Правда, осталась другая, казалось бы, неустраняемая трудность данного метода: определения размеров приходится делать при некоторых предположениях об отражательной способности астероидов — их альбедо. Обычно предполагают, что альбедо астероида такое же, как среднее альбедо четырех крупнейших астероидов. А между тем понятно, что в одних и тех же условиях наблюдений маленький астероид, сложенный светлым, хорошо отражающим веществом, может оказаться ярче большого, но более темного астероида. Тем не менее при оценках размеров многих астероидов и сейчас используют именно среднее альбедо.

Итак, если нам известна абсолютная звездная величина астероида $m_{абс}$, то предполагая, что альбедо всех астероидов одинаково, можно легко определить радиус (в километрах) астероида R по очень простой формуле: $\lg R = 3,245 - 0,2 m_{абс}$. †

Далее, на основании вычисленного уже радиуса можно оценить массу астероида M , если известна плотность астероидного вещества. Обычно считают, что она равна средней плотности вещества астероидных осколков — метеоритов, падающих время от времени на нашу Землю. Эта плотность ρ , измеренная в земных лабораториях, составляет $3,5 \text{ г/см}^3$ (хотя встречаются образцы довольно легкие, с плотностью около 2 г/см^3 , а также и очень тяжелые, состоящие из никелистого железа с плотностью $7,8 \text{ г/см}^3$).

В некоторых случаях размеры астероидов удалось определить «нестандартным» способом, например при покрытии ими звезд (природа такого явления та же, что и при покрытии звезд Луной). Одно из таких покрытий произошло вечером 23 января 1975 г. и наблюдалось в США. Астероид Эрос, как было предсказано Б. Марсденом, должен был покрыть звезду χ Лебедя. Полоса покрытия шириной около 25 км должна была пройти через города Олбани, Хартферт, Коннектикут, и вблизи восточной окраины Лонг-Айленда. Было организовано 17 пунктов наблюдений, где расположились на расстоянии 6—8 км вдоль полосы покрытия учащиеся окрестных колледжей и студенты астрономических факультетов.

Во время покрытия Эрос (около 9^m) с угловой скоростью $0,2—0,3^\circ$ в час приблизился к звезде χ Лебедя, которая была значительно ярче астероида (около 4^m). Внезапно свет звезды исчез (на пути ее лучей, идущих к нам, появился непрозрачный заслон — астероид), а через несколько секунд звезда вновь появилась (рис. 3).

По продолжительности покрытия Марсден определил, что видимый поперечник Эроса составляет около 24 км.

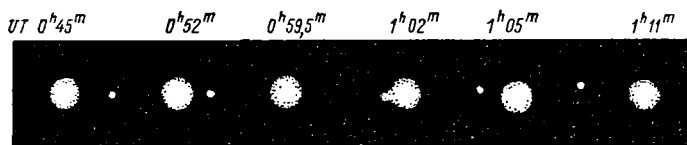


Рис. 3. Серия последовательных положений Эроса и χ Лебедя до и после покрытия звезды астероидом 23 января 1975 г. Заметно изменение блеска Эроса с течением времени — в момент покрытия блеск Эроса был близок к минимуму.

Как же еще (кроме оценки по абсолютной звездной величине) можно определить массы астероидов? Принципиально возможно, хотя и очень трудно, вычислить массу астероидов на основании их взаимных возмущений (при сближениях), которые испытывают астероиды. Такой метод определения масс был разработан И. Шубартом из Астрономического института в Гейдельберге. Он применил его для определения масс крупнейших астероидов и получил, что масса Цереры составляет $(5,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-11} M_{\odot}$ (где M_{\odot} — масса Солнца), масса Паллады — $(1,14 \pm 0,22) \cdot 10^{-11} M_{\odot}$. Аналогичным методом другие астрономы получили, что масса Весты составляет $(1,20 \pm 0,12) \cdot 10^{-11} M_{\odot}$ ⁷. Таким образом, масса даже крупнейшего астероида — Цереры — в 5000 раз меньше массы Земли и в 600 раз меньше массы Луны.

После того как пояс астероидов стал «досягаем» для космических летательных аппаратов, мы получили возможность определять массы очень мелких астероидов.

Телескопическая аппаратура, установленная на космических ракетах, позволила определить звездные величины (и размеры) астероидных осколков с попереч-

Поскольку масса Солнца составляет $1,99 \cdot 10^{33}$ г, то масса Цереры равна $1,17 \cdot 10^{23}$ г, масса Паллады — $2,26 \cdot 10^{22}$ г, масса Весты — $2,38 \cdot 10^{22}$ г.

никами в несколько сантиметров и дециметров (которые недоступны наблюдениям с Земли).

Таким образом, в настоящее время имеются сведения об астероидах «всех рангов» — от крупных тел с массами в миллиарды миллиардов тонн до совсем мелких, которые могли бы уместиться на ладони. В поясе астероидов движутся и целые «тучи» пыли, свойства которой исследуются по косвенным признакам. Все это позволяет составить довольно полное представление о поясе астероидов.

Еще в 50-х годах советский астроном И. И. Путилин произвел подсчеты общего числа нумерованных (т. е. с хорошо известными орбитами) астероидов. Результат получился удивительным. Оказалось, что все астероиды, собранные вместе, уместились бы в кубике со стороной всего около 500 км! Чуть ли не половину объема заняли бы Церера с Вестой и Палладой. Еще 25% пришлось бы на долю Юноны с астероидами до 100-го включительно. Открытия следующих астероидов (все более мелких) приводили лишь к очень медленному возрастанию этого «объема» астероидного вещества, а после 1000-го по счету астероида рост их общего «объема» почти совсем прекратился (рис. 4). Неоткрытые астероиды, вероятно, так малы, что, несмотря на их огромное число, не смогут увеличить сколько-нибудь значительно этот «объем», а мелких частиц и пылинок, согласно оценкам, едва ли хватит, чтобы засыпать пустоты между астероидами, лежащими рядом в 500-километровом кубе.

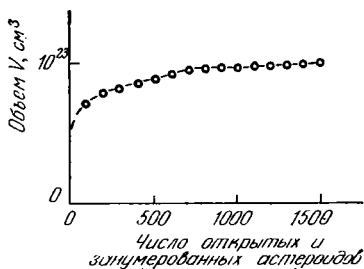


Рис. 4. Суммарный объем астероидов. Новые открытия мелких астероидов почти не увеличивают его.

Можно принять, что общий объем астероидного вещества в межпланетном пространстве составляет приблизительно около 10^{23} см. Но астероиды распределены по огромному объему межпланетного пространства, так что на одно тело приходится много кубических километров пространства. Поэтому вероятность столкновения космического аппарата, про-

летающего сквозь пояс астероидов (например, на пути к Юпитеру), с каким-нибудь даже крошечным астероидом ничтожно мала.

Если принять за среднюю плотность астероидного вещества величину $3,5 \text{ г/см}^3$ (см. выше), тогда получим, что общая масса всех астероидов составляет около $3,5 \cdot 10^{23} \text{ г}$ — число, огромное по нашим земным представлениям, но ничтожно малое по астрономическим масштабам. (Чтобы «слепить» все астероиды — известные и неизвестные — потребовалось бы с поверхности Земли содрать слой «всего» в 500 м толщиной!)

Недавно И. Шубарт определил массу астероидного вещества по тем суммарным возмущениям, которые испытывают крупнейшие астероиды, двигаясь в окружении своих многочисленных собратьев. Он получил значение $3 \cdot 10^{23} \text{ г}$, что находится в прекрасном согласии с полученной ранее оценкой.

Проводились также попытки определить воздействие гравитационного поля пояса астероидов на движение Марса. Однако Марс оказался слишком массивным для астероидов, и это воздействие не удалось выявить, что тоже подтверждает ничтожность общей массы астероидов. Предполагают, правда, что у самой орбиты Юпитера движутся неизвестные пока нам массивные тела. Но маловероятно, чтобы их было там слишком много, и вряд ли они смогут значительно увеличить оценку общей массы астероидного вещества.

К чему приводят малые размеры. По закону всемирного тяготения каждый астероид притягивает другие тела. Но как же слабо это притяжение! На астероиде довольно больших размеров (поперечником в 200 км) сила тяжести на поверхности в 100 раз меньше, чем на Земле, так что человек, оказавшись на нем, весил бы меньше 1 кг и едва ли почувствовал бы свой вес. Прыгнув на астероиде с высоты 10-этажного дома, он бы чуть ли не четверть минуты опускался на поверхность, достигнув скорости лишь около 1,5 м/с в момент «приземления». Вообще говоря, пребывание на астероидах мало чем отличается от пребывания в условиях полной невесомости.

Первая космическая скорость на них совсем небольшая: на Церере — около 500 м/с, а на астероиде километровых размеров — всего около 1 м/с. Вторая космическая скорость в 1,4 раза больше, так что, двигаясь со

скоростью автомобиля (около 100 км/ч), можно было бы улететь навсегда с астероида поперечником даже в 5 км. Можно ли после этого удивляться тому, что на астероидах нет атмосферы? Если даже из недр астероидов и выделялись какие-то газы, силы тяготения не могли удержать их молекулы, и они должны были навсегда рассеяться в межпланетном пространстве.

В 1973 г. отсутствие атмосфер на астероидах было подтверждено результатами измерений спектров астероидов в инфракрасном диапазоне. Спектры, полученные американским астрофизиком О. Гансеном для нескольких крупных астероидов в области длин волн около 12 мкм, свидетельствовали лишь о том, что астероиды слегка теплые.

Однако в спектре инфракрасного излучения Цереры была одна особенность: как раз около длины волны 12 мкм в пределах узкой полосы уверенно отмечался «подскок» излучения почти в два раза. Такие спектральные «полосы» излучения характерны для газов, и поэтому они наблюдаются у тех планет и их спутников, которые окружены атмосферой. Но ведь Церера слишком мала и не может удержать атмосферу!

Чтобы объяснить этот парадокс, Гансен выдвинул заманчивую гипотезу: на Церере происходит непрерывное испарение летучих веществ, которые должны входить (!) в состав вещества ее поверхности. Следует сказать, что среди разных оценок массы и диаметра Цереры можно подобрать такую пару значений этих величин, которая приведет к низкой оценке средней плотности ее вещества (около 1 г/см³), согласующейся с предположением, что Церера в значительной степени состоит из льда. Однако это предположение даже самому Гансену показалось столь невероятным, что он просто засомневался в своих расчетах, считая необходимым получить новые, более точные оценки массы и объема Цереры, прежде чем сделать окончательный вывод. Кроме того, предположению Гансена противоречили результаты поляриметрических наблюдений Цереры, согласно которым этот астероид, хотя и является очень темным объектом, не может иметь слишком рыхлых структур на поверхности, которые должны были бы образоваться при испарении льдов. Таким образом, инфракрасные спектральные полосы Цереры пока остаются загадкой.

Вследствие своих малых размеров астероиды имеют очень угловатую форму. Ничтожная сила тяжести на астероидах не в состоянии придать им форму шара, которая свойственна планетам и их большим спутникам. В последнем случае огромная сила тяжести сминает отдельные глыбы, утрамбовывая их. На Земле высокие горы у своей подошвы как бы расползаются. Прочность камня оказывается недостаточной, чтобы выдержать нагрузки во многие тонны на 1 см^2 , и камень у подножья горы, не дробясь, не раскалываясь, сжатый со всех сторон, словно «течет», только очень медленно.

На астероидах поперечником до 200—300 км из-за малого «веса» камня явление подобной «текучести» вовсе отсутствует, а на самых крупных астероидах оно происходит слишком медленно, да и то лишь в их недрах. На поверхности астероидов остаются без каких-либо изменений огромные горы и впадины, гораздо большие по своим размерам, чем на Земле и других планетах (средние отклонения в ту и другую сторону от уровня поверхности составляют около 10 км и более), что проявляется в результатах радиолокационных наблюдений астероидов (рис. 5).

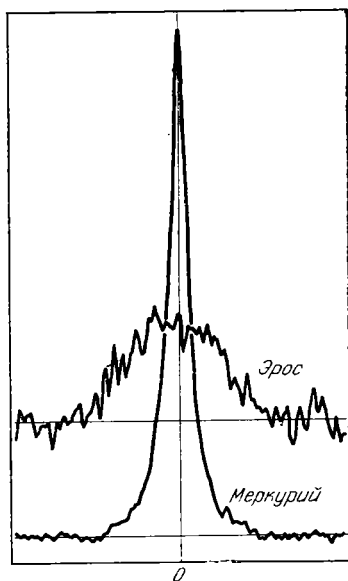


Рис. 5. Спектры радиоволн, отраженных от поверхности Эроса и Меркурия. Посылалась волна 3,8 см. Поверхность Меркурия отражает почти как зеркальная поверхность, потому что выровнена силами тяжести (в частности, кратеры на ней «заплыли»). На Эросе такого сглаживания произойти не могло.

Неправильная форма астероидов подтверждается также тем, что их блеск необычайно быстро падает с ростом угла фазы (см. сноску на стр. 11). Подобные изменения блеска Луны хорошо нам знакомы: она бывает очень яркой в полнолуние, затем светит все слабее, пока в новолуние не исчезает совсем. Но у Луны эти изменения происходят значительно медленнее, чем у астероидов, и поэтому вполне объясняются лишь с помощью уменьшения видимой с Земли доли освещенной Солнцем поверхности (тени от лунных гор и впадин оказывают слабое влияние на общую яркость Луны). Иначе обстоит дело с астероидами. Одним лишь изменением освещенной Солнцем поверхности астероида столь быстрые изменения их блеска объяснить нельзя. И основная причина (особенно для малых астероидов) такого характера изменения блеска заключается в неправильной форме астероидов, из-за которой одни участки освещенной их поверхности экранируются от солнечных лучей другими.

Неправильную форму у астероидов наблюдали и непосредственно в телескоп. Впервые это произошло в 1931 г., когда маленький астероид Эрос,двигающийся по очень экзотической орбите, о которой далее мы еще расскажем, подошел к Земле на необычайно малое расстояние (всего в 28 млн. км). Тогда в телескоп увидели, что этот астероид похож на «гантель» или неразрешенную двойную звезду с угловым расстоянием между компонентами около $0,18''$; было видно даже, что «гантель» вращается!

В январе 1975 г. Эрос подошел к Земле еще ближе — на расстояние 26 млн. км. Его наблюдали на большом отрезке орбиты, и это позволило увидеть Эрос буквально с разных сторон. Тщательный анализ результатов многочисленных наблюдений Эроса, проведенных на разных обсерваториях всего мира, привел к очень интересному открытию.

Эрос во время наблюдений сильно менял свой блеск — на $1,5^m$ (т. е. почти в четыре раза) с периодом в 2 ч с небольшим (рис. 6). Предположили, что эти изменения блеска обусловлены изменением видимого с Земли сечения вращающегося вокруг своей оси «гантелеобразного» Эроса и что именно в 4 раза отличаются его максимальное и минимальное сечения. В этом случае минимум блеска астероида должен был бы наблю-

даться в тот момент, когда Эрос обращен к нам своим острым концом. Однако все оказалось гораздо сложнее.

Во-первых, вопреки ожиданиям, последовательные максимумы и минимумы блеска имели разную форму и разную амплитуду. Анализ результатов наблюдений, проведенный с применением лабораторного моделирования формы Эроса, показал, что большое влияние на блеск Эроса должна оказывать игра света и тени на неровной поверхности астероида. В результате минимум блеска Эроса наблюдался как раз тогда, когда астероид был обращен к нам почти максимальным своим сечением! Причем период обращения Эроса оказался равным двум периодам колебания блеска — 5 ч 16 мин. Как выяснилось, этот астероид представляет собой удлиненное тело с соотношением длины к толщине приблизительно 1:2,5. Он вращается вокруг короткой оси против часовой стрелки, причем так, что ось почти лежит в плоскости его орбиты (Эрос путешествует по Солнечной системе как бы лежа на «боку»).

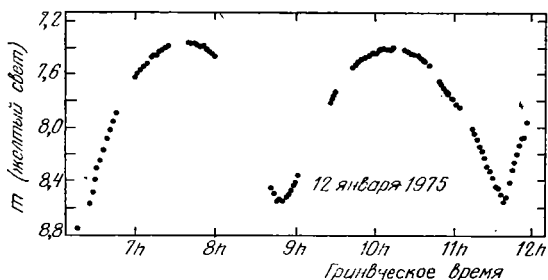


Рис. 6. Изменение блеска Эроса в период, когда амплитуда изменений была наибольшей. 2,5-часовой цикл соответствует половине периода вращения этого астероида вокруг собственной оси.

Колебания блеска, вызванные той же причиной (вращением вокруг собственных осей тел неправильной формы), наблюдались у многих астероидов. И что самое интересное, все они вращаются в одну сторону — против часовой стрелки. Установить это удалось лишь в последние годы с помощью чувствительной электронно-оптической техники наблюдений.

Земля и астероиды движутся в пространстве на разных орбитах вокруг Солнца и с разной скоростью.

И хотя движение их по орбите происходит в одном направлении, нам с Земли кажется, что астероиды перемещаются на небе среди звезд то вперед (справа налево, когда они обгоняют Землю), то назад (слева направо, когда Земля обгоняет их). Этот различный характер движения астероидов тоже влияет на изменение их блеска: когда астероиды движутся по небу слева направо (Земля обгоняет их), период изменения блеска оказывается немного короче.

Интересно, что период изменений блеска астероидов довольно короток и почти одинаков — с интервалом значений от 2—3 до 10—15 ч. Что же заставило их так быстро вращаться? В свое время была выдвинута гипотеза о том, что не очень большие астероиды неправильной формы могут приобрести вращение под действием потоков «солнечного ветра» (частиц, выбрасываемых Солнцем), «дующего» уже в течение миллиардов лет. Как ни слаб этот «ветер», а все же он должен передавать астероидам какой-то импульс количества движения, который вследствие неправильной формы астероида неравномерно распределяется по астероиду с разных сторон от его центра тяжести. В результате появляется неравная нулю сила, равнодействующая тех сил давления, которые оказывает «солнечный ветер» на каждый 1 см^2 поверхности астероида, и астероид начинает вращаться (сначала очень медленно, а потом все быстрее).

Расчеты показывают, что некоторые астероиды (очень неправильной формы) могут раскрутиться «солнечным ветром» так сильно, что могут даже быть разорваны центробежными силами вращения. Однако для более крупных астероидов это объяснение не подходит, и приходится предположить, что они приобрели вращение еще в период своего образования.

Но может быть, колебания блеска обусловлены не неправильной формой, а «пятнистостью» астероидов (если разные участки поверхности астероидов сложены разным веществом)? Конечно, «пятнистость» астероидов возможна, и на их поверхностях могут, вероятно, существовать светлые и более темные участки (разного вещества). Однако одного лишь предположения о «пятнистости» мало, и, как было показано, с помощью только «пятнистости» характер вращения астероидов объяснить не удается.

Даже у одного из крупнейших астероидов — Весты, изменения блеска связаны не с «пятнистостью», а с ее неправильной формой. В 1971 г. наблюдения Весты с помощью электронно-оптических преобразователей показали, что последующие максимумы и минимумы блеска этого астероида слегка отличаются по величине, и вращение Весты происходит с периодом, вдвое большим, чем предполагали ранее — 10 ч 41 мин. Американский астрофизик Р. Тейлор, изучив особенности кривых блеска этого астероида, предложил следующую модель: Веста представляет собой трехосный сфероид, один из диаметров которого на 15% длиннее двух других. Как раз у его южного полюса, вдоль длинной стороны, тянется уплощенная область, которая простирается не дальше 45-го градуса широты и которую не видно со стороны северного полушария Весты. Эта область, полагает Тейлор, может быть огромным кратером ударного происхождения (диаметром чуть ли не в 400 км!).

Из чего состоят астероиды? Давно было замечено, что свет астероидов имеет желтоватый оттенок, аналогично свету Луны и Меркурия.

Поскольку астероиды светят отраженным солнечным светом, их цвет, в частности, обусловлен отражательными свойствами самой поверхности астероидов. Поэтому и возникла идея определить, какими веществами она сложена, сравнивая цвет астероидов с цветом земных предметов и метеоритов. Одно из первых таких исследований в нашей стране провел в 30-х годах советский исследователь метеоритов Е. Л. Кринов. Он получил, что многие метеориты имеют цвет, сходный с цветом тех или иных астероидов. Большой прогресс в изучении свойств астероидов был достигнут в конце 60-х годов, когда группа американских ученых занялась поляризметрическими исследованиями. Сравнивая поляризацию света⁸, отраженного от различных земных ве-

⁸ Явление поляризации заключается в упорядочении электромагнитных полей световых волн в силу каких-либо причин. Например, при отражении света от любой поверхности происходит частичная поляризация. При этом степень поляризации света зависит от угла, под которым свет падает на отражающую поверхность, от того, чем сложена эта поверхность, а также от свойств кристаллов, внутрь которых свет проникает. Из-за неровностей поверхности и наличия разного рода обломков на ней свет может испытать многократные отражения, и при каждом отражении степень его поляризации все больше возрастает.

шеств, лунного грунта и метеоритов, они получили, что между отражательной способностью (альбедо) материалов и характером поляризации света, отраженного от этих материалов, существует определенная зависимость.

Частично поляризованным оказался и свет, идущий к нам от астероидов. Анализ его позволил ученым сделать важные выводы о характере астероидной поверхности (рис. 7).

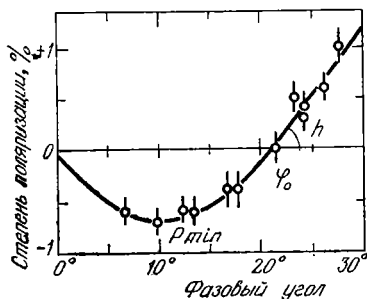


Рис. 7. Изменение степени поляризации света, отраженного от астероида Эвномия, с ростом фазового угла. Положительные и отрицательные значения отличаются направлением преимущественной ориентации колебаний электромагнитных световых волн. Параметры кривой характеризуют вещество, слагающее поверхность Эвномия: P_{min} — физическую природу вещества, φ_0 — структуру поверхности, h — альбедо. Значения этих параметров у Эвномии показывают, что ее поверхность сложена обломками светлого каменитого вещества, похожего на хондриты (разновидность метеоритов), и покрыта тонким слоем пыли.

Большой ряд поляриметрических наблюдений астероидов был организован в США Т. Герельсом. Оказалось, что по характеру поверхности астероиды распадаются на несколько групп (рис. 8). Наиболее многочисленной группой с очень сходными между собой свойствами оказались астероиды, поляризация света которых сходна с поляризацией света, отраженного от земных каменитых веществ светлой окраски, состоящих в основном из различных силикатов. В эту группу астероидов попала Юнона.

Другая группа оказалась состоящей из астероидов с темной, плохо отражающей свет поверхностью. Их вещество похоже на темные базальтические стекла или брекчии (обломочные породы) образцов лунного грунта, а также на темную разновидность метеоритов и на вещество поверхности спутника Марса — Фобоса. Среди этих темных астероидов оказалась Церера.

Астероидов с промежуточными характеристиками поверхности мало. Так же мало и астероидов с экстремальными характеристиками (например, более темных и более светлых).

Поляриметрический метод позволил определить точные размеры астероидов, так как учитывал их истин-

ную (а не среднюю) отражательную способность (альбедо). Прежде всего были уточнены размеры первых четырех астероидов. Оказалось, что диаметр Цереры слегка превышает 1000 км, диаметр Паллады — около 600 км, Юноны — 240 км, Весты — 525 км. Когда произвели пересчеты размеров и других исследованных поляриметрическим методом астероидов, то оказалось, что на право называться крупнейшими могут претендовать не только эти, а еще по крайней мере шесть астероидов, оказавшихся даже крупнее Юноны. Все они имеют низкую отражательную способность и, несмотря на большие размеры, дают мало света. Поэтому когда поперечники астероидов оценивали по их видимому блеску,

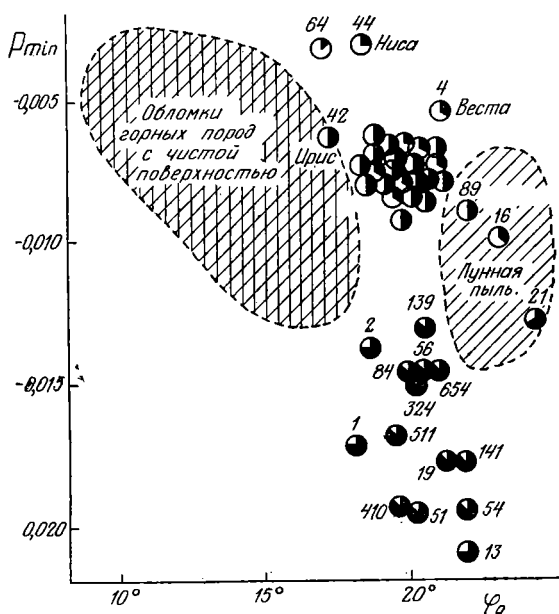


Рис. 8. Соотношение между P_{\min} и φ_0 для астероидов. Указаны номера некоторых из них. Не заштрихованная часть кружков — доля отражаемого астероидом света (альбедо). Ни одного астероида нет в области значений, характерных для обломков горных пород с очищенной от пыли поверхностью, и лишь несколько астероидов попадают в область значений, характерных для лунной пыли (но они сложены иным веществом — с большой примесью металлов, так что сходство с лунной пылью случайно).

размеры этих шести получились сильно занижены. В действительности, поперечник Гигеи (10-й астероид) — 400, Интерамнии (704-й) — 340, Давиды (511-й) — 290, Психеи (16-й) — 250 км, а Бамберги (324-й) и Фортуны (19-й) — 240 км (такой же, как и Юноны).

Фортуна — самый темный объект Солнечной системы. По количеству отражаемого света с Фортуной может соперничать даже раздробленный черный уголь.

Самыми светлыми объектами как среди астероидов, так и среди вообще всех тел Солнечной системы оказались Ангелина (64-й астероид), отражающая почти половину света, и Лиза (44-й), немного уступающая Ангелине. Чуть темнее Веста, отражательная способность которой приблизительно в 1,5—2 раза хуже, чем у Ангелины. Из-за большой отражательной способности Веста, находясь на одинаковом расстоянии с Церерой, кажется на 20% ярче ее (при одинаковых условиях освещенности и наблюдений), а Палладу превосходит по блеску в два раза.

Поляриметрические результаты определения истинных альбедо, а следовательно, и более верных размеров астероидов, подтверждаются и другим методом, который возник тоже в самые последние годы. Речь идет о радиометрическом методе, который был разработан и впервые применен к астероидам американскими учеными Д. Алленом и Д. Матсоном в 1970 г. Он основан на измерении теплового (инфракрасного) излучения астероида (обычно в диапазоне длин волн 10—20 мкм). Большие темные астероиды и маленькие светлые из-за разной отражательной способности могут иметь одинаковую звездную величину в видимой области света. Что же касается их яркости в инфракрасном диапазоне, то она у крупных тел больше (из-за больших размеров излучающей поверхности и из-за более высокой температуры темных тел, лучше поглощающих солнечное излучение). Отношение величин яркости астероида в видимом и инфракрасном диапазонах как раз и характеризует его отражательную способность (а также и его размеры).

Поляриметрические наблюдения показали также, что поляризация света астероидов значительно больше, чем та, которая могла возникнуть при однократном отражении света от их поверхности. С помощью эксперимен-

тов, проведенных в лабораториях на Земле, было выявлено, что такая же степень поляризации света, как и у астероидов, получается при отражении от поверхности, покрытой пылью и обломками камней разной величины.

Как раз в период проведения исследования стало ясно, что такого рода «пыльная» поверхность в условиях космического вакуума будет вести себя совсем иначе. Этот вывод был сделан на основании анализа свойств лунного грунта. По пока еще не вполне понятным причинам пыль на Луне ведет себя иначе, чем земная: из нее образуются необычайно рыхлые структуры, внутри которых луч света «мечется» как в лабиринте, испытывая многократные отражения, причем степень его поляризации становится очень большой, намного больше, чем степень поляризации света, отраженного от земной пыли или от астероидов.

Дальнейшие исследования показали, что поверхность астероидов должна быть, судя по поляризации, сложена из сравнительно крупных камней, покрытых очень тонким слоем пыли. Как мы увидим в дальнейшем, это согласуется с представлениями о характере поверхности астероидов, полученными на основании совсем иных методов исследования.

С 1970 г. в США начали проводить спектральные наблюдения астероидов, которые охватывали как видимую часть спектра, так и прилегающий к ней инфракрасный диапазон. Были получены и проанализированы спектры излучения десятков астероидов (рис. 9). Результаты, как и при других вышеописанных методах, сравнивались с результатами лабораторных исследований земных пород, лунного и метеоритного вещества, а также разных чистых минералов. Осо-

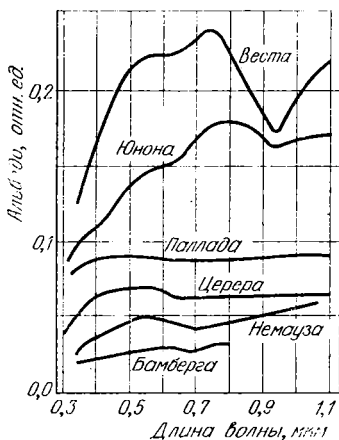


Рис. 9. Различие в альбедо на разных длинах волн у шести астероидов.

бенно большую работу по интерпретации полученных данных провел американский астрофизик К. Чепмен.

В настоящее время по разным особенностям спектров, в частности по полосам поглощения, характерным для тех или иных минералов и их смесей, а также по степени поглощения света в пределах этих спектральных полос удалось определить для многих астероидов характер минералов, слагающих вещество их поверхности и, например, процент содержания железа. Оказывается, большинство астероидов состоит из железомagneзиальных силикатов, как и большинство метеоритов (правда, лишь у немногих астероидов состав этих силикатов такой же).

К удивлению исследователей, было обнаружено, что некоторые астероиды отражают свет и поляризуют его точно так же, как металлы. Таковы, например, астероиды Психея (16-й астероид), Лютетия (21-й) и Джулия (89-й). О существовании «металлических» астероидов свидетельствуют и железные метеориты, падающие на Землю. Они состоят из «раствора» никеля в железе с небольшими примесями некоторых других веществ. Таким был, например, широко известный Сихотэ-Алинский метеорит, упавший 12 февраля 1947 г. в уссурийской тайге Приморского края. Металлическая глыба массой около 100 т влетела в атмосферу Земли со скоростью порядка 15 км/с и, рассыпавшись в атмосфере из-за огромного ее сопротивления, усеяла железными осколками несколько квадратных километров земной поверхности.

Это показывает, что в прошлом астероиды были нагреты до высоких температур, что привело к образованию металлических ядер, часть которых теперь обнажилась и частично раздробилась. Правда, следует заметить, что не вполне ясен источник тепла, необходимый для такого переплавления. Расчеты показывают, что из малых тел тепло очень быстро ускользает в космическое пространство. Поэтому такой источник должен быть очень мощным. Возможно, некоторую роль здесь сыграл распад радиоактивных элементов. Однако такие элементы, как уран, торий и радиоактивный изотоп калия, видимо, обеспечившие нагрев и переплавление вещества больших планет (Меркурия, Венеры, Земли и Марса), а также Луны, распадаются слишком медлен-

но и не могут поднять температуру мелких астероидов. Следовательно, в этом случае необходим радиоактивный изотоп с достаточно малым периодом полураспада, и к тому же его должно быть достаточно много (для обеспечения большого тепловыделения в единицу времени). Таким изотопом, по предположению ученых, может быть радиоактивный изотоп алюминия ^{26}Al . По расчетам, однако, получается, что этого изотопа в период образования астероидов было относительно мало.

Другим таким источником нагрева астероидов может быть Солнце (конечно, не с помощью солнечных лучей, а, например, под влиянием переменных электромагнитных полей, создаваемых в межпланетном пространстве «солнечным ветром»). Современное Солнце, очевидно, не дает такого нагрева. Но в прошлом, на начальной стадии своего существования, Солнце, как предполагают, было намного горячее, чем сейчас, и нагрев астероидов мог быть очень сильным.

Если построить зависимость числа астероидов от их размеров, то получится, что количество астероидов быстро убывает с увеличением их размеров (что в общем-то понятно), но в области значений их размеров 50—100 км эта обнаруженная зависимость меняет свой характер (см. ниже). Количество астероидов таких размеров почему-то больше, чем это должно быть, если пользоваться зависимостью, характерной для более мелких астероидов. Пытаясь объяснить это, К. Чепмен предположил, что крупные астероиды подверглись в прошлом полному или частичному переплавлению, после чего внутри их образовались железоникелевые ядра, а «всплывшие» силикаты образовали оболочку. Если астероиды сталкивались и дробились, то такая оболочка должна легко разрушиться. Когда же обнажилось прочное металлическое ядро, дробление, а следовательно, и уменьшение размеров замедлилось, что и привело к обнаруженному эффекту.

Температура астероидов. Как бы ни были нагреты астероиды в далеком прошлом, они давно остыли. Теперь они — холодные безжизненные глыбы, летающие в межпланетном пространстве, и солнечные лучи не в состоянии их нагреть.

Приблизленно вычислить среднюю температуру асте-

роида нетрудно⁹. Сравним потоки тепла, падающие на астероид и на Землю. Приняв Солнце за точечный источник, мы получим, что потоки тепла обратно пропорциональны квадратам расстояний Земли и астероида от Солнца. Нагретые Земля и астероид излучают в пространство тепловую энергию. Поэтому температура каждого тела устанавливается такая, что теряемое количество тепла на излучение равно количеству тепла, получаемого телом от Солнца. Далее, используя закон Стефана — Больцмана, можно получить следующее соотношение: $T_a^4 / T_z^4 = a_z^2 / a_a^2$, где T — абсолютная температура, выраженная в градусах шкалы Кельвина, а a — среднее расстояние (большая полуось орбиты) рассматриваемого тела в астрономических единицах.

Средняя температура Земли известна. Она составляет 288 К (15°C). Подставляя ее в полученное соотношение и извлекая корень четвертой степени из обеих частей равенства, после небольших преобразований мы получим: $T_a(\text{К}) = 288 \sqrt{a_a}$.

У Цереры, например, температура (вычисленная, правда, по более точной формуле) составляет 165 К (т. е. — 108°C). Приблизительно при такой температуре и при нормальном атмосферном давлении на Земле замерзают аммиак, спирт, эфир.

Недавно Церера была добавлена к списку объектов Солнечной системы, которые можно изучать с помощью радиотелескопов. Используя большой радиоинтерферометр радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк (США), Ф. Бриггс определил тепловое излучение от Цереры на длине волны 3,7 см. Церера оказалась очень слабым радиоисточником с потоком 0,0024 Ян¹⁰. В предположении, что диаметр Цереры 1025 км, Бриггс по радиояркости определил абсолютную температуру Цереры, которая оказалась равной 160 ± 55 К, что согласуется с приведенной выше оценкой. Это подтверж-

⁹ При этом мы пренебрежем различием особенностей поглощения и отражения солнечного излучения астероидами и Землей, а также различиями их собственного излучения (это не приводит к большим ошибкам).

¹⁰ Астрономы уже давно выражают интенсивность излучения космических радиоисточников в единицах потока, равных 10^{-26} Вт·(м²·Гц)⁻¹. По рекомендации Международного астрономического союза, эта единица теперь получила обозначение *янский* (1 Ян) в честь американского радионинженера К. Янского, который в 1931—1932 гг. обнаружил радиоизлучение Млечного Пути.

дает, что радиоизлучение Цереры имеет тепловое происхождение.

У Весты, сложенной в отличие от Цереры светлым, хорошо отражающим веществом, температура поверхности ниже и составляет лишь 133 К, так как у этого астероида на нагрев идет меньшая часть солнечной энергии, достигающей его поверхности. На астероидах, движущихся дальше от Солнца, — еще холоднее. Лишь у немногих астероидов, движущихся по необычным орбитам, которые могут приближаться к Солнцу, проникая даже внутрь орбиты Меркурия, поверхность нагревается до нескольких сот градусов Кельвина, и, будучи раскаленной, начинает даже слабо светиться. Однако это продолжается недолго, так как астероиды, следуя по своим орбитам, опять удаляются от Солнца, быстро остывая.

Образование кратеров. Миллиарды лет кружатся астероиды вокруг Солнца и сталкиваются друг с другом, а потом и с образовавшимися осколками. Скорости столкновения в поясе астероидов велики — в среднем около 5 км/с, и потому явления, происходящие при этих столкновениях, грандиозны. При указанной скорости каждый грамм астероидного вещества несет кинетическую энергию порядка 10^{11} эрг (около 12 кДж, или 3 ккал). Когда даже небольшой астероид «врезается» в поверхность своего крупного собрата, вся эта энергия мгновенно освобождается, и происходит гигантский взрыв. Соприкоснувшиеся в момент столкновения слои астероидов подвергаются столь сильному сжатию, что частично обращаются в газ, частично плавятся. От места удара во все стороны расходятся ударные волны сжатия и разрежения, которые давят, крошат и встряхивают вещество. Огромным фонтаном осколки и пыль взмываются над астероидом. На поверхности его остается кратер, а под кратером — обширная зона раздробленных пород.

Изучение метеоритных кратеров на Земле, взрывные и ударные эксперименты (в частности, «бомбардировка» мишеней из разного материала сверхскоростными шариками), проведенные в СССР и за рубежом, позволяют в настоящее время сделать ряд выводов о процессах при кратерообразовании на астероидах. Когда, в частности, астероид падает на поверхность, сложенную крупными монолитными блоками каменистого вещества

(например, на свежую поверхность раскола, образовавшуюся в результате дробления при мощном ударе), скорости разлетающихся осколков должны составлять сотни метров в секунду. Если же падение происходит на поверхности астероида, сложенной веществом, раздробленным многочисленными предыдущими встречами с другими астероидами, осколки должны разлетаться со значительно меньшими скоростями (десятки метров в секунду).

Приведенные выше оценки — это лишь средние скорости. Среди осколков всегда есть и более быстрые, летящие со скоростями, даже превышающими скорость упавшего астероида, и более медленные.

Хотя массы астероидов невелики, они все же способны удержать часть осколков, разлетающихся со скоростями меньше второй космической скорости, составляющей на Церере около 600 м/с, на Юноне — более 100 м/с. Даже малютки поперечником в 10 км могут удерживать осколки, имеющие скорость вплоть до 6 м/с.

Американский астрофизик Д. Голт, анализируя экспериментальные данные о распределении скоростей разлетающихся осколков, пришел к заключению, что для астероида поперечником в 200 км около 85% взметнувшихся над ним осколков не в состоянии преодолеть притяжение астероида и вновь падают на его поверхность. Астероиды поперечником в 100 км удерживают около половины своих осколков. Правда, осколки, выброшенные из кратера, могут улететь от кратера на большие расстояния (залетая на обратную сторону астероида) или даже могут начать двигаться по околоастероидным орбитам. Таким образом, возникновение кратера на астероиде должно сопровождаться созданием над всем астероидом кратковременного облачка камней и пыли — его каменной «атмосферы». Через некоторое время осколки и пыль оседают тонким слоем на поверхность астероида.

Следует заметить, что вещество столкнувшегося с Церерой астероида будет присутствовать в этом «слое» в виде совершенно неощутимой примеси, так как объем выбрасываемого из кратера вещества в сотни и в тысячи раз больше объема «упавшего» астероида.

Пока еще мы не располагаем ни одной фотографией астероида, сделанной на малом расстоянии от его по-

верхности с помощью какого-нибудь космического аппарата. Но может ли чем-нибудь существенным отличаться внешний вид астероидов от спутников Марса — Фобоса и Деймоса? Серия фотографий, сделанных с космических аппаратов, посланных на Марс, показала, что даже эти крошечные тела (размером около 15 и 6 км), кружащиеся около Марса вдали от наиболее густо населенных частей пояса астероидов, подверглись бомбардировке астероидными осколками, и все сплошь изрыты кратерами, крупными и мелкими, поперечниками от нескольких километров до нескольких десятков метров. Вероятно, есть на них и такие мелкие, разглядеть которые на полученных фотографиях не удалось. Астероиды, залетающие хотя бы на непродолжительное время в плотные части пояса астероидов, могут отличаться от Фобоса и Деймоса разве лишь тем, что будут усеяны кратерами еще сильнее.

При дроблении астероидов в столкновениях образуются вместе с крупными и мелкими обломками целые «тучи» пыли. Поэтому нередко предполагали, что пояс астероидов буквально насыщен ею. Однако, как выяснилось, в поясе астероидов пыли не больше, чем во внутренних районах Солнечной системы, а скорее даже меньше. Таким образом, пояс астероидов должен непрерывно очищаться от пыли. Происходит это так.

Под действием светового давления солнечных лучей мельчайшая астероидная пыль (пылинки размером в несколько микрометров) по гиперболическим орбитам должна покидать Солнечную систему, а более крупные частицы медленно тормозятся и переходят на все меньшие орбиты относительно Солнца. Многие из них по пути оседают на Марс, Землю, Венеру и Меркурий, остальные «гибнут» на Солнце. Астероидная компонента в межпланетной пыли составляет около 2% ($\sim 2 \cdot 10^{13}$ т).

Структура пояса астероидов

Движение типичных астероидов. Все открытые до сих пор астероиды обладают прямым движением: они движутся вокруг Солнца в ту же сторону, что и большие планеты (против часовой стрелки). Среднее арифметическое значение больших полуосей орбит пер-

вых 807 астероидов равно 2,805 а. е. Оно почти точно совпадает со значением, предсказанным правилом Тициуса — Боде. Но у многих астероидов размеры орбит существенно отличаются от средних. Кроме того, астероиды движутся не по круговым, а по эллиптическим орбитам, и Солнце расположено не в центре, а в одном из фокусов этих орбит. Эксцентриситеты подавляющего большинства орбит, правда, невелики — от 0 до 0,2 и редко превышают 0,4, но даже при очень малом эксцентриситете (всего в 0,1) изменение гелиоцентрического расстояния астероида во время его движения по орбите достигает 0,3 а. е., а при эксцентриситете в 0,4 превышает 2 а. е. Поэтому астероиды движутся в пределах широкого кольца, границы которого несколько условно проводят на гелиоцентрических расстояниях в 2,2 и 3,2 а. е. За пределы пояса выходят немногие астероиды, о которых будет сказано несколько дальше.

Пояс астероидов не имеет вид плоского кольца. За исключением всего лишь нескольких астероидов, большинство их, двигаясь вокруг Солнца, отклоняется от плоскости эклиптики то в одну, то в другую сторону из-за наклона их орбит к плоскости эклиптики. Наклоны эти обычно невелики — от 5 до 15°. Но даже при угле наклона в 10° астероид может отклониться от плоскости эклиптики на 0,5 а. е., а при угле в 30° он уходит от эклиптики на 1,5 а. е. Итак, пояс астероидов можно представить себе в виде огромного тора, заполненного астероидами больших и малых размеров, камнями и пылью. Все они движутся со скоростями порядка 20 км/с в одну и ту же сторону под слегка различным направлением, что и приводит к столкновениям, нередко катастрофическим. Объем пространства, занятого поясом астероидов, огромен — около $1,6 \cdot 10^{26}$ км³. Для сравнения укажем, что объем Земли составляет всего 10^{12} км³.

Чтобы понять, как сформировался пояс астероидов, нужно прежде всего разобраться в его структуре и попытаться объяснить все его особенности. Поэтому-то астрономы так много внимания уделяют характеру движения астероидов, особенно в последние годы, когда уровень развития вычислительной техники дает возможность анализировать движения не только многих отдельных астероидов, но и целой их совокупности. Серьезный вклад в анализ структуры пояса астероидов сделал

Г. А. Чеботарев, в течение многих лет руководивший Институтом теоретической астрономии.

Прежде чем перейти к дальнейшему изложению, необходимо отметить следующее. При анализе структуры пояса астероидов важной характеристикой движущихся в нем тел является их «среднее движение» — величина, показывающая, на какой угол, если смотреть с Солнца, в среднем за сутки смещается астероид, двигаясь по своей орбите. В действительности, суточное движение каждого астероида меняется в течение каждого оборота вокруг Солнца — от максимального значения, когда астероид движется в районе перигелия своей орбиты, до минимального — при медленном движении в районе афелия¹¹. Среднее движение n связано с периодом обращения t простым соотношением $n = 360^\circ/t$, где t выражено в сутках (среднее движение выражают в угловых градусах, а чаще — в угловых секундах). Среднее движение Цереры, например, равно $771''$.

У подавляющего большинства астероидов (98%) среднее движение заключено в пределах $400\text{--}1200''$, и именно эти астероиды входят в состав «основного» пояса астероидов (периоды их обращения имеют интервал значений от 3 до 9 лет). Г. А. Чеботарев разделил все такие астероиды на две группы — с наклонами орбит меньше или больше 8° . Первую группу он назвал «плоской подсистемой», потому что она состоит из астероидов с орбитами, расположенными вблизи плоскости эклиптики (в нее вошло 48% астероидов). Представители плоской подсистемы обладают средними движениями от 400 до $1200''$, а это означает, что плоская подсистема простирается на всю ширину пояса астероидов. Среди членов этой подсистемы находятся несколько астероидов, которые никогда не выходят из плоскости эклиптики (например, Элна, 468-й астероид; Ламберта, 846-й; Эренбургия, 1383-й, получившая название в честь И. Г. Эренбурга) и т. д. Из 10 крупных астероидов в эту подсистему входят 4 — Веста, Гигея, Психея и Фортуна.

Вторая подсистема, охватывающая 50% астероидов, названа «сферической». В ее составе несколько астероидов с очень большим наклоном их орбит к плоскости эклиптики (например, Гидальго (944-й), у которого это наклонение достигает 43°). В этой подсистеме ока-

¹¹ Перигелий и афелий — соответственно ближайшая и наиболее удаленная от Солнца точки орбит небесных тел.

зались шесть остальных крупных астероидов — Церера, Паллада, Юнона, Бамберга, Давида и Интерамния. Астероиды сферической подсистемы имеют средние движения от 610 до $980''$

По своему среднему движению все астероиды разделяют на пять групп (рис. 10). Многочисленные по составу эти группы включают в себя астероиды, движущиеся соответственно преимущественно во внешней (I), центральной (II) и внутренней (III) зонах пояса астероидов. Их отличительной особенностью является небольшой эксцентриситет их орбит. Вероятно, лишь при этом условии и могут «выжить» астероиды в зоне I (на орбитах больших размеров), так как при больших эксцентриситетах орбит эти астероиды могли бы сблизиться с массивным Юпитером, а тогда его мощное притяжение заставило бы их уйти из этой зоны. В центральной зоне, как оказалось, преобладают астероиды сферической подсистемы, а в зоне III 75% астероидов, наоборот, являются членами плоской подсистемы.

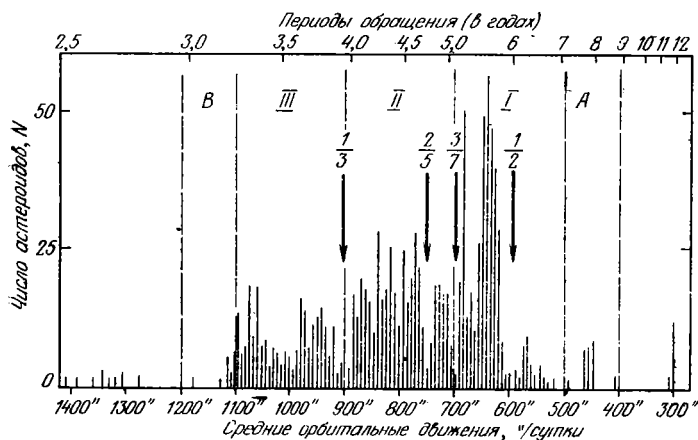


Рис. 10. Распределение астероидов по среднему суточному движению и периоду обращения. Штриховыми линиями показаны границы зон, установленных Г. А. Чеботаревым. Стрелки указывают «провалы Кирквуда», соответствующие резонансам $1:3$, $2:5$, $3:7$ и $1:2$ с Юпитером.

Окраины пояса астероидов — это малонаселенные зоны, названные Чеботаревым зонами А и В. Зона А находится у внешней окраины пояса. Там движутся

медленные астероиды группы Гильды со средним движением $440-260''$ и Троянцы со средним движением $300''$ (более подробно о них будет сказано ниже). Астероидов с промежуточными значениями среднего движения там практически нет.

Зона В находится у внутреннего края пояса астероидов. Там движутся быстрые астероиды со средним движением $1100-1200''$ и с периодами обращения около трех лет. Часть их близко подходит к Марсу.

Возмущения со стороны планет. Орбиты, по которым движутся астероиды, непрерывно меняются вследствие того, что астероиды все время испытывают довольно ощутимое притяжение со стороны всех планет, но главным образом со стороны Юпитера. Поэтому их путь в пространстве представляет собой, вообще говоря, незамкнутые витки, укладываемые рядом друг с другом, а иногда вдруг и довольно резко отклоняющиеся друг от друга.

Планеты «возмущают» движение не только астероидов, но и друг друга. Однако возмущения, испытываемые самими планетами, малы и не меняют структуры Солнечной системы и, следовательно, не могут привести к столкновению планет друг с другом. Иначе обстоит дело с астероидами. Как мы видели, их орбиты по сравнению с орбитами планет обладают большим эксцентриситетом. Поэтому некоторые астероиды могут приближаться к Юпитеру и Марсу, что вызывает порой большие изменения орбит таких астероидов в течение довольно короткого времени.

Под действием гравитационного воздействия планет астероиды отклоняются со своего пути то в одну, то в другую сторону, и чем дальше, тем больше эти отклонения. Чаще всего влияние оказывает постоянное притяжение со стороны планет, находящихся далеко, но действующих постоянно, и непрерывно «тянущих» астероид к себе.

Астрономы различают вековые и периодические (осциллирующие) возмущения астероидов. Вековые возмущения называются так потому, что они длятся веками. Большие полуоси орбит при этом остаются почти неизменными, но меняются форма орбит и их ориентация в пространстве. Планеты земной группы — Меркурий, Венера, Земля и Марс, расположенные внутри пояса астероидов, фактически увеличивают притяжение

астероидов к Солнцу, так как силы их притяжения направлены к центру Солнечной системы, что ускоряет движение астероида. Планеты-гиганты, расположенные за поясом астероидов, напротив, уменьшают притяжение астероидов к Солнцу, стремясь замедлить их движение; тесные сближения с планетами (или даже друг с другом, если встречаются крупные астероиды) могут резко изменить все элементы орбиты.

Тонкая структура. В 1866 г. американский астроном Д. Кирквуд, работавший на Смитсоновской обсерватории, обратил внимание на то, что в поясе астероидов совершенно отсутствуют астероиды с некоторыми определенными значениями среднего движения. Если построить распределение астероидов по среднему движению (см. рис. 10), то в этом распределении окажутся пробелы, которые теперь называются «провалами Кирквуда», шириной в $10''$ и более.

Следует, однако, подчеркнуть, что «провалы Кирквуда» — это пробелы лишь в распределении *средних* движений. Они существуют также в распределении периодов обращения астероидов, и также в распределении больших полуосей a орбит астероидов, которые связаны с периодом обращения t третьим законом Кеплера $a^{3/2} = t$. Но если построить распределение *мгновенных* гелиоцентрических расстояний астероидов, то никаких пробелов обнаружить не удастся. Иными словами, если бы удалось сделать мгновенный снимок пояса астероидов, то никаких «провалов Кирквуда», как зон с малой пространственной плотностью астероидов, на таком снимке увидеть бы не удалось: из-за наличия эксцентриситета и наклонов орбит к эклиптике астероиды всегда находятся в «чужой» зоне. Орбиты малых планет настолько пересекают друг друга и так запутаны между собой, что, если бы они представляли собой волоочные кольца, то, подняв одно из них, мы подняли бы вместе с ним и все остальные, а также орбиты Марса и Юпитера.

Было сделано много попыток объяснить происхождение «провалов» (на основании небесной механики). Пока все они неудовлетворительны. Однако неясен лишь механизм возникновения «провалов», а по поводу причины мнение едино — Юпитер. В самом деле, не хватает, оказывается, как раз тех астероидов, периоды обращения которых вокруг Солнца кратны периоду

обращения Юпитера. Отсутствуют, например, астероиды со средним движением около $600''$ (это самый широкий «провал Кирквуда»), которые имели бы период обращения 6 лет (ровно в 2 раза меньше, чем Юпитер), или, как говорят астрономы, двигались бы в резонансе с Юпитером 1 : 2. Другой «провал» виден на рис. 10 около $900''$. Он означает, что отсутствуют астероиды с периодом обращения 4 года (движущиеся в резонансе с Юпитером 1 : 3). Недостает астероидов в резонансе 1 : 4 (с периодом обращения 3 года), о чем свидетельствует «провал» около $1150''$ и т. д.

Еще более удивительным является то, что, «уничтожив» астероиды, двигавшиеся в резонансе с ним (а может, не допустив их возникновения) в плотных частях пояса астероидов, Юпитер «ухитрился» создать сгущения (хотя и немногочисленные) очень медленных астероидов, движущихся с периодами от 7 до 12 лет (в резонансе с ним 1 : 1, 3 : 4, 2 : 3), в разреженных частях пояса астероидов.

В резонансе 2 : 3 движутся 22 известных астероида упомянутой выше группы Гильды. Их почти круговые орбиты очень больших размеров (со значениями больших полуосей от 3,9 до 4,2 а. е.), мало наклоненные к плоскости эклиптики, сближаются с орбитой Юпитера до нескольких десятых астрономической единицы. Поэтому и сами эти астероиды могут приближаться к орбите Юпитера. Но благодаря соизмеримости с движением Юпитера им всегда удается избежать тесных сближений с этим гигантом: Юпитер никогда не оказывается на том участке орбиты, к которому подходит астероид. Поэтому они не испытывают слишком сильных возмущений и сохраняют свои орбиты почти неизменными.

Троянцы. Задолго до открытия первого астероида, еще во второй половине XVIII в., знаменитый Лагранж пытался решить задачу трех тел. Дело в том, что с помощью законов Кеплера можно описать лишь относительное движение двух тел, притягивающих друг друга по закону Ньютона. В этом случае влиянием прочих тел пренебрегается. Но это не всегда возможно: например, при рассмотрении движения комет около Земли приходилось как-то учитывать одновременное влияние на них как Солнца, так и самой Земли. Анализ движе-

ния трех тел, притягивающих друг друга, и составляет предмет задачи трех тел.

Решить ее в общем виде Лагранж не смог, но он нашел, что существует пять точек, в которых все силы, действующие на тела, уравниваются (как уравнивается центробежная сила центростремительной при движении тела по окружности). Эти пять точек называются теперь точками Лагранжа.

Положение тела в двух из этих пяти точек может оказаться устойчивым по отношению к возмущениям, и тело, выведенное из этих точек, вернется назад. Эти точки находятся на орбите планеты и образуют с планетой и Солнцем равносторонние треугольники. Равновесие наступает при определенном соотношении масс тела и планеты. Но сам Лагранж не верил в возможность осуществления такого случая в природе, так как «попасть» в эти точки практически невозможно: расчеты показывали, что для этого требовалось очень большое время.

В 1904 г. был, однако, открыт 588-й астероид — Ахиллес, двигавшийся вблизи одной из лагранжевых точек Юпитера. Недавно стало известно уже более 700 таких астероидов. Все они получили названия в честь героев Троянской войны («греки» и «троянцы») и потому называются Троянцами и движутся в окрестностях лагранжевых точек на орбите Юпитера.

Астероиды-«греки» опережают Юпитер примерно на 60° , а астероиды-«троянцы» следуют на таком же угловом расстоянии за ним. Средняя скорость обеих групп Троянцев и самого Юпитера почти одинакова, и потому их взаимное положение не меняется. Это значит, что Троянцы движутся в соизмеримости 1 : 1 с Юпитером. Их среднее движение — около $300''$. Но, по существу, они не испытывают влияния Юпитера, так как «спрятались» от него в лагранжевы точки.

Более тщательный анализ движения Троянцев показывает, что они словно «рой пчел» кружатся около лагранжевых точек. Взаимное расположение «троянцев» и «греков» в их группах непрерывно меняется. Под действием планетных возмущений колеблются, хотя и незначительно, периоды их обращений около Солнца и другие элементы их орбит. В настоящее время эти колебания незначительны, но, как показывают расчеты,

в отдаленном будущем Троянцы все же могут покинуть лагранжевы точки.

Первые Троянцы были крупными астероидами. Их диаметры в среднем порядка 150 км. Они долго оставались неоткрытыми, так как движутся очень далеко от Земли и представляют собой объекты со звездной величиной 12—14^m. Недавно на основании Паломар-Лейденского обозрения было показано, что Троянцы весьма многочисленны. Вблизи одной из двух лагранжевых точек движется около 700 слабых Троянцев (до 20,6^m). Вероятно, их также много и в окрестностях другой точки. Заметим, что Троянцы — это последние астероиды на внешней окраине пояса. За ними астероиды нам не известны.

Семейства. В 1876 г., когда было известно всего около 150 астероидов, Д. Кирквуд попытался разобраться в «хаосе» астероидных орбит и нашел около 10 групп астероидов, каждая из которых состояла всего из 2—3 членов, двигавшихся по очень сходным орбитам. Среди них оказались, например, Юнона и Клода (97-й астероид). Попытки Кирквуда продолжали и другие астрономы.

Казалось, что такие группы можно рассматривать как связанные общностью своего происхождения. Но уже в 1918—1919 гг. японский астроном В. Хираяма указывал, что сходство орбит астероидов не означает, что эти астероиды в прошлом были частями одного и того же более крупного тела и что при огромном числе астероидов совсем не исключено их случайное объединение в группы. Кроме того, сравнивались современные орбиты, а ведь воздействия планет, хотя и слабы, но могли постепенно изменить их до неузнаваемости. Поэтому, используя методику Кирквуда, если и можно обнаружить реальные группы «родственников», то лишь образовавшихся совсем недавно, скажем, 1000 лет тому назад.

Возник вопрос: можно ли все-таки выявить группы астероидов, связанных *давним* «родством»? Хираяма предлагал назвать такие группы «семействами астероидов».

В то время Лагранж уже разработал теорию движения спутников планет с учетом их возмущений и показал, что элементы орбит спутников остаются почти неизменными (за исключением их перигентра и узлов

орбиты¹², которые непрерывно смещаются). Это привело Хираяму к идее «инвариантных» (неизменных) элементов астероидных орбит, которые не менялись бы под действием планетных возмущений, а следовательно, их можно было бы использовать для поисков семейств. Эти элементы Хираяма назвал *собственными*, т. е. унаследованными астероидами от их «родителей». Конечно, при дроблении астероидов (во время их столкновений друг с другом) осколки, получив разные добавки к орбитальной скорости, станут двигаться по слегка отличным орбитам, с немного различными собственными элементами. Но эти различия не настолько велики, чтобы помешать «узнать» членов данного семейства.

Вообще говоря, собственные элементы представляют собой обычные, но исправленные «на возмущения» элементы орбит. При этом получается, что собственное наклонение к эклиптике и собственный эксцентриситет орбит семейства остаются неизменными на протяжении многих миллионов лет. Что касается собственных долготы перигелия и долготы узла, то они меняются значительно быстрее. Собственная долгота перигелия очень медленно (со скоростью от десятков угловых секунд до десятков угловых минут в год), но непрерывно и притом равномерно растет, а собственная долгота узла убывает с той же скоростью. Период, за который собственные перигелий и узел совершают полный оборот вокруг Солнца, зависит от размеров орбиты, но обычно составляет несколько десятков тысяч лет. Таким образом, астероиды быстрее «забывают» свой узел и свой перигелий и гораздо дольше «помнят» наклон орбиты и ее эксцентриситет.

Как раз этими собственными наклонением к эклиптике и эксцентриситетом решил воспользоваться Хираяма для поисков семейств. Сначала, чтобы упростить расчеты, он учитывал возмущения только от Юпитера, пренебрегая несравненно более слабым влиянием остальных планет, но очень скоро ему стало ясно, что необходимо учитывать и воздействие других планет, особенно Сатурна, который оказывал большое влияние на астероиды с малым средним движением (движущиеся по орбитам больших размеров). Сделав это, он при-

¹² Перигелий — ближайшая к планете точка орбиты спутника, узлы — точки, в которых орбита пересекается с плоскостью эклиптики.

шел к заключению о том, что существуют пять семейств.

Особенно многочисленным оказалось семейство астероида Флора. Д. Брауер в дальнейшем на основании уточненной им теории возмущений разделил это семейство на 4 (I, II, III и IV).

Дальнейшие исследования показали, что «семейственность» у астероидов широко распространена: из 1697 нумерованных астероидов 712 (или 42%) относятся к 37 семействам и еще «помнят», как они двигались со своими «родителями». (То же самое оказалось и у мелких астероидов, выявленных Паломар-Лейденским обзорением.) Число выявленных семейств к настоящему времени превысило 50. Многие из них насчитывают десятки и сотни известных членов, сильно различающихся по массе, а число предполагаемых членов — на 1—2 порядка больше (рис. 11).

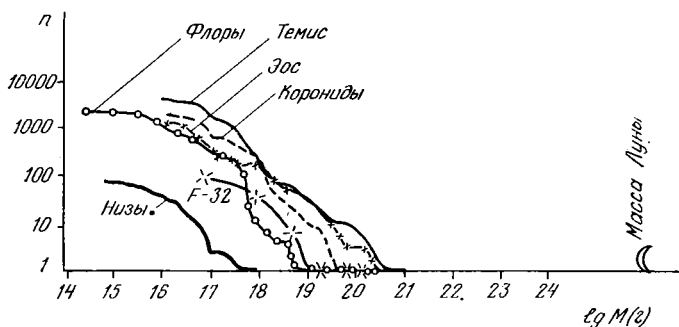


Рис. 11. Распределение по массе членов некоторых семейств. Указано «истинное» число астероидов, исправленное с учетом неполноты их открытий. Справа на оси абсцисс для сравнения указана масса Луны.

В начале 1970-х годов шведский астрофизик Г Альвен и американский математик Д. Арнольд попытались выделить в поясе астероидов (а точнее, в уже открытых семействах) осколки недавнего происхождения. Для этого они искали астероиды, у которых не два, а все четыре собственных элемента орбит (в том числе собственные долгота узла и долгота перигелия), а также большая полуось орбиты были бы одинаковыми. В семействе Флоры I Альвен нашел 13 таких астероидов (из 23). В семействах Флоры II, III и IV он обна-

ружил еще две группы, состоящие из 20 и 28 астероидов. Были найдены такие же группы и в других семействах. Они были названы «струйными потоками», или просто «струями» или «потоками».

Как бы тесно ни оказались расположенными узлы орбит в момент образования осколков при дроблении, все равно они распределятся за несколько сот тысяч лет более или менее равномерно по всем долготам (из-за небольшого различия в размерах орбит осколков). Поэтому «струи» можно рассматривать как «молодые» образования, свидетельствующие о недавних дроблениях, происшедших уже в эпоху существования на Земле человека.

Как показал советский астроном Б. Ю. Левин, значительная часть семейств и струй содержит лишь один довольно крупный астероид, а остальные их члены намного мельче. Примером может служить семейство Весты (рис. 12). Подсчитано, что в 26% семейств крупнейший член в 10 раз и более превосходит остальные по массе, а в 7% семейств это различие просто колоссально — более чем в 1000 раз.



Рис. 12. Семейство Весты. Известные члены семейства меньше породившей их Весты в 10^8 — 10^6 раз по массе.

Возникновение подобного семейства может быть связано со столкновениями астероидов, сильно различающихся по массе, когда более крупный из столкнувшихся астероидов почти полностью сохраняется, а также с «косыми» (почти касательными) столкновениями астероидов со сравнимыми массами. В последнем случае возможно даже образование семейства с двумя крупнейшими (по сравнению с членами семейства) астероидами.

Но большинство семейств образовалось, по-видимому, при катастрофических разрушениях астероидов, давших начало этим семействам, и не содержит подобных астероидов-гигантов. Следует заметить, что и Церера, и Паллада, как и Веста, тоже являются «главами» семейств.

Можно было бы, кажется, надеяться, что астероиды, входящие в одно и то же семейство, будут иметь сходный состав. Увы, совсем недавно с помощью спектральных и других наблюдений было выяснено, что это не так. Лишь в редких случаях два-три астероида — члены одного семейства — имеют одинаковые спектральные кривые.

Забавно, что уцелевшие при дроблении «родители» семейств «не терпят своих детей». Путем гравитационного воздействия на осколки «родители» изгоняют их на периферию возникшего роя, создавая вдоль своих орбит тороидальные зоны пониженной плотности осколков. Более того, «родительские» астероиды могут вычерпывать своих «детей» из роя, причем из-за малой относительной скорости (десятки или сотни метров в секунду) встреча астероида с осколком не приводит к дальнейшему дроблению: осколок просто зарывается в рыхлый грунт своих «родителей». Впрочем, такая участь постигает очень немногих.

Происхождение пояса астероидов

С тех пор как между Марсом и Юпитером вместо одной-единственной недостающей планеты нормальных размеров были открыты почти сразу четыре, а потом и огромное множество странных планет-карликов, возник вопрос об их происхождении. Уже в 1804 г. Г. Ольберс пытался объяснить их возникновение, предположив, что когда-то в прошлом на расстоянии 2,8 а. е. от Солнца действительно двигалась одна большая планета, которая разорвалась на несколько кусков, продолжаящих двигаться в окрестностях ее орбиты. Эта идея пользовалась большой популярностью. Гипотетическую планету даже назвали Фаэтоном в честь мифологического сына Солнца, разбившегося вместе с колесницей.

Было выдвинуто много и других гипотез. У. Лаверьё считал, например, что астероиды образуются и в нашу эпоху, сгущаясь под действием сил тяготения из космического вещества. В. Гершель указывал на возможность происхождения астероидов из комет.

Около двух столетий прошло со времени открытия астероидов. Накопление фактических данных о структуре пояса, о закономерностях движения и физических

особенностях астероидов прояснило природу их возникновения. Советские и зарубежные исследователи почти одновременно пришли к одинаковым выводам, которые коротко сводятся к следующему.

Пояс астероидов со всеми своими многочисленными представителями, видимо, образовался в результате дробления немногих (порядка 10) крупных *первичных* тел со средним движением 700—900". Движущиеся по сходным орбитам, скрещивающимся, а иногда и пересекающим друг друга, эти тела затем сталкивались и вновь дробились, так как столкновения происходили с огромными, по нашим земным представлениям, скоростями — в несколько километров в секунду.

Эта гипотеза была выдвинута в 1950-х годах американским астрофизиком Дж. Койпером и в настоящее время развивается многими учеными. В нашей стране ее математической разработкой в 60-х годах занимался Г. Ф. Султанов. Основываясь на собственных элементах орбит астероидов, движущихся в поясе, он обнаружил 12 хорошо выраженных максимумов в распределении этих элементов. В связи с чем он высказал предположение, что было 12 крупных *первичных тел*¹³ — почти столько, сколько известно теперь крупных астероидов.

Оценка такого же порядка была получена и другим путем. Распределение астероидов по размерам, полученное на основании МакДоналдского и Паломар-Лейденского обозрений, обнаруживает как уже упоминалось «избыток» астероидов поперечником более 50 км. Американский геохимик Э. Андерс предложил иное объяснение этого «избытка». Он считает, что дробление астероидов не зашло так далеко, чтобы уничтожить всякие следы первоначального распределения, и что «избыток» существует именно по этой причине. Определив массы (и размеры) «родительских» тел семейств (суммируя массы членов семейств), он нашел их распределение по «начальным» размерам. Затем, предположив, что *все* астероиды когда-то входили в семейства и что их «родительские» тела имели такое же распределение по размерам, как и найденное для ныне существующих

¹³ Промежутки между максимумами распределения частично «замазаны», что объясняется разлетом осколков при многократных дроблениях и существованием в прошлом более мелких *первичных тел*.

семейств, Андерс получил распределение по размерам первичных тел, не противоречащее результатам Султана (рис. 13).

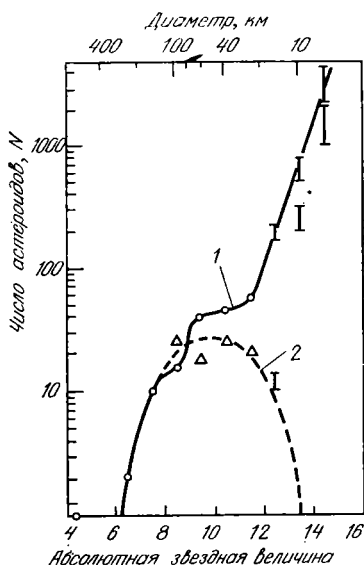


Рис. 13. Распределение числа астероидов по размерам и абсолютной звездной величине. Современное распределение 1 обнаруживает перегиб в области астероидов 9—11^m. Предполагаемое Э. Андерсом начальное распределение показано штриховой линией 2 для первичных тел, давших начало поясу астероидов.

Важным следствием гипотезы Койпера является то, что пояс астероидов должен быть очень молодым образованием. В самом деле, в ту далекую эпоху, когда закончилось формирование Солнечной системы, вероятность взаимных столкновений немногочисленных тел, двигавшихся между Марсом и Юпитером, как отмечал сам Койпер, была очень мала. Даже в том случае, если наклоны орбит этих тел к эклиптике не превышали всего 5° , а эксцентриситеты были не более 0,1, вероятность столкновений астероидов была не более 0,1 за 2 млрд. лет. Это означает, что на протяжении первой половины истории Солнечной системы, согласно гипотезе Койпера, произошло лишь несколько столкновений. И лишь потом, после достаточного накопления продуктов дробления, столкновения в поясе астероидов стали «обычным делом».

Разные части пояса должны были пройти, по-видимому, различный эволюционный путь. Астероиды с малым средним движением (400—500'') находятся как-

будто в менее раздробленном состоянии (из-за меньшей вероятности встреч на внешней окраине пояса). В центральной и внутренней частях пояса, где пространственная плотность астероидов особенно велика, а столкновения часты, процесс дробления, видимо, зашел дальше, о чем свидетельствует больший «хаос» их орбит.

Рассмотрим теперь, как могла образоваться та дюжина первичных крупных тел, которая дала начало поясу астероидов. Согласно гипотезе О. Ю. Шмидта, получившей развитие в трудах его учеников, их «колыбелью», (как и всей Солнечной системы) стало огромное холодное газопылевое облако, сгустившееся далеко от центра Галактики из межзвездной пыли и газа. Газовая компонента этого протопланетного облака состояла, по этой гипотезе, главным образом, из водорода, гелия и неона с примесью других газов, а мелкая пыль (пылинки размером порядка 1 мкм) — из силикатов и разного типа льдов. Это облако медленно вращалось вокруг некоторой центральной оси. В самом центре его родилось Солнце. Интересующие нас астероиды образовались на расстоянии 300—600 млн. км от этого центра. Там пылинки, атомы и молекулы, участвуя в общем круговом движении, должны были обладать еще и «хаотическими» движениями (поэтому они и сталкивались между собой). Известно, что столкновения атомов газа происходят упруго, молекул — почти упруго, а столкновения пылинок — неупруго. В соответствии с этим атомы и молекулы при столкновениях в облаке отскакивали друг от друга почти с прежними скоростями, и хаотичность их движений не менялась. У пылинок «хаотические» скорости при столкновениях должны были уменьшаться, и их кинетическая энергия переходить в тепловую, которая затем излучалась в окружающее пространство.

Из-за вращения протопланетного облака пылинки, теряя «хаотические» скорости, не могли падать к центру, на рождающееся Солнце, а оседали к экваториальной плоскости облака. Пылевая компонента протопланетного облака уплотнялась, и постепенно около Солнца должен был сформироваться плоский пылевой диск, погруженный в газовую среду. Со временем, когда он стал достаточно тонким и плотным, появилась возможность возникновения в нем сгущений частиц. Некоторые из них оказывались настолько большими, что сохраня-

лись, благодаря собственным силам тяготения. Они двигались вокруг Солнца в том же направлении, в котором вращалось протопланетное облако. Массы их постепенно возрастали за счет присоединения к ним новых частиц. Встречаясь с другими сгущениями, они объединялись, и по мере увеличения своей массы могли притягивать друг друга, в связи с чем рост их шел все более эффективно.

С момента своего образования эти сгущения должны были обладать медленным вращением вокруг собственной оси, а «хаотические» скорости частиц внутри сгущений из-за взаимных столкновений быстро уменьшались. Сталкиваясь друг с другом с малыми скоростями, в своеобразных условиях вакуума частицы могли слипаться. Сгущения в связи с этим постепенно сливались в сплошные тела, вращающиеся вокруг своих осей, и продолжали медленно расти за счет объединения и вычерпывания вещества из окружающего пространства. В результате возникло множество крупных тел размерами в десятки и сотни километров. Они двигались вокруг Солнца по почти круговым орбитам, мало наклоненным к экваториальной плоскости облака, как и те сгущения, из которых они образовались.

Именно эти тела стали теми «кирпичиками», из которых сложились планеты. Но в огромной зоне между орбитами Марса и Юпитера «кирпичики» не могли образовать планету (хотя их было там очень много), так как в их «жизнь» вмешался выросший рядом до огромных размеров Юпитер. Путем гравитационного воздействия он все время возмущал их движение, и упорядоченные круговые скорости вновь сменились «хаотическими». Эти тела, сталкиваясь с большими скоростями, уже не могли объединиться и, дробясь, порождали бесчисленные осколки.

Этим влияние Юпитера не ограничивалось: в окрестностях его орбиты, на расстоянии почти в 2 а. е., не осталось ровным счетом ничего. Поглотив огромное количество вещества, он, благодаря своему возросшему гравитационному воздействию, еще больше вещества «вышвырнул» из Солнечной системы.

Когда все это закончилось, пылевая компонента собралась в планеты, ее остатки были выброшены за пределы Солнечной системы, газообразная компонента была выдута «солнечным ветром», и Солнце, наконец,

засияло — в пустом межпланетном пространстве лишь между Марсом и Юпитером одиноко двигалось около десятка маленьких холодных планет-карликов. А столкновения этих тел друг с другом породили целый сонм огромных каменных глыб, летающих около Солнца со скоростями в десятки километров в секунду — своеобразное структурное образование, пояс астероидов.

Астероиды около Земли

Астероиды во внутренних районах Солнечной системы. Очень долго были не известны астероиды, которые глубоко проникали бы внутрь орбиты Марса. Лишь 13 августа 1898 г. Г. Витт во время своих наблюдений на обсерватории «Урания» в Берлине открыл 433-й астероид, получивший название Эрос, орбита которого не была похожа ни на одну уже известную. Небольшая по размерам, сильно вытянутая, она лишь афелием «цеплялась» за пояс астероидов — большую же часть времени астероид, как оказалось, проводил вдали от него, в своем перигелии почти «касясь» орбиты Земли.

В 1932 г. Э. Дельпорт на обсерватории в Уккле (Бельгия) открыл второй астероид с орбитой подобного же типа — Амур (1221-й астероид). Через несколько месяцев был открыт Аполлон, обладающий еще более необычной орбитой, двигаясь по которой, он проникал даже внутрь орбит Земли и Венеры. После обнаружения еще нескольких подобных астероидов «рекорд» по близости к Солнцу побил и удерживает до сих пор Икар, открытый в 1949 г. В. Бааде на Паломарской обсерватории. Этот астероид подходит к Солнцу на расстояние всего лишь в 0,186 а. е., где от нестерпимого жара его поверхность раскаляется до 600°C. Размеры орбиты Икара так малы, что, несмотря на ее большой эксцентриситет (0,827), астероид не может уйти от Солнца дальше 1,97 а. е. (в афелии он движется среди немногочисленных астероидов в зоне В).

К 1976 г. было известно уже более 40 астероидов, проникающих внутрь орбиты Марса, большая часть которых проходит очень близко от земной орбиты (рис. 14). Их орбиты отличаются от орбит большинства других астероидов большими эксцентриситетами и ма-

лыми размерами. Среди этих орбит находятся наиболее сильно наклоненные к плоскости эклиптики (до 64°).

Почти все астероиды, приближающиеся к орбите Земли, невелики по размерам (у большинства поперечники составляют всего несколько километров). А некоторые из них совсем крошки. Всего около 600 м поперечник, например, у Амура. Вторая космическая скорость на этой малютке меньше 1 м/с (с такой же скоростью движется медленно идущий человек!).

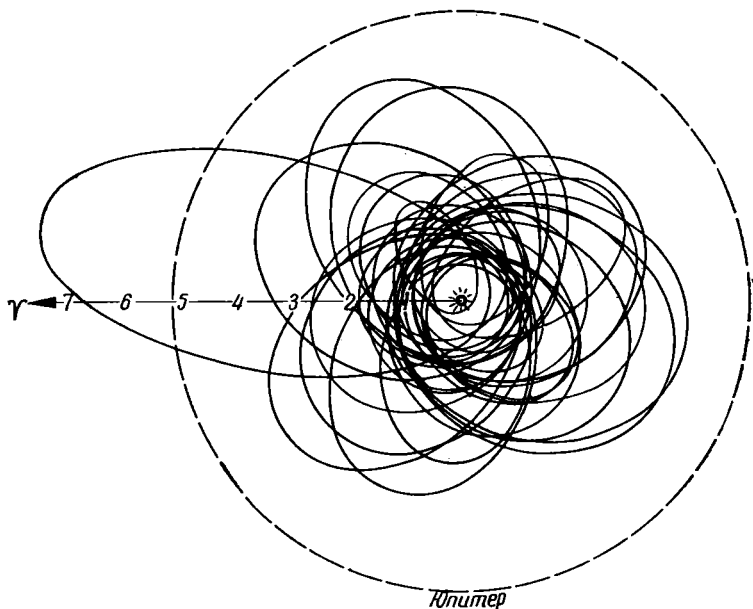


Рис. 14. Орбиты астероидов, которые могут приближаться к орбите Земли (последняя не показана). Вдоль горизонтальной оси показан масштаб (в астрономических единицах). Стрелкой указано направление на точку весеннего равноденствия, которая показана специальным астрономическим знаком. Штриховая окружность — орбита Юпитера.

Благодаря тому что эти астероиды близко подходят к Земле, они в период сближения могут быть довольно яркими. Эрос, например, можно увидеть в слабенький театральный бинокль, когда его блеск достигает максимального значения ($7,2^m$). Но период такой «видимости» длится недолго: блеск астероида быстро падает,

когда он, следуя далее по своей орбите, удаляется от Земли.

Открыть и даже пронаблюдать повторно (при следующем сближении с Землей) такие астероиды очень трудно. Почти все астероиды пояса, как уже говорилось, наблюдаются на небе в районе линии эклиптики. Астероиды, сближающиеся с Землей, оказываются в той же области лишь тогда, когда они неимоверно слабы, будучи далеко от Земли — в поясе астероидов или его окрестностях. К Земле они подходят то с одной стороны, то с другой, то сверху, то снизу. А это значит, что на небо они проецируются в самых разных местах вплоть до полюсов мира¹⁴.

Открытие астероида — событие случайное. Когда известна лишь малая доля астероидов, то трудно при случайном поиске вновь наткнуться на тот, который уже наблюдался (скорее обнаружится один из большого числа неизвестных ранее). Такое явление на языке математики — событие маловероятное. Другое дело, если были бы известны почти все астероиды. Тогда трудно было бы, наоборот, обнаружить астероид еще неизвестный. В связи с этим следует отметить, что ни один из астероидов, приближающихся к Земле, не был «открыт» дважды. Методы теории вероятности позволяют на основании этого утверждать, что число *всех* астероидов, приближающихся к земной орбите¹⁵, — несколько сот, а может быть, около тысячи.

Откуда же взялись эти астероиды? Можно не сомневаться, что сами они или их «предки» целиком двигались в поясе астероидов. На малые орбиты, сближающиеся с земной, астероиды перешли под действием длительных планетных возмущений. При помощи ЭВМ с учетом возмущений от многих планет (задача многих тел) удалось оценить время, в течение которого может произойти такой переход. Оказалось, что оно для астероидов с типичными орбитами составляет многие миллиарды лет. Эта оценка косвенно подтверждается тем, что при значительно меньшем времени пояс астероидов давно бы уж рассеялся по всей Солнечной системе.

¹⁴ Точек пересечения небесной сферы с осью ее вращения.

¹⁵ Это один из вариантов хорошо известной задачи: в урне находятся x шаров. Вынимая шар, делают на нем отметку и бросают обратно. Операцию многократно повторяют (например, 40 раз). А дальше по теории вероятности определяют, сколько в урне шаров, если ни один меченый шар не попался снова?

И тогда еще более непонятным стало существование сотен астероидов на малых орбитах. Ведь они-то не могут «жить» долго! Астероиды типа Аполлона существуют всего несколько десятков миллионов лет. Сначала возмущения планет, слегка меняя орбиту астероида, «заставляют» ее пересекаться с одной из планетных орбит. На это-то и требуется 10^7 лет. А если это произошло, астероид обречен: за очень короткое (в астрономии) время, порядка десятков тысяч лет, астероид «вылавливается» планетой. Иными словами, астероиды очень трудно «выманить» из их пояса, но если это случилось, их ждет почти мгновенная «гибель».

Ученые потратили много усилий, прежде чем нашли «источник» астероидов с малыми орбитами, да не один, а сразу несколько. Оказалось, что кроме астероидов-«домоседов» есть немногие группы «гуляк». Э. Андерс из Чикагского университета (США) считает, что это астероиды, движущиеся в окрестностях орбиты Марса. П. Циммерман и Г. Везерилл из Вашингтона добавили к ним астероиды, движущиеся в соизмеримости 1:2 с Юпитером, и некоторые другие, у которых в резонансе с Юпитером находится не период обращения, а некоторая комбинация сразу трех элементов — большой полуоси, эксцентриситета и наклона к эклиптике. Астероиды легко сходят с таких орбит под действием планетных возмущений и дело кончается сильным уменьшением размеров их орбит. Чтобы «перигелийная» часть их приблизилась к Солнцу до расстояния орбиты Земли или еще ближе, оказывается, нужны не миллиарды лет, а немногие сотни миллионов.

Остается выяснить, как астероиды попадают на быстро эволюционирующие орбиты. Вопрос этот очень сложный и не решен до сих пор. Одна из особенностей планетных возмущений заключается в том, что они не позволяют астероидам двигаться в окрестностях орбит планет или просто в резонансе с ними. Если астероид быстро изгоняется из каких-либо областей, то попасть ему в эти области под действием тех же планетных возмущений уже совершенно невозможно. Вот здесь-то и могут прийти на помощь небольшие изменения орбит в результате дроблений. Когда, например, астероид движется вблизи орбиты с резонансом 1:2, его осколки, хотя бы немногие, всегда будут в данном резонансе.

Правда, бывает и по-другому. Какой-нибудь астероид может пройти около планеты на малом расстоянии, и тогда за короткое время, пока астероид находится около планеты, за считанные часы его скорость и направление движения могут так сильно измениться, что орбита станет неузнаваемой.

Это случилось, например, с одним крошечным астероидом несколько десятков лет тому назад. Г. А. Чеботарев исследовал его движение и показал, что раньше этот астероид двигался по орбите огромных размеров с афелием, расположенным за орбитой Сатурна. Перигелий тогда должен был находиться около орбиты Земли, а один из узлов орбиты — у самой орбиты Марса, и только случай помог ему не столкнуться с этой планетой. Астероид находился под влиянием Юпитера: его не сильно наклоненная к эклиптике орбита проходила недалеко от орбиты этой планеты. Общее воздействие планет привело к тому, что восходящий узел астероидной орбиты приблизился к Юпитеру, и астероид вместе с Юпитером оказались одновременно в районе сближения орбит и прошли на малом расстоянии друг от друга. Массивный Юпитер, кроме того, оказался немного позади астероида и так затормозил его, что тот, не проделав и половины пути до Сатурна, стал возвращаться к Солнцу. Орбита астероида уменьшилась, а перигелий сместился к орбите Венеры, и с тех пор орбита астероида медленно сокращается. В середине XXI в. перигелий будет уже на орбите Меркурия. Следует заметить, что этот астероид — один из немногих, «захваченных» совершенно недавно Юпитером в резонанс 3 2.

Астероиды на орбитах, сближающихся с орбитой Земли, условно делят на две группы: группу Аполлона, с астероидами на орбитах, скрещивающихся с орбитой Земли (из-за сходства их орбит с орбитой Аполлона), и группу Амура — на орбитах, только приближающихся к орбите Земли (по той же причине). Конечно, эти группы отличаются от семейств, и астероиды, входящие в них, не связаны «родством»: они были совершенно случайно «понадерганы» из пояса астероидов.

Когда стало известно достаточно много астероидов из групп Аполлона и Амура, провели детальное изучение особенностей их орбит. Оказалось, что перигелийные расстояния орбит не распределены хаотично: околоперигелийные участки орбит собрались в три пучка.

Между пучками существуют широкие просветы — настоящие «люки»! Самым интересным оказалось то, что как раз в этих «люках» и проходят орбиты планет. «Люки» же возникли потому, что планеты сами расчищали межпланетное пространство на своем пути, вылавливая астероиды или меняя их движение путем возмущений.

«Люки», указанные выше, существуют в распределении современных астероидов, орбиты которых претерпевают осциллирующие (периодические) возмущения планет. Как же эти «люки» ведут себя при изменениях орбит астероидов под действием планетных возмущений? Не исчезают ли они вовсе со временем? Оказывается, нет. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим данный процесс более подробно.

Мы можем не учитывать вековых изменений орбит — они не успевают сколько-нибудь значительно сказаться за время «жизни» таких астероидов. Среди короткопериодических изменений особо важны для нас осцилляции орбит, происходящие с периодом в десятки тысяч лет, в ходе которых меняются наклонение к эклиптике, форма орбиты и ее положение в пространстве, в то время как большая полуось остается приблизительно постоянной.

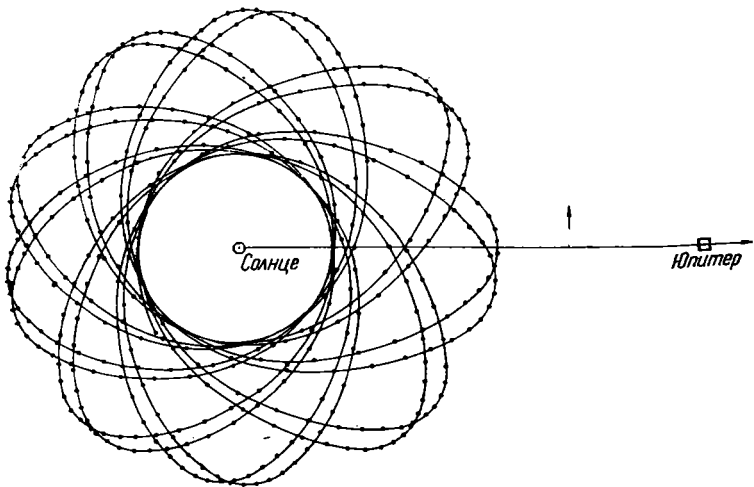
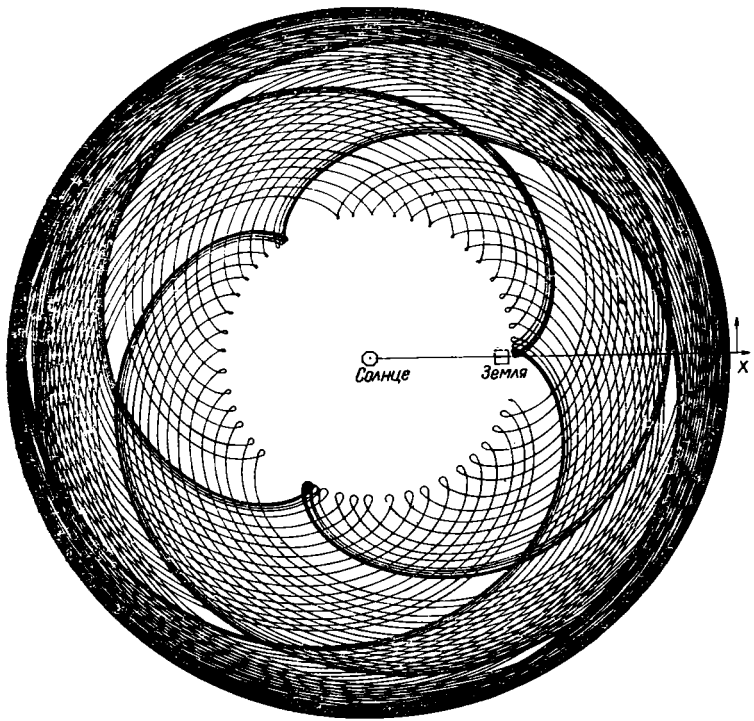
При этих осцилляциях линия узлов вращается в плоскости эклиптики с указанным периодом. Когда она совпадает с линией апсид, т. е. проходит через перигелий и афелий орбиты (а это случается дважды за период обращения) форма орбиты приближается к круговой. Перигелий располагается в наибольшем удалении от Солнца (а афелий, наоборот, — на самом близком из возможных для него расстоянии, так как $q + q' = 2a$ — постоянная величина). Наклонение орбиты к эклиптике в этот момент достигает максимума. Затем линия узлов смещается, наклонение уменьшается, перигелий движется к Солнцу, а афелий — от него. Малая полуось орбиты сокращается — эксцентриситет орбиты растет. Максимальные изменения достигаются, когда линия узлов становится перпендикулярной линии апсид (что тоже происходит дважды на период). Тогда перигелий ближе всего к Солнцу, а афелий — дальше всего, и обе эти точки орбиты сильнее всего отклонены от эклиптики (таким образом, каждая орбита как бы непрерывно пульсирует).

Оказалось, что перигелии большинства орбит колеблются в узких промежутках между планетными орбитами. Астероиды на таких орбитах остаются постоянными членами указанных выше трех групп-пучков (в «люки» они не заходят!). У астероидов с большими наклонами орбит к эклиптике амплитуда колебаний так велика, что они лишь временно бывают то в одной, то в другой группе, «гуляя» по всей Солнечной системе. Планеты на их орбиты не воздействуют из-за большого наклона их орбиты к эклиптике: ведь когда такой астероид попадет в «люк», он из-за большого отклонения перигелия от эклиптики проходит на значительном расстоянии от планетной орбиты.

Одной из наиболее интересных особенностей астероидов с малыми орбитами является то, что они движутся в резонансе сразу с несколькими планетами. Впервые это было замечено в движении астероида Торо. Он совершает 5 орбитальных оборотов приблизительно за то же время, как и Земля — 8, а Венера — 13 оборотов (резонанс Торо с Марсом 20 : 17). Перигелий орбиты этого астероида находится между орбитами Земли и Венеры.

Строго говоря, резонанс у Торо с планетами не очень точный. Чтобы Торо двигался в резонансе с Землей 5 : 8, его среднее движение должно было бы иметь значение $2217,62''$, а при резонансе с Венерой 5 : 13 — $2218,34''$. У Торо среднее движение колеблется между $2215,0$ и $2222,0''$, совершая одно колебание за 100 лет, а иногда и больше. Поддерживают эти колебания... сами планеты — то ускоряя, то замедляя движение Торо. В подвижной системе координат, с центром в Солнце и вращающейся вместе с планетой (Землей или Венерой), Торо благодаря резонансу описывает красивые петли. Чем точнее резонанс, тем компактнее расположены эти петли. Очевидно, что резонанс асте-

Рис. 15. Движение Амура в системе координат, с центром в Солнце, вращающейся в направлении, указанном стрелкой, со скоростью орбитального движения Земли (а) и Юпитера (б). Вследствие почти точного резонанса с Землей и Юпитером положение Амура по отношению к Земле почти точно повторяется через каждые три оборота, по отношению к Юпитеру — через каждые девять оборотов астероида вокруг Солнца. Чем ближе движение Амура к резонансу с соответствующей планетой, тем теснее располагаются последовательные петли.



6)

роида с Венерой наступает более точный, когда расстраивается его резонанс с Землей. Так Торо и «мечется» из одного резонанса в другой, а Земля и Венера будто им «играют».

Другой астероид, Амур, движется в резонансе 3 : 13 с Венерой, 3 : 8 — с Землей, 12 : 17 — с Марсом и 9 : 2 — с Юпитером (рис. 15).

Очевидно, резонансы — удел большинства, если не всех астероидов на малых орбитах. Это предохраняет их от «вылавливания» планетами и тем самым продляет им «жизнь».

Астероиды в окрестностях земной орбиты. Насколько близко могут к Земле подойти астероиды, двигаясь в окрестностях ее орбиты, не могут ли они столкнуться с нашей планетой? Именно такое столкновение Земли с астероидом Икар — каменистой глыбой поперечником чуть более 1 км и с массой в сотни миллионов тонн, предсказывал один из астрофизиков в 1966 г. По расчетам получалось, что удар Икара был бы эквивалентен взрыву 1000 водородных бомб. Что же произошло в действительности?

В сентябре 1967 г. Икар покинул пояс астероидов, вошел внутрь орбиты Марса и начал приближаться к Солнцу. Пройдя затем на расстоянии 15 млн. км от Меркурия, он промчался вокруг Солнца со скоростью 92 км/с и стал сближаться с Землей. Вечером 14 июня 1968 г. Икар пронесся около Земли на расстоянии 6,36 млн. км — столкновения не произошло.

Близ Земли проходили и другие астероиды, некоторые из них — даже ближе Икара. Например, Аполлон, чуть более крупный по сравнению с Икаром астероид, пролетел мимо Земли на расстоянии 3,5 млн. км, Адонис (0,75 км в поперечнике) — на расстоянии 1,5 млн. км, а Гермес (всего 1 км в поперечнике) в октябре 1937 г. сблизился с Землей до расстояния 1 млн. км (лишь в 2,6 раза дальше орбиты Луны).

И наконец, земная поверхность хранит в себе следы столкновений с астероидами в отдаленном прошлом. Удары астероидов и их осколков о поверхность Земли вызвали появление на ней чудовищных «ран» — астроблем или метеоритных кратеров, если размеры падающих на Землю тел не очень велики. Наибольший из хорошо сохранившихся метеоритных кратеров (рис. 16) расположен в Аризоне (США) на высоком плато, сло-

женном из песчаников и известняков, и имеет почти круглую форму (диаметр кратера более 1,2 км, глубина около 200 м).

Следы огромных кратеров — астроблем сохранились и в нашей стране. Один из них, поперечником около 100 км, образовался несколько десятков миллионов лет назад на севере Сибири, там, где, образуя небольшую извилину недалеко от устья, течет река Попигай. Кратер был создан телом в несколько километров поперечником. Когда-то он был очень глубоким. Но за прошедшие геологические эпохи он «заплыл»: дно его поднялось, вал, окружавший кратер, опустился и разрушился так, что кратер почти слился с окружающим рельефом.

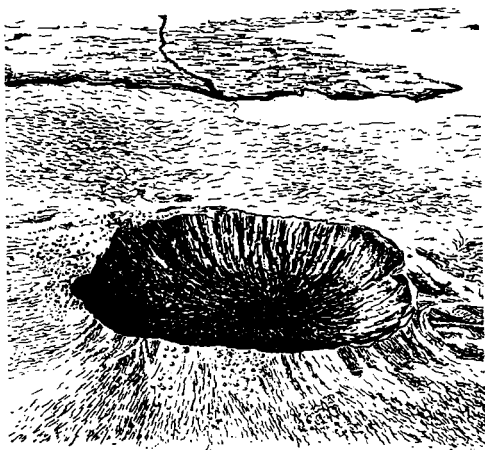


Рис. 16. Метеоритный кратер в Аризоне (США).

С мелкими осколками астероидов — размерами в метры, десятки сантиметров и мельче, Земля сталкивается непрерывно, так как их число огромно в окрестностях земной орбиты. Со скоростью не меньше 11 км/с они вторгаются в земную атмосферу и, преодолевая ее сопротивление, огненным шаром проносятся по небу. Это свечение создается главным образом возбужденными атомами и молекулами образующихся паров астероидного осколка и воздуха.

Осколки во время полета в земной атмосфере дробятся и испаряются. Лишь немногие из них выпадают в виде метеоритов на поверхность Земли. Предсказать

падение метеорита невозможно, потому что порождающие его астероидные осколки малы и не видны в космическом пространстве даже вблизи Земли.

Метеориты — осколки астероидов. С изучением астероидов нам повезло: более далекие, чем Луна, они сами «позаботились» о доставке их во внутренние районы Солнечной системы. Земле остается лишь «выловить» из космического пространства мелкие, но многочисленные астероидные обломки, большая часть которых, однако, падает в океаны, горные области и пустыни. В руки ученых попадает всего 5—6 метеоритов ежегодно. Бывают, правда, редкие удачи. Так, несколько лет назад недалеко от своей базы в Антарктиде японские исследователи обнаружили сразу 600 метеоритов.

По внешнему виду метеориты похожи на обычные камни, и если их не наблюдали при падении, они редко привлекают внимание человека. Учитывая огромную научную ценность метеоритов, мы укажем некоторые их характерные особенности, позволяющие отличать метеориты от целого ряда земных образований.

Во время движения в атмосфере Земли поверхностные слои метеорита нагреваются до нескольких тысяч градусов, так что их вещество плавится и испаряется. Но внутренние части даже небольших метеоритов не успевают прогреться, так как время движения в плотных слоях атмосферы составляет обычно немногие секунды, и поэтому они падают холодными (лишь их поверхность бывает слегка теплой, но и она быстро остывает). Внутри метеоритов не бывает пустот, как в металлургических шлаках, а их поверхность обычно покрыта (полностью или частично) корой плавления — застывшей тонкой пленкой вещества, которое было расплавлено во время движения в атмосфере. Следы атмосферного воздействия остаются на метеорите в виде характерных вмятин — регмаглиптов. Иногда бывают обнажены поверхности раскола без регмаглиптов и без коры плавления.

Хотя каменные метеориты падают чаще, чем железные или железокремнистые, но опознать их на земле труднее и находят их реже. Часто они имеют неправильную обломочную форму (рис. 17) — след дробления в межпланетном пространстве или в атмосфере Земли. Они иногда серые, иногда темные. У них нет ярко выраженной крупнокристаллической структуры (как у гранита),

нет слоистости (как у глин и сланцев). В их составе отсутствуют карбонатные породы, такие, как известняк и мел. Железокаменные метеориты представляют собой железную губку, в порах которой находится каменистое вещество. На Земле такие формы пород не встречаются.



а)



б)

Рис. 17. Структура поверхности разлома а) железного и б) каменного метеоритов.

Лишь благодаря тому, что метеориты не успевают прогреться за короткое время движения в атмосфере (рис. 19) сохраняется неизменной и доступной для изучения их внутренняя структура и состав. У большинства метеоритов они очень своеобразны, не похожи на известные земные горные породы и свидетельствуют о том, что многие из астероидов не подвергались существенным изменениям со времени аккумуляции первичных тел, давших начало поясу астероидов. Таким образом, метеориты — это наименее измененные остатки протопланетного вещества, доступные изучению. Этим определяется их научная ценность, и потому в СССР все

метеориты, найденные на территории нашей страны, наравне с полезными ископаемыми являются народным достоянием и охраняются законом.

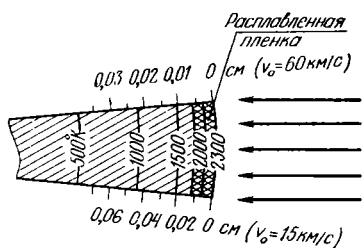


Рис. 18. Распределение температур внутри каменного астероидного осколка в момент начала его интенсивного испарения. Показан сектор с участком лобовой поверхности. Масштаб указан для разных скоростей движения. Сильно прогрет лишь тонкий поверхностный слой. По мере проникновения в более плотные слои атмосферы температура на поверхности осколка повышается, но изотермы располагаются у поверхности так же тесно. Выпавший сохранившийся остаток осколка оказывается холодным внутри.

О метеоритах мы здесь сказали очень мало, хотя их изучением занимается очень большая область науки — метеоритика, и на основе данных этой науки можно написать и ни одну брошюру.

Заключение

Прошло около 200 лет с тех пор, как случай, этот «вечный» спутник астрономов, позволил Д. Пиацци открыть первый и к тому же самый крупный из астероидов — Цереру. К разочарованию тех, кто надеялся найти между орбитами Марса и Юпитера большую планету, Церера оказалась всего лишь крошечной (по астрономическим масштабам) каменной глыбой диаметром в 1000 км. Затем было выяснено, что Церера движется среди многих других астероидов и продуктов их дробления — осколков разных размеров, вплоть до пылинок. Но расстаться с мечтой об одной большой планете оказалось нелегко. Лишь в последние годы ученые разных стран пришли к заключению, что астероиды никогда не были частями одной большой планеты, так как она не смогла бы «слепиться» из них. Астероиды представляют собой промежуточную, как бы «замороженную» стадию формирования планет в ходе эволюции газопылевого протопланетного облака, и их изучение позволит приоткрыть тайну рождения планет Солнечной системы.

Астрономические методы наблюдений астероидов в сочетании с лабораторным изучением метеоритов дают все больше сведений о природе веществ, слагающих

астероиды. Однако астрономическими наземными методами можно исследовать лишь крупнейшие тела, движущиеся в поясе астероидов. Среди мелких астероидов (размерами в километры) нам известны лишь немногие, даже из числа тех, которые приближаются на малые расстояния к Земле.

О метеоритах (глыбах метровых размеров и еще меньших) мы знаем только то, что они — осколки астероидов. Указать же, какие астероиды являются «родителями» тех или иных метеоритов, очень трудно. Мы не знаем даже, только ли вещества и минералы, встречающиеся в метеоритах, слагают астероиды. Нет ли других, никогда не попадающих к нам в руки хрупких и рыхлых астероидных осколков, не способных выдержать сопротивление земной атмосферы?

С Земли мы видим только поверхность астероидов, которая удивительно однородна по своему составу. Для того, чтобы выяснить, насколько однородны они и внутри и не происходит ли формирование метеоритного вещества лишь в поверхностных слоях астероидов под действием ударов падающих на них тел, а также — действительно ли пережили астероиды сильный нагрев вскоре после своего рождения — нам не хватает многих данных. А между тем такие данные могут привести к серьезному пересмотру наших представлений о прошлом Земли и других планет.

Очевидно, лучший способ ответить на многие связанные с астероидами вопросы — космические полеты, о которых мечтал еще К. Э. Циолковский, считавший, что кроме всего прочего астероиды могут стать опорными станциями (базой) для дальнейших полетов в Солнечной системе. В настоящее время уже технически возможны полеты, предусматривающие мягкую посадку на астероид. Следует сказать, что произвести такую посадку на астероид гораздо легче, чем на Луну или Марс и Венеру, так как из-за малой его массы притяжение его также мало, и скорость космического аппарата при сближении с астероидом не будет им сильно меняться (правда, существует другая трудность — их незначительные размеры).

Запуски на астероиды автоматических станций планируется провести уже в 80-е годы, и, по-видимому, первым будет полет на астероид Эрос. Напомним, что это маленький астероид размером в несколько десятков

километров, орбита которого нам хорошо известна и проходит на расстоянии всего в несколько десятых астрономической единицы от орбиты Земли. Поэтому космическому аппарату не нужно будет сообщать слишком большой скорости после вывода на гелиоцентрическую орбиту, так как ему не надо будет слишком далеко удаляться от орбиты Земли.

Можно не сомневаться, что Эрос станет лишь первым астероидом, к которым в недалеком будущем полетят космические аппараты. Затем настанет очередь и многих других. На примере изучения Луны, Марса, Венеры, Меркурия и Юпитера мы уже не раз убеждались, что результаты, полученные с помощью космических аппаратов, превосходили все самые смелые предположения ученых и даже фантастов. Будем надеяться, что на астероидах мы также откроем много для нас неожиданного.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Открытие пояса астероидов	5
Физические свойства астероидов	10
Размеры и массы	10
К чему приводят малые размеры	15
Из чего состоят астеронды	21
Температура астероидов	27
Образование кратеров	29
Структура пояса астероидов	31
Движение типичных астероидов	31
Возмущения со стороны планет	35
Тонкая структура	36
Троянцы	37
Семейства	39
Происхождение пояса астероидов	43
Астероиды около Земли	48
Астероиды во внутренних районах Солнечной системы	48
Астероиды в окрестностях земной орбиты	56
Метеориты — осколки астероидов	58
Заключение	60

Алла Николаевна Симоненко

ПОЯС АСТЕРОИДОВ

Главный отраслевой редактор *И. Г. Вирко*. Редактор *Е. Ю. Ермаков*. Младший редактор *Т. И. Полякова*. Обложка *П. А. Шорчева*. Худож. редактор *В. Н. Конюхов*. Техн. редактор *Т. Ф. Айдарханова*. Корректор *Р. С. Колокольчикова*.

Г-07852. Индекс заказа 74205. Сдано в набор 15.11.77 г. Подписано к печати 1.IV.77 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,40. Тираж 30 500 экз. Издательство «Знание». 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 300. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

Уважаемый читатель!

Брошюры серии **«Космонавтика, астрономия»**, выпускаемые издательством Всесоюзного общества «Знание», рассчитаны на широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами космонавтики и астрономии. В розничную продажу они не поступают и распространяются только по подписке (индекс «Союзпечати» 70101).

В 1977—1978 гг. намечается выпуск следующих брошюр этой серии:

Дибай Э. А. **Нестационарные явления в галактиках.**

Новиков И. Д. **Черные дыры во Вселенной.**

Кириллов-Угрюмов В. Г и др. **Гамма-астрономия.**

Давыдов В. Д. **Современные представления о Марсе.**

Мурзаков Б. Г. **Проблемы обнаружения жизни на планетах.**

Гришин С. Д. и др. **Космическая технология и производство.**

Вернов С. Н. и др. **Воздействие космоса на материалы.**

Паневин И. Г и др. **Космические ядерно-ракетные двигатели.**

А также ежегодные сборники **«Современные достижения космонавтики»**, **«Современные проблемы астрофизики»** и юбилейный сборник **«20 лет космической эры»**.

11 коп.

Индекс 70101