



Новое
в жизни,
науке,
технике

Подписная
научно -
популярная
серия

А.Д.Чернин
ВРАЩЕНИЕ
ГАЛАКТИК

3'90



КОСМОНАВТИКА,
АСТРОНОМИЯ

ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

КОСМОНАВТИКА, АСТРОНОМИЯ

3/1990

Издается ежемесячно с 1971 г.

А. Д. Чернин

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК

В приложении этого номера:

АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ
КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
«ГРАНАТ»

СССР: МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО
В КОСМОСЕ (ГОД 1989)



Издательство «Знание» Москва 1990

ББК 22.67

Ч 49

Редактор ВНРКО Н. Г.

Чернин А. Д.

Ч 49 Вращение галактик. — М.: Знание, 1990. — 64 с., ил. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Космонавтика, астрономия»; № 3).

ISBN 5-07-001246-0

15 к.

Брошюра посвящена современному состоянию проблемы галактик — главных элементов структуры Вселенной. Рассказывается о строении галактик, их кинематике, динамике, обсуждаются гипотезы их происхождения. Основное внимание уделяется представлениям о природе галактического вращения.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся актуальными проблемами познания Вселенной.

1605060000

ББК 22.67

ISBN 5-07-001246-0

© Чернин А. Д., 1990 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Планета, на которой мы живем, вращается вокруг своей оси, задавая сменой дня и ночи естественный ритм и темп всей нашей жизни. Земля обращается также и вокруг Солнца по своей орбите, и это приводит к смене времен года. Вместе с Землей, Солнцем и всей Солнечной системой мы совершаем в мировом пространстве еще и третье круговое движение — обращение с периодом 180 млн. наших земных лет. Радиус круга, очерчиваемого в этом движении, составляет приблизительно 30 тыс. световых лет (т. е. $3 \cdot 10^{16}$ км). Внутри круга находится огромное множество звезд, подобных нашему Солнцу, и все они тоже вращаются в ту же сторону, что и Солнце, вокруг того же центра. Эти звезды — а их насчитывается до 200 млрд. — образуют гигантскую звездную систему — Галактику, наблюдаемую нами на небе в виде светящейся полосы Млечного Пути. Если бы мы могли взглянуть на нее со стороны и издалека, она представилась бы нам могучим космическим вихрем. Скорость вращения Галактики составляет на орбите Солнца 220 км/с — это самое быстрое вращательное движение, в котором мы участвуем. (Напомним, что скорость собственного вращения Земли 0,5 км/с на экваторе, а скорость ее обращения вокруг Солнца 30 км/с.)

Галактика — не единственная звездная система во Вселенной. В пределах объема, доступного современным астрономическим наблюдениям, содержатся сотни миллиардов других галактик, похожих и не похожих на нашу. Все они обладают вращением, причем в большинстве своем весьма быстрым, часто столь же быстрым, как и у Галактики. Ближайший к нам гигантский космический вихрь — знаменитая туманность Андромеды, которая своими размерами и скоростью вращения даже превосходит Галактику. Мир галактик — это мир быстрых вращательных движений.

Как устроены галактики? Каково их место во Вселенной? Как и когда они возникли? Откуда взялось их вращение?

Изучение этих проблем в последние четверть века в советской и мировой науке проходило под большим

влиянием и с самым активным участием Якова Борисовича Зельдовича (1914—1987). Ему принадлежит очень значительный вклад в науку о происхождении космических структур. Выдвинутые им астрофизические идеи развиваются сейчас многими и многими исследователями в разных странах. Научное творчество Я. Б. Зельдовича — вдохновляющий и плодотворный пример смелого и энергичного теоретического поиска в самых фундаментальных областях современной науки.

ВСЕЛЕННАЯ — МИР ГАЛАКТИК

В древнеиндийской «Книге гимнов» («Ригведе») можно найти описание — одно из самых первых в истории человечества — всей Вселенной как единого целого. Согласно «Ригведе» она устроена не слишком сложно. Прежде всего в ней имеется Земля. Она представляется безграничной плоской поверхностью — «обширным пространством». Эта поверхность покрыта сверху небом. А небо — это голубой, усеянный звездами «свод». Между небом и землей — «светящийся воздух». Очень похожи на эту картину и ранние представления о нашем мире у древних греков и римлян — тоже плоская земля под куполом неба.

От науки это еще очень далеко. Но важно другое. Замечательна и грандиозна сама дерзкая цель — объять мыслью всю Вселенную. Отсюда берет истоки уверенность в том, что человеческий разум способен осмыслить, понять, воссоздать в своем воображении полную картину мира.

Научная картина мира складывалась по мере того, как шло накопление важнейших знаний о Земле, Солнце, Луне, планетах, звездах.

Картина мира. Еще в VI в. до н. э. великий математик и философ древности Пифагор учил, что Земля шарообразна. Доказательством этому служит, например, круглая тень от нашей планеты, падающая на Луну во время лунных затмений. Другой великий ученый античного мира Аристотель и всю Вселенную считал шарообразной, сферической. На эту мысль наводил не только округлый вид небосвода, но и круговые суточные движения светил на небосводе. В центре своей картины Вселенной Аристотель помещает Землю. Вокруг нее распо-

лагаются Солнце, Луна и известные тогда пять планет. Каждому из этих тел соответствовала своя сфера, обращающаяся вокруг нашей планеты. Тело «прикреплено» к своей сфере и поэтому тоже движется вокруг Земли. Самой удаленной сферой, охватывающей все остальные, считалась восьмая, к которой «прикреплены» звезды. Она тоже обращается вокруг Земли в соответствии с наблюдаемым суточным движением неба. Аристотель учил, что небесные тела, как и их сферы, сделаны из особого «небесного» материала — эфира, который не имеет свойств тяжести или легкости и совершает вечное круговое движение в мировом пространстве.

Такая картина мира царила в умах людей на протяжении двух тысячелетий — вплоть до эпохи Коперника. Замечательное ее усовершенствование осуществил во II в. нашей эры Птолемей, знаменитый астроном и географ, живший в Александрии. Он дал подробную математическую теорию движения планет. Птолемей мог очень точно вычислять видимые положения светил — где они находятся сейчас, где были раньше и где окажутся потом. Правда, для воспроизведения всех тонких деталей движения планет по небу пяти сфер оказалось недостаточно. К ним пришлось добавить новые, да и прежние перестроить. У Птолемея каждая планета участвует в нескольких круговых движениях, а их сложение и дает видимое перемещение планет по небу.

Книга Коперника, вышедшая в год его смерти (1543), носила скромное название «Об обращении небесных сфер». Но это было полное опровержение аристотелева взгляда на мир. Сложная картина полых прозрачных — «хрустальных» — сфер отошла в прошлое. С этого времени началась новая эпоха в изучении и понимании Вселенной. Продолжается она и поныне. Благодаря Копернику мы узнали, что Солнце занимает надлежащее ему положение в центре планетной системы. Земля же — никакой не центр мира, а одна из рядовых планет, обращающихся вокруг Солнца. Так все стало на свои места. Строение Солнечной системы было, наконец, разгадано.

Но Солнечная система — еще не вся Вселенная. Есть ведь еще и далекие звезды. О них Коперник не рисковал высказывать никакого определенного мнения. Он просто оставил их на прежнем месте, на дальней сфере, где они были у Аристотеля, и лишь говорил (и со-

вершено правильно), что расстояния до звезд во множество раз больше размеров планетных орбит. Как и античные ученые, он представил Вселенную замкнутым пространством, ограниченным этой сферой.

Мир звезд. В ясную безлунную ночь человек с острым зрением увидит на небосводе не более двух-трех тысяч мерцающих точек. В списке, составленном во II в. до н. э. древнегреческим астрономом Гиппархом и дополненным позднее Птолемеем, значится 1022 звезды. Гевелий же, последний астроном, производивший такие подсчеты без помощи телескопа, довел их число до 1533.

Но уже в древности подозревали о существовании большого числа звезд, не видимых глазом. Демокрит говорил, что белесоватая полоса, протянувшаяся через все небо, которую мы называем Млечным Путем, есть в действительности соединение света множества невидимых по отдельности звезд. Споры о строении Млечного Пути продолжались веками. Решение — в пользу догадки Демокрита — пришло в 1610 г., когда Галилей сообщил о первых открытиях, сделанных на небе с помощью телескопа. Он писал с понятным волнением и гордостью, что теперь удалось «сделать доступными глазу звезды, которые раньше никогда не были видимыми и число которых по меньшей мере в десять раз больше числа звезд, известных издревле».

Еще до открытия Галилея была высказана совершенно неожиданная по тем временам и замечательно смелая мысль. Она принадлежит Джордано Бруно. Он выдвинул идею о том, что наше Солнце — это одна из звезд Вселенной. Всего только одна из великого множества, а не центр всей Вселенной. Но тогда и любая другая звезда тоже вполне может обладать своей собственной планетной системой. Если Коперник указал место Земле отнюдь не в центре мира, то Бруно и Солнце лишил этой привилегии.

Идея Бруно породила немало поразительных следствий. Из нее вытекала оценка расстояний до звезд. Действительно, Солнце — это звезда, как и другие, но только самая близкая к нам. Поэтому-то оно такое большое и яркое. А на какое расстояние нужно отодвинуть наше дневное светило, чтобы оно выглядело так, как, например, звезда Сириус? Ответ на этот вопрос дал гол-

ландский астроном Гюйгенс (1629—1695). Он сравнил блеск этих двух небесных тел, и вот что оказалось: Сириус находится от нас в сотни раз дальше, чем Солнце.

Конечно, разные звезды отличаются друг от друга (это учтено в современной оценке расстояния до Сириуса). Замечательная идея Бруно и основанный на ней расчет Гюйгенса стали решительным шагом вперед. Благодаря этому границы наших знаний о мире сильно раздвинулись, они вышли за пределы Солнечной системы и достигли звезд.

Млечный Путь. С XVII в. важнейшей целью астрономов стало изучение Млечного Пути — этого гигантского собрания звезд, которые Галилей увидел в свой телескоп. Усилия многих поколений астрономов-наблюдателей были нацелены на то, чтобы узнать, каково полное число звезд Млечного Пути, определить его действительную форму и границы, оценить размеры. Лишь в XIX в. удалось понять, что это единая система, заключающая в себе все видимые (и невидимые) глазом звезды. На равных правах со всеми входит в эту систему и наше Солнце, а с ним Земля и планеты. Причем располагаются они далеко не в ее центре, а на окраине.

Потребовались еще многие десятилетия тщательных наблюдений и теоретических расчетов, прежде чем перед астрономами раскрылось во всей полноте строение Галактики. Так стали называть звездную систему, которую мы видим — конечно, изнутри — как полосу Млечного Пути. (Слово «галактика» образовано из новогреческого «галактос», что значит «млечный»).

Оказалось, что Галактика имеет довольно правильное строение и форму, несмотря на видимую клочковатость Млечного Пути, на беспорядочность, с которой, как кажется, рассеяны звезды по небу. Она состоит из диска, гало и короны. Диск представляет собой как бы две сложенные краями тарелки. Он образован звездами, которые внутри этого объема движутся по почти круговым орбитам вокруг центра Галактики.

Диаметр диска измерен — он составляет приблизительно сто тысяч световых лет. А число звезд в диске приблизительно сто миллиардов.

В гало содержится сравнимое с этим число звезд. Они заполняют слегка сплюснутый сферический объем и движутся не по круговым, а по сильно вытянутым орбитам. Плоскости этих орбит проходят через центр Га-

лактики. По разным направлениям они распределены более или менее равномерно.

Диск и окружающее его гало погружены в корону. Если радиусы диска и гало сравнимы между собой по величине, то радиус короны в пять, а может, и в десять раз больше. Почему «может быть»? Потому, что она невидима — из нее не исходит никакого света. Как же узнали тогда о ней астрономы?

Корона. О короне узнали не по свету, а по создаваемому ею тяготению. Наблюдая за движением видимых звезд, излучающих радиоволны облаков газа, астрономы заметили, что на них, кроме диска и гало, действует и что-то еще. Детальное изучение позволило в конце концов обнаружить корону, которая создает дополнительное тяготение. Она оказалась очень массивной — в несколько раз больше массы всех звезд, входящих в диск и гало. Таковы сведения, полученные советским астрономом Я. Эйнасто и его сотрудниками в Тартуской обсерватории.

Конечно, изучать невидимую корону очень трудно. Из-за этого и не слишком точны пока оценки ее размеров и массы. Но главная загадка в другом — мы не знаем, из чего она состоит. Мы не знаем, есть ли в ней звезды, пусть даже и какие-то необычные, почти совсем не излучающие свет. Сейчас многие предполагают, что ее масса складывается вовсе не из звезд, а из, например, нейтрино. Эти частицы известны физикам уже давно, но и сами по себе они тоже в значительной степени остаются загадочными. Мы о них не знаем, можно сказать, самого главного — есть ли у них масса покоя или нет. Нейтрино могли бы служить материалом для короны лишь в том случае, если у них эта масса покоя есть.

Легко представить себе, с каким нетерпением ожидают астрономы вестей из физических лабораторий, где ставятся сейчас специальные эксперименты, чтобы выяснить, есть ли у нейтрино масса покоя или нет.

Мир галактик. К началу нашего века границы Вселенной раздвинулись настолько, что включили в себя всю Галактику. Многие думали тогда, что эта огромная звездная система и есть Вселенная в целом. Но вот в 20-е годы были построены крупные телескопы, и перед астрономами открылись совершенно новые горизонты.

Оказалось, что за пределами Галактики мир не кончается. Миллиарды звездных систем, галактик, похожих на нашу и отличающихся от нее, рассеяны по просторам Вселенной.

Если бы мы могли увидеть нашу Галактику извне и издалека, мы не увидели бы ни диска, ни гало, ни, естественно, короны. С больших расстояний были бы видны лишь самые яркие звезды. А все они, как выяснилось, собраны в широкие полосы, которые дугами выходят из центральной области Галактики. Ярчайшие звезды образуют ее спиральный узор. Только этот узор и был бы различим издалека. Наша Галактика на снимке, сделанном астрономом из другой галактики, выглядела бы очень похожей на туманность Андромеды.

Большинство галактик (а может быть, и почти все) собраны в различные «коллективы», которые называют группами, скоплениями и сверхскоплениями. В группу может входить всего 3 или 4 галактики, а в сверхскопление — до тысячи или даже нескольких десятков тысяч. Наша Галактика, туманность Андромеды и еще более тысячи таких же объектов входят в так называемое Местное сверхскопление. Оно не имеет четко очерченной формы и в целом выглядит довольно уплощенным. Приблизительно так же «устроены» и другие сверхскопления, лежащие далеко от нас.

До недавнего времени астрономы полагали, что эти объекты самые крупные образования во Вселенной и что какие-либо еще большие системы просто отсутствуют. Сравнительно недавно выяснилось, что это не так.

Несколько лет назад астрономы составили удивительную карту Вселенной. На ней каждая галактика представлена всего лишь точкой. На первый взгляд они рассеяны на карте хаотично. Если же приглядеться внимательно, то можно обнаружить группы, скопления и сверхскопления, которые выглядят как бы цепочками точек. Эта карта позволяет обнаружить, что некоторые цепочки соединяются и пересекаются, образуя ячеистый узор, напоминающий кружева или, может быть, пчелиные соты с размерами ячеек в 100—300 млн. световых лет.

Покрывают ли такие «сетки» всю Вселенную, еще предстоит выяснить. Но несколько отдельных ячеек, очерченных сверхскоплениями, удалось подробно изу-

чить. Внутри них галактик почти нет, все они собраны в «стенки» ячеек.

Ячейка — это предварительное, рабочее название для самого крупного образования во Вселенной. Более крупных систем в природе нет. Это показывает карта Вселенной, о которой мы говорили. Астрономия достигла, наконец, завершения одной из самых грандиозных своих задач: вся последовательность или, как еще говорят, иерархия астрономических тел и систем теперь целиком известна.

Вселенная. Самым большим по масштабу объектом науки является Вселенная, охватывающая и включающая в себя все планеты, звезды, галактики, скопления, сверхскопления и ячейки. Дальность действия современных телескопов достигает нескольких миллиардов световых лет. Это и есть размер видимой Вселенной.

Планеты, звезды, галактики поражают удивительным разнообразием своих свойств, сложностью строения. А каково устройство всей Вселенной, Вселенной как целого? Оказывается, она в высшей степени однообразна и проста. Ее главное свойство — однородность. Об этом нужно сказать точнее. Представим себе, что мы мысленно выделили во Вселенной очень большой кубический объем с ребром, скажем, в пятьсот миллионов световых лет. Подсчитаем, сколько в нем галактик. Произведем такие же подсчеты для других, но столь же крупных объемов, расположенных в различных частях Вселенной. Если все это проделать и сравнить результаты, то окажется, что в каждом из таких объемов, где бы его ни брать, содержится одинаковое число галактик. То же самое будет и при подсчете скоплений или даже ячеек.

Итак, если отвлечься от таких «деталей», как галактики, скопления, сверхскопления, ячейки, и взглянуть на Вселенную шире, охватив взглядом сразу все множество звездных миров, то она предстанет перед нами всюду одинаковой — «сплошной» и однородной.

Нужно сказать, что об этом так или иначе уже очень давно подозревали. Указывая из соображений максимальной простоты устройства на общую однородность мира, замечательный мыслитель Паскаль (1623—1662) говорил, что мир — это круг, центр которого везде, а окружность нигде. Так с помощью наглядного геометрического образа он иллюстрировал однородность мира.

В однородном мире все «места», можно сказать, равноправны и любое из них может претендовать на то, что оно центр мира. А если так, то, значит, никакого центра мира вовсе не существует.

Во все времена люди предпочитали считать Вселенную вечной и неизменной. Эта точка зрения господствовала вплоть до 20-х годов нашего века. В то время считалось, что она ограничена размерами нашей Галактики. И хотя отдельные звезды Млечного Пути могут рождаться и умирать, Галактика все равно остается все той же — как неизменным остается лес, в котором поколение за поколением сменяются деревья.

Настоящий переворот в науке о Вселенной произвели в 1922—1924 гг. работы ленинградского математика и физика А. А. Фридмана. Опираясь на только что созданную тогда общую теорию относительности, он математически доказал, что мир — это не нечто застывшее и неизменное. Как единое целое он изменяется во времени, расширяясь или сжимаясь по строго определенным законам.

Фридман открыл подвижность, динамику Вселенной. Это было общее теоретическое предсказание, а выбор между расширением и сжатием нужно было сделать на основании астрономических наблюдений. Такие наблюдения в 1928—1929 гг. удалось проделать Хабблу. Он обнаружил, что далекие галактики и целые их коллективы движутся, удаляясь от нас во все стороны. Но так и должно выглядеть — в соответствии с предсказаниями Фридмана — общее расширение Вселенной.

Конечно, это не означает, что галактики разбегаются именно от нас. Общее расширение Вселенной происходит так, что все они удаляются друг от друга, и из любого места картина этого разбегания выглядит так, как мы видим ее с нашей планеты.

Если Вселенная расширяется, то, значит, в далеком прошлом скопления и сверхскопления были ближе друг к другу. Более того, из теории Фридмана следует, что 15—20 млрд. лет назад ни звезд, ни галактик еще не было, и все вещество было перемешано и сжато до колоссальной плотности. Из такого особого состояния и началось общее расширение, которое привело со временем к образованию Вселенной, какой мы видим и знаем ее сейчас.

Диск и гало. Идея о двух подсистемах нашей Галактики — диске и гало, различающихся как геометрической формой, так и кинематикой звезд, была выдвинута в 1921 г. шведским астрономом Б. Линдбладом. Основанием для нее послужили данные о движении в пространстве близких к Солнцу звезд. Было известно, что небольшое число звезд имеют довольно значительные скорости — до 50—80 км/с, тогда как другие звезды движутся медленнее — со скоростями, которые раз в 5—6 меньше. К тому же «медленные» звезды как бы разделены на два встречных потока. Эти «медленные» звезды Линдблад отнес к диску Галактики, заметив, что наблюдаемые скорости звезд — это скорости по отношению к Солнцу, которое тоже находится в диске и движется вместе с ним. Если близкие к Солнцу звезды диска совершают совместное с ним вращение в одну сторону вокруг центра Галактики, то их скорости по отношению к Солнцу и не должны быть большими. Что же касается звезд, которые представляются нам «быстрыми», то это те звезды, которые в своей совокупности либо вовсе не участвуют во вращении вокруг центра Галактики, либо вращаются, но с заметно меньшей скоростью. Тогда их скорость по отношению к Солнцу должна представляться не малой; ее направление должно быть в таком случае перпендикулярным к направлению на галактический центр.

Соображения Линдблада получили в 1927 г. прямое доказательство в детальных и систематических наблюдениях скоростей звезд в окрестности Солнца. Эту работу провел голландский астроном Ян Оорт.

Хотя диск и вращается как целое вокруг галактического центра, все же его вращение довольно своеобразно. Оно не похоже, например, на вращение граммофонной пластинки. Угловая скорость и период обращения вокруг центра пластинки одинаковы для всех ее точек, а расстояние между точками, очевидно, не меняется при вращении. О таком вращении говорят как о твердотельном — действительно, так вращаются твердые тела. Вращение же галактического диска не является твердотельным: угловая скорость и период обращения вокруг центра зависят от радиуса галактической орбиты звезды, т. е. от ее расстояния до центра. Из-за этого, в частно-

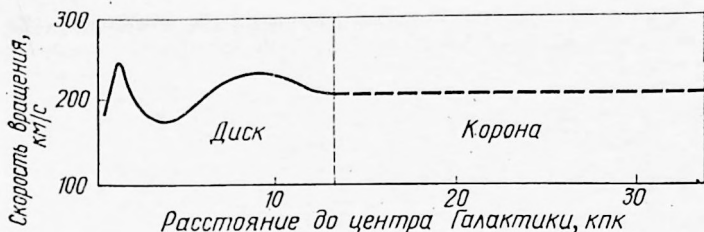


Рис. 1

сти, возникают относительные движения звезд диска, а расстояния между его «точками» (т. е. звездами), вообще говоря, изменяются при вращении.

Хорошо известный пример дифференциального вращения — вращение нашей планетной системы вокруг Солнца: планеты вращаются в одну сторону, так что имеется вращательное движение, общее для всех планет, но угловая скорость (а с ней и период обращения) зависит от радиуса орбиты планеты. Хотя полного подобия здесь и нет, но вращение диска Галактики очень похоже — своим дифференциальным характером — на вращение планетной системы. Дальнейшие исследования показали, что в районе Солнца галактический диск вращается со скоростью 220 км/с. Период вращения Солнца и других звезд, лежащих на том же расстоянии от центра Галактики, оказался равным приблизительно 180 млн. лет. Это галактический год, как его принято называть.

Линейная скорость вращения галактического диска в ее зависимости от расстояния до центра Галактики показана на рис. 1. Эту графическую зависимость астрономы называют кривой вращения Галактики. Она представляет собой результат многочисленных астрономических измерений, проведенных как по наблюдениям звезд, так и по наблюдениям межзвездной среды (облаков нейтрального водорода) в диске Галактики. Начальная часть кривой, относящаяся к области до 3—4 кпк, установлена пока не очень уверенно. Та часть кривой вращения, которая лежит за границей диска Галактики, относится уже не к звездам, а к газовым облакам и карликовым галактикам — спутникам нашей Галактики. Эти астрономические объекты находятся в области га-

лактической короны. Особый характер их движения, отражаемый плоским участком кривой вращения, и послужил в свое время указанием на наличие обширной короны Галактики. Если бы короны не существовало, то скорости этих спутников Галактики уменьшались бы с расстоянием от ее центра (по закону Кеплера — как и в случае планет, вращающихся вокруг Солнца). То обстоятельство, что эти скорости одинаковы на разных расстояниях, позволяет установить не только сам факт существования галактической короны, но и найти, как распределяется ее масса; оказывается, что плотность короны убывает с расстоянием по закону обратного квадрата.

Было бы интересно иметь что-то подобное кривой вращения и для гало Галактики. Однако данных о кинематике гало все еще слишком мало. Надежно лишь известно, что его общее вращение, во всяком случае, заметно медленнее вращения диска, и в районе Солнца линейная скорость вращения гало в 5—6 раз меньше скорости вращения диска (ср. со сказанным выше о «быстрых» звездах — это звезды гало).

Еще интереснее, очевидно, было бы узнать, вращается ли корона Галактики, и если вращается, то каким образом и как быстро, — ведь на корону, как сегодня считается, приходится почти 90% полной массы Галактики. Однако никаких непосредственных наблюдательных сведений о вращательных свойствах короны до сих пор нет; это и не так удивительно, если вспомнить, что корона невидима.

Динамика Галактики. От кинематики диска и гало Галактики перейдем к их динамике. Динамика должна указать нам на силы, управляющие движениями звезд. Она способна также объяснить связи, существующие между распределением массы, формой подсистем Галактики и особенностями их движения, прежде всего вращения. Ключом к динамике Галактики служит закон всемирного тяготения Ньютона.

Солнце и любую другую звезду удерживает на ее орбите в диске Галактики сила тяготения: эта сила «заворачивает» траекторию звезды вокруг центра диска, не дает ей быть прямолинейной, какой она была бы при отсутствии сил. Без такой силы звезды Галактики просто

разлетелись бы во все стороны. Они движутся в ограниченном объеме только потому, что притягиваются друг к другу.

Как в кинематике, так и в динамике Галактики есть немало похожего на картину движений в Солнечной системе. Планеты движутся по (почти) круговым орбитам вокруг Солнца, так как Солнце своим тяготением притягивает их к себе. Тяготение Солнца — главная причина вращательного движения планет: оно создает их ускорение, которое — по закону Ньютона — пропорционально массе Солнца и обратно пропорционально квадрату расстояния до него: $a = GM/r^2$. Здесь $G = 7 \cdot 10^{-8} \text{ г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{см}^3$ — постоянная тяготения Ньютона, одинаковая для всех тел в природе.

Если планета движется по круговой орбите радиуса r с линейной скоростью v , то соответствующее центростремительное ускорение, равное по величине отношению v^2/r , в точности равно ускорению силы тяжести, создаваемой Солнцем: $v^2/r = GM/r^2$.

Отсюда легко найти скорость кругового движения планеты по ее орбите: $v = \sqrt{GM/r}$.

Эта формула имеет универсальный вид и приложима к самым разным объектам природы. Если, например, вместо массы Солнца подставить в нее массу Земли, она будет давать скорость движения любого спутника Земли по круговой орбите. Формула точно такого вида применима и к движениям звезд в диске Галактики. Правда, в Галактике нет такого основного по массе центрального тела, как Солнце в Солнечной системе, но это не очень затрудняет дело: просто в качестве массы нужно в нашу формулу подставлять в этом случае полную массу всех звезд, находящихся внутри орбиты данного радиуса. Если, например, мы интересуемся динамикой Солнца, то в качестве величины v , стоящей в нашей формуле, мы должны понимать линейную скорость Солнца v_s на его орбите в диске, а в качестве величины r — радиус солнечной орбиты r_s . Эти две величины измерены астрономами в непосредственных наблюдениях звезд и межзвездной среды нашей Галактики. Значит, нашей формулой можно воспользоваться для определения как раз той массы, тяготение которой и удерживает Солнце

в Галактике. После простого преобразования мы получим явное соотношение для этой массы:

$$M = \frac{v_c^2 r_c}{G}.$$

Мы уже знаем, что $v_c = 220$ км/с, что $r_c = 8$ кпк. Подставляя эти величины, найдем, что внутри орбиты Солнца содержится масса * $M = 2 \cdot 10^{44}$ г $= 10^{11}$ M_\odot .

Собственно, таким путем и была впервые найдена масса нашей Галактики. Пересчитать все ее звезды и сложить их массы, конечно, невозможно. Но, как мы видим, не так уж трудно найти суммарную массу звезд — по крайней мере внутри орбиты Солнца. Вместе с тем это очень хорошая, хотя и приближенная, оценка для полной массы всех звезд Галактики, поскольку основная, подавляющая их часть заключена именно внутри солнечной орбиты.

Кинематика гало Галактики мало напоминает движения в планетной системе или в диске. Звезды гало движутся не по круговым, а по вытянутым орбитам, ориентированным хаотически в пространстве. Они заполняют почти правильный сферический (сплюснутый у полюсов) объем. Общее вращение гало медленное по сравнению с диском. В общем, картина движений звезд в гало несколько сложнее и, главное, чуть менее наглядна, чем в диске. И тем не менее даже для гало можно применять наше общее соотношение, связывающее массу, радиус и скорость. Если интересоваться гало как целым, то под массой следует понимать полную массу всех звезд Галактики — и гало, и вложенного в него диска, а под радиусом — радиус гало. Что же касается скорости, то ее роль будет играть не индивидуальная скорость каких-то отдельных звезд, а средняя скорость всех звезд гало. Об этой последней величине можно получить представление по наблюдениям нескольких десятков (а лучше сотен) звезд гало. Оказывается, что средняя величина, вычисленная по данным об индивидуальных скоростях, близка к орбитальной скорости Солнца. Ясно, что в таком случае оценка массы даст по нашей формуле снова величину порядка ста миллиардов масс Солнца.

Момент вращения. В физике вращательное движение

* $M_\odot = 2 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца.

характеризуют такими величинами, как период обращения, линейная и угловая скорость, о которых мы уже упоминали; очень важной характеристикой движения является также и момент импульса, который иногда называют еще и моментом количества движения, а в астрономии — угловым моментом или моментом вращения. Можно говорить о моменте отдельной звезды, о моменте всего галактического диска, моменте гало, моменте Галактики. В случае звезды, вращающейся вокруг галактического диска по орбите, близкой к круговой, момент представляет собой произведение трех сомножителей: массы звезды, ее линейной скорости вращения и радиуса ее орбиты. Для Солнца эта величина есть $L = M_{\odot} v_{\odot} r_{\odot} = 10^{63} \text{ г} \cdot \text{см}^2/\text{с}$.

Полезная физическая величина — удельный момент, т. е. момент, рассчитанный на единицу массы. Для Солнца это $k = L/M_{\odot} = 5 \cdot 10^{29} \text{ см}^2/\text{с}$.

Глядя на кривую вращения Галактики, можно увидеть, что удельный момент Солнца более или менее близок — по крайней мере по порядку величины — к удельному моменту других звезд диска, лежащих в интервале расстояний от 3—4 до 10—12 кпк. Момент (удельный или полный) для звезд, лежащих во внутренней области диска, в пределах 3—4 кпк от центра, заметно меньше. Так что можно определенно сказать, что главный вклад в момент всего диска должны давать звезды его среднего, основного кольца, движущегося по орбитам с радиусами от 3—4 до 10—12 кпк (на это кольцо приходится примерно половина или треть массы диска). Поэтому удельный момент для диска можно ориентировочно оценить как половину или треть от k . Что же касается удельного момента всех звезд Галактики (без короны!), то, поскольку массы диска и гало близки, а вклад гало в момент — из-за его медленного вращения — сравнительно мал, его величину можно считать приблизительно равной удельному орбитальному моменту Солнца, уменьшенному в 4—6 раз: $k \approx 10^{29} \text{ см}^2/\text{с}$.

Эта величина является главной физической характеристикой вращения Галактики. Та приблизительная оценка, которую мы здесь дали для нее, служит, конечно, лишь указанием на порядок величины. Точное определение удельного момента Галактики требует более де-

тального анализа, который, однако, осложнен рядом неопределенностей, связанных с ненадежностью или с неполнотой астрономических сведений о кривой вращения Галактики, о распределении ее массы и т. д. Вычисления, основанные на тех или иных конкретных моделях Галактики, дают для ее удельного момента значения того же порядка.

Знание момента вращения — в отличие, например, от скорости вращения — обладает существенным преимуществом: дело в том, что момент есть величина, сохраняющаяся во времени. Если на данную массу вещества не действуют никакие посторонние силы, т. е. силы, создаваемые другими, внешними телами, то величина момента не меняется, какие бы изменения ни претерпевали бы, скажем, размеры и объем этой массы. В теории образования галактик рассматривают процессы сжатия «облаков», сгущение газовых масс, которым предстоит превратиться в звездные системы. Момент вращения этих масс при таких процессах не изменяется, когда отдельное облако обособилось от других облаков и начало свою индивидуальную эволюцию. Эта эволюция существенным образом зависит от величины момента, которым обладало протогалактическое облако; моментом определяется, очевидно, и скорость вращения, которую будет иметь образовавшаяся из него галактика.

Скажем об этом немного подробнее. Представим себе какое-то большое газовое облако, масса которого сравнима с массой Галактики, а размеры превышают радиус видимых подсистем Галактики — диска и гало, — например, раз в десять. Такое облако принято называть протогалактикой. Облако-протогалактика обладает вращением, которое характеризуется определенной величиной удельного момента. Удельный момент — это всегда произведение скорости вращения на соответствующий радиус. Если начальная скорость вращения v_0 , а начальный размер r_0 , то их произведение k , составляющее удельный момент, остается постоянным при всей дальнейшей эволюции протогалактики. Протогалактика должна сжиматься под действием ее собственного тяготения, так что размер облака со временем уменьшается. Сохранение момента означает, что при новом размере r_1 скорость вращения v_1 должна быть уже иной, чтобы их произведение оставалось неизменным: $k = v_0 r_0 = v_1 r_1$.

Если размер уменьшается, то, очевидно, скорость вращения должна возрастать:

$$v_1 = v_0 \frac{r_0}{r_1}.$$

Предположим, что после уменьшения размера в десять раз газовая протогалактика превратилась в звездную систему, такую как наша Галактика. Чтобы величина v_1 была равна скорости вращения диска Галактики (в ее основном кольце) $v_1 \simeq 10^7$ см/с, начальная скорость вращения протогалактики до ее сжатия должна быть соответственно раз в десять меньше: $v_0 \simeq 10^6$ см/с. Вот такую начальную скорость вращения и должна объяснить (т. е. выяснить ее происхождение) теория образования галактик.

Сделаем еще одно замечание. Когда мы говорили о динамике диска Галактики, было сказано, что сила тяготения как бы «заворачивает» звезду вокруг галактического центра. Это действительно так; но не следует, однако, считать, что сила тяготения сообщает при этом звезде момент вращения. Сама возможность кругового движения целиком определяется наличием момента, который достался звезде от исходного вращения газовой протогалактики. Сила тяготения направлена к центру, и если бы у звезды не было момента, она бы, ускоряясь, падала под действием этой силы на центр. При наличии момента сила тяготения уже не может увлечь звезду в центр, а способна лишь постоянно изменять направление скорости звезды на ее круговой орбите, оставляя неизменной по величине линейную скорость вращательного движения.

Спиральные галактики. Наша Галактика и туманность Андромеды представляют собою гигантские спиральные галактики, очень сходные по строению и динамике. На них похожи и другие спиральные галактики, так или иначе известные и изученные к настоящему времени. Среди различных типов галактик во Вселенной спиральным принадлежит большинство. Однако далеко не все они так велики, как наша или туманность Андромеды. Спиральные галактики различаются по массам и размерам, но основная их доля приходится на звездные системы с массами около 10 млрд. масс Солнца. Такая типичная масса спиральной галактики, точнее, масса ее видимого звездного населения. Типичная спиральная галактика имеет еще и невидимую корону с массой, пре-

восходящей в 5—10 раз суммарную массу звезд. На это определенно указывают наблюдаемые кривые вращения.

Вращение спиральных галактик изучают по данным о лучевых скоростях их звезд. Это особенно легко делается тогда, когда мы видим галактику с ребра. В этом случае один край галактики приближается к нам (отрицательная лучевая скорость), а другой — удаляется (положительная лучевая скорость). Максимальные лучевые скорости, измеренные у галактики, соответствуют, очевидно, значению линейной скорости вращения на краю ее диска. Линейная скорость вращения типичной спирали в ее основном, среднем кольце обычно близка к величине $v = (0,5 \div 1) \cdot 10^7$ см/с. Соответствующий средний радиус диска $r = 2\text{—}4$ клк.

Удельный момент, характеризующий галактику в целом (с учетом массы ее гало, но без короны), можно в этом случае оценить точно так же, как это было сделано выше для нашей Галактики. В результате для удельного момента типичной спиральной галактики получим приблизительно $k \simeq (0,3 \div 1) \cdot 10^{29}$ см²/с.

Эта оценка, как мы видим, не сильно отличается от той, что была найдена для нашей Галактики.

Галактики в группах. Исследования спиральных галактик обнаруживают, что практически все они входят в группы и скопления различной кратности — от пар, триплетов и квартетов до образований, содержащих тысячи объектов. Скопления, в которых преобладают спиральные галактики (а таких большинство во Вселенной), обычно имеют клочковатое, неправильное строение, т. е. фактически состоят из более или менее изолированных группировок различных размеров и масс. Внутри пар, триплетов и групп галактики движутся под действием сил их взаимного тяготения. Такие движения совсем не похожи, например, на движение планет Солнечной системы: никакого центрального тела в группах нет, так что, вообще говоря, круговых орбит быть не может, и каждая галактика в равной мере испытывает действие со стороны всех остальных. Все же, подобно движениям в планетной системе или в звездном диске Галактики, каждая галактика в группе движется с определенным моментом вращения, который можно оценить, например, по ее скорости относительно центра

масс (центра тяжести) группы и расстояния до этого центра.

Движения галактик в группах довольно сложны, и их изучение представляет собой трудную задачу как для наблюдателей, так и для теоретиков. Здесь еще много нерешенных проблем. Можно, однако, с той или иной степенью надежности говорить о некоторых общих динамических свойствах групп галактик, основываясь на наблюдениях и общих принципах теории. Так, наблюдения довольно определенно указывают на то, что в крупных группах и скоплениях галактик отсутствует общее вращение. Хотя каждая галактика и обладает своим моментом вращения, общий момент большой группы как целого практически равен нулю. К такому выводу приводит анализ наблюдательных данных, сделанный советским астрономом И. Д. Караченцевым.

Общее вращение отсутствует, возможно, даже в парах галактик. Если пара состоит из двух спиральных галактик, то каждая обладает в этом случае двумя моментами вращения — собственным моментом вращения относительно ее оси и орбитальным моментом вращения относительно центра масс двойной системы. По данным И. Д. Караченцева и ленинградского астронома Д. А. Вернера, в большинстве пар галактик их орбитальные движения являются почти круговыми, а величины орбитального и собственного момента галактик близки друг к другу (по модулю). Очень интересен вопрос об относительной ориентации орбитального и собственного вращательного движений, об ориентации собственных вращений обеих галактик в паре. Данные на этот счет остаются пока еще не слишком определенными; однако имеются все же основания полагать, что эти движения ориентированы таким образом, что полный момент пары (орбитальный плюс собственный) действительно близок к нулю. Как считает американский астроном Дж. Хэлоу, собственные вращения галактик в парах, по-видимому, чаще противоположны по направлению. Здесь требуются еще дальнейшие тщательные исследования.

ПРЕДЫСТОРИЯ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ

Вначале был газ. Таково исходное положение, лежащее в основе современных теорий образования галактик.

В отдаленные эпохи в прошлом Вселенной то вещество, из которого состоит Земля и все, что на ней (включая, разумеется, и нас с вами, уважаемый читатель), все планеты и звезды, представляли собой газ, равномерно заполнявший всю Вселенную. Общее расширение космического вещества и развивавшиеся на этом фоне собственные движения больших газовых масс привели со временем к образованию звездных систем — галактик. Газодинамическим процессам принадлежала ключевая роль в формировании самых крупных космических структур. Скорее всего в газовой динамике нужно искать также и причину вращения галактик.

Вселенная без галактик. История Вселенной началась с события, которое — вслед за Г. А. Гамовым — называют Большим Взрывом. Этот «взрыв» произошел одновременно и повсюду во Вселенной, заполнив ее очень плотным веществом. Большой Взрыв сообщил веществу общее расширение, которое продолжается и до сих пор в виде разбегания галактик. Динамика общего космологического расширения описывается теорией, построенной в 1922 г. А. А. Фридманом. К этой теории Г. А. Гамов (который, кстати сказать, был учеником Фридмана по Ленинградскому университету) добавил в 1946—1948 гг. термодинамику: он предположил, что вещество, рожденное Большим Взрывом, было не только очень плотным, но и очень горячим. Выводы, которые следовали из этого допущения, оказались чрезвычайно содержательными и интересными; особенно важно, что они нашли в дальнейшем полное и надежное подтверждение в многочисленных астрономических наблюдениях. Космологическая теория Фридмана—Гамова служит в настоящее время тем фундаментом, на котором строятся новейшие теории происхождения космических структур.

Причина, породившая Большой Взрыв, остается до сих пор загадочной. Только в последние годы, и притом пока еще в самом предварительном виде, появились некоторые идеи и гипотезы относительно физической сути этого явления; о новейших исследованиях в этой области можно прочитать, например, в научно-популярной книге И. Д. Новикова (ученика Я. Б. Зельдовича) «Как взорвалась Вселенная» (Наука, 1988). Мы не будем здесь касаться этого интересного, но весьма сложного вопроса; для нас сейчас важно обратить внимание на ту особенность Большого Взрыва, которую подчеркивал

Зельдович: вещество ранней Вселенной было однородным, всюду одинаковым по плотности. Современная Вселенная тоже в целом однородна, но именно лишь только в целом, т. е. в среднем, по очень большим масштабам, по объемам пространства, включающим в себя много галактик и их скоплений. Ранняя же Вселенная была «с хорошей точностью», как сказано у Зельдовича, однородна во всех масштабах, вплоть до самых малых, чуть ли не до масштаба отдельных элементарных частиц, из которых состояло вещество. Это означает, что во Вселенной полностью отсутствовали тогда те очень значительные различия в плотности вещества между отдельными ее областями, которые, например, существуют сейчас между галактиками и пространством вне их.

Протоструктура. Различия по плотности распределения вещества в разных областях среды удобно характеризовать относительными величинами. Например, если речь идет о каком-то сгущении вещества, об области повышенной плотности, то можно дать этому сгущению количественную меру, указав отношение плотности в сгущении к плотности вне его или к средней плотности среды. Для современного распределения галактик эти величины таковы. Типичная плотность вещества внутри галактики $\rho_g \sim 10^{-24}$ г/см³. Средняя же плотность всего распределения галактик, т. е. та плотность, которая получилась бы при «размазывании» вещества всех звездных систем по всему занятому ими пространству, составляет $\rho \simeq (1 \div 3) \cdot 10^{-31}$ г/см³.

Галактики как структуры характеризуются контрастом плотности, т. е. относительной величиной превышения их плотности над средней плотностью: $\delta = (\rho_g - \bar{\rho}) / \bar{\rho} \simeq \rho_g / \bar{\rho} \sim (1 \div 3) \cdot 10^6$.

Контраст, как мы видим, весьма велик: галактики представляют собой такие сгущения вещества, плотность которых в миллионы раз превышает среднюю плотность. Это очень сильная неоднородность распределения вещества.

В ранней Вселенной ничего подобного не было. Но это не означает, что все ее вещество было распределено тогда идеально однородно, так что во всех масштабах контраст плотности строго равнялся нулю. Такое состояние среды принципиально невозможно, хотя бы ввиду тепловых флуктуаций в газе. Хаотические тепловые движения частиц неизбежно создают отдельные сгуще-

ния и разрежения вещества просто из-за случайного характера этих движений. По общим законам термодинамики типичный контраст плотности, создаваемый по этой причине в области пространства, которая содержит N частиц, есть $\delta_T = 1/\sqrt{N}$.

Если интересоваться масштабом галактики, т. е. рассматривать области, в которых содержится масса, скажем, в десять миллиардов масс Солнца (типичная масса спиральной галактики), то число частиц в этой области* составит $N = M_r/m \sim 10^{67}$, где $M_r = 10^{10} M_\odot \sim 10^{43}$ г — масса галактики, $m \simeq 10^{-24}$ г — масса атома водорода, самого распространенного элемента космического вещества (на него приходится приблизительно три четверти всей массы этого вещества).

При столь большом числе частиц контраст плотности, создаваемый тепловыми флуктуациями в газе, исчезающе мал: $\delta_T \sim 10^{-33}$.

Конечно, такой ничтожный контраст плотности по сравнению скажем, с контрастом для современных галактик означает, что тепловые флуктуации сами по себе фактически не способны нарушать однородность газа. Если бы в первичном веществе Вселенной имелись лишь тепловые флуктуации, его вполне можно было бы считать идеально однородным и в масштабе галактик, и (тем более) в масштабах скоплений и сверхскоплений галактик.

В действительности, однако, дело обстоит не так. Какие-то изначальные отклонения от строгой однородности неизбежно должны были существовать в ранней Вселенной и притом на уровне, который на множество порядков превышал уровень тепловых флуктуаций. Этот вывод был сделан еще в 1946 г. в работе советского теоретика Е. М. Лифшица. Это была первая основательная попытка количественно оценить степень однородности вещества в ранней Вселенной или, вернее, найти тот минимальный уровень отклонения от однородности, который смог бы послужить «затравкой» для образования галактик. Из ничего ничего и не получится; если сейчас существуют галактики с их очень большим контрастом плотности, то в догалактическую эпоху тоже имелись соответствующие сгущения вещества, хотя и с гораздо меньшим контрастом. Развиваясь и усиливаясь со временем, эти сгущения и превратились в галактики.

* Без учета скрытой массы.

Гравитационная неустойчивость. Е. М. Лифшиц смог установить точный количественный закон, по которому происходило это усиление контраста плотности в ходе общего расширения Вселенной. Физической причиной роста неоднородностей служил процесс, качественно понятый еще Ньютоном. Этот процесс называется гравитационной неустойчивостью и связан он с тем простым фактом, что гравитация, собственно тяготение вещества, тем сильнее, чем больше масса в данной области пространства, чем выше ее плотность. Тяготение стремится сжать вещество, и потому та область среды, где плотность, хотя бы и немного, повышена, оказывается со временем еще плотнее по сравнению с общим фоном. Как именно это должно происходить в расширяющемся веществе Вселенной, и объяснено в работе Е. М. Лифшица, которая сейчас по справедливости считается классической. Согласно этой работе (проверенной и подтвержденной в многочисленных работах других авторов) при возрасте Мира, например, всего в одну секунду контраст плотности в масштабе галактик или их скоплений превышал уровень тепловых флуктуаций по крайней мере на 20 с лишним порядков (т. е. более чем в 10^{20} раз). Хотя сам по себе контраст плотности и оставался при этом много меньшим единицы, это все же определенно означало наличие во Вселенной своеобразной догалактической структуры, очень сильно «возвышавшейся» по своей амплитуде над уровнем тепловых флуктуаций. Природа такого рода космической протоструктуры служит предметом углубленных исследований, основанных на современных гипотезах о рождении Вселенной и происхождении ее общего расширения (об этом также можно прочитать в уже упоминавшейся книге И. Д. Новикова).

Современные попытки объяснить образование галактик основаны на различных предположениях о природе и характере исходных догалактических структур, о конкретных путях их эволюции, о ключевых физических механизмах, ответственных за превращение «первичных» сгущений вещества в наблюдаемые космические структуры, за формирование этих структур в различных масштабах — от галактик до их скоплений и сверхскоплений.

Скажем сразу, что единой последовательной и общепризнанной теории образования галактик до сих пор не

существует. Теоретики развивают различные гипотезы, космогонические схемы, эволюционные картины, среди которых самой «продвинутой» является теория Зельдовича, о которой мы сейчас расскажем.

«Блины» Зельдовича. Теория Зельдовича опирается на предположение о том, что первоначальные сгущения вещества, усиливаемые гравитационной неустойчивостью, превращаются со временем в огромные слои газа, которые сравнимы по массе со скоплениями и сверхскоплениями галактик. Пока контраст плотности в них остается меньшим единицы, их эволюция описывается общей теорией гравитационной неустойчивости, построенной Е. М. Лифшицем. Новые физические процессы и явления «включаются» тогда, когда плотность сгущений более чем вдвое превосходит среднюю плотность, а контраст соответственно превышает единицу. Эта новая, самая важная стадия развития первоначальных неоднородностей и описывается теорией «блинов» Зельдовича. Вот как он сам говорит об этом.

«Усиление неоднородности плотности проявляется в сгущении, сжатии газообразного вещества. В трехмерном пространстве «газовое облако» могло бы сжиматься в каждом из трех взаимно перпендикулярных направлений. Однако одновременное сильное сжатие вдоль двух или трех осей — явление нехарактерное. Как правило, сжатие каждого «облака» происходит в одном выделенном направлении. Такой процесс приводит к образованию тонких слоев, их называют «блинами». Плотность вещества внутри этих слоев увеличивается по мере их сжатия. При падении новых порций газа на уже образовавшиеся «блины» они разогреваются и разрастаются в направлении своей плоскости. На более поздних стадиях «блины» начинают пересекаться. В результате формируется сложная ячеистая структура, напоминающая пчелиные соты. В этой структуре слои сжатого газа окружены областями, где газа практически нет. Размеры отдельных ячеек достигают сотни мегапарсеков, а их стенки образуются сильно уплотненными сверхскоплениями. Именно в «блинах» происходит рождение отдельных звезд, галактик и их скоплений».

К этой картине нужно добавить еще одно обстоятельство, детально изучаемое в самых последних вариантах* теории «блинов». Дело в том, что движение газа,

* Первый набросок теории Я. Б. Зельдович предложил в 1970 г.

из которого формируются слои сжатия, происходит не только под действием его собственного тяготения, но и главным образом под влиянием тяготения скрытых масс. Скрытые массы сами участвуют в гравитационной неустойчивости, контраст плотности в их распределении возрастает со временем, и они тоже создают своеобразные «блины», но только уже не газовые, а состоящие из частиц скрытой массы. Поля тяготения этих неоднородностей действуют на газ, заставляя его как бы затекать в «потенциальные ямы», создаваемые скрытыми массами.

Динамика совместных движений скрытых масс и «обычного» вещества (т. е. протонов, нейтронов, электронов), из которого формируются затем звезды и галактики, весьма сложна; она ставит перед теоретиками немало интересных конкретных задач, многие из которых успешно решаются, и в первую очередь московскими учениками Я. Б. Зельдовича Р. А. Сюняевым, А. Г. Дорошкевичем, С. Ф. Шандариным. Теория продолжает развиваться, постепенно преодолевая неизбежные сложности и затруднения. Ее окончательного и полного варианта пока не существует; она все еще сталкивается с определенными внутренними противоречиями. Наиболее серьезным из них является, по-видимому, расхождение в оценке возраста космических структур: в теории «блинов» он не превышает 12—13 млрд. лет, хотя астрономические наблюдения и ядерный космохронологический анализ последнего времени свидетельствуют скорее в пользу 15, а то и 17—22 млрд. лет. И все же главная нерешенная проблема теории «блинов», да и всей космологии, — это природа скрытой массы. Об общетеоретическом значении этой проблемы и современных попытках подхода к ее решению заинтересованный читатель может узнать из книги М. Ю. Хлопова — ученика Я. Б. Зельдовича — «Космомикрофизика» (М.: Знание, 1989).

Галактики, как предполагается, рождаются в плотных слоях газа — «блинах» при распаде, фрагментации этих слоев. Как это происходило в действительности, пока не вполне ясно. Несомненно, однако, что важнейшую роль в процессе фрагментации «блинов», в формировании сгущений галактического масштаба играла опять-таки гравитационная неустойчивость, действовавшая уже не во всей Вселенной, а в пределах отдельных слоев

уплотнения. Вместе с нею могла, скорее всего, развиваться и тепловая неустойчивость — процесс, в котором усиление неоднородностей происходит не за счет гравитации, а благодаря силам давления, возникающим из-за перепадов давления в неоднородной охлаждающейся (после первоначального нагрева «блинов») газовой среде. Как бы то ни было, «блины» должны распасться на отдельные галактики, которые погружены в остатки газа, не вошедшего в них, и скрытую массу, создающую их короны (а также, вероятно, и общее «размазанное» ее распределение в группах, скоплениях и сверхскоплениях). Все это должно было произойти через 1—2 млрд. лет после начала расширения мира.

Ударные волны. Согласно теории Зельдовича, новые порции газа, падающие на уже образовавшиеся зародыши «блинов» (т. е. на самые первые, сравнительно малые еще по массе и размеру зоны уплотнения внутри сжимающихся «облаков»), наталкиваются на почти неподвижные и гораздо более плотные слои газа. При этом натекающий газ резко тормозится: его скорость скачком падает в несколько раз. Из-за этого газ почти останавливается, довольно сильно уплотняется и разогревается. Граница между уже сжатым и падающим «свежим» газом, на которой происходит резкий скачок скорости натекающего на «блин» потока, представляет собой то, что в гидродинамике называют фронтом ударной волны.

Законы сохранения энергии, импульса и массы для газа, пересекающего фронт, обуславливают все динамические свойства этого гидродинамического явления, давно уже известного и хорошо изученного как с теоретической, так и с экспериментальной стороны. Фронты ударных волн возникают, например, при взрывах, сообщаящих большие сверхзвуковые скорости значительным массам воздуха. Они имеются и в других примерах движений, когда гидродинамические скорости превышают скорости звука в среде.

В картине «блинов» скорости натекающего газа гораздо больше скорости звука в нем; потому-то, собственно, и возникает фронт, на котором скорость уменьшается скачком. Соответствующая часть кинетической энергии газа превращается в тепло; от этого происходит разогрев газа при пересечении им фронта. Фронт — непременная и обязательная черта любого варианта тео-

рин «блинов». Фронты служат границами этих гигантских слоев сжатия. Они, вообще говоря, являются не плоскими, искривляются, соединяются и пересекаются друг с другом в сложной пространственной структуре, напоминающей, как об этом писал в цитированном выше отрывке Я. Б. Зельдович, пчелиные соты.

О сверхзвуковых движениях и ударных волнах, о гидродинамических процессах, развивающихся в потоках космической среды, содержащих такого рода разрывы и скачки скорости, давления, плотности, температуры, нам предстоит еще говорить в следующей главе. Здесь же сделаем одно замечание. Гидродинамическое описание движения газовых масс с использованием, в частности, и представлений об ударных волнах, предполагает, что частицы газа постоянно испытывают столкновения; длина их свободного пробега должна быть гораздо меньше тех пространственных масштабов, в которых происходит изучаемое движение. Во многих случаях, о которых речь шла выше, — например, внутри «блинов» — частицы газа сталкиваются друг с другом, как оказывается, очень редко, и длина их свободного пробега относительно взаимных столкновений сравнима с поперечным размером «блина». Тем не менее и в этом случае гидродинамическое описание такого «бесстолкновительного» газа возможно. Дело в том, что газ «блина» ионизован, он находится в состоянии плазмы; в плазме же частицы взаимодействуют обычно не только друг с другом, но и с многочисленными волнами, которые быстро и легко возбуждаются, скажем, при относительных движениях объемов плазмы. В таких условиях длина пробега частиц среды ограничивается уже не столкновениями их друг с другом, а их «столкновениями» с плазменными волнами. По этой причине реальная длина пробега частиц оказывается весьма малой: а раз так, то можно говорить о движениях среды на языке гидродинамики. В частности, сохраняет смысл и представление о гидродинамических разрывах и скачках. «Бесстолкновительные» ударные волны в плазме впервые изучались в работах Р. З. Сагдеева.

ВЗРЫВЫ И СТРУНЫ

Гидродинамические идеи и представления лежат в основе еще одной весьма популярной космогонической

теории, развивающейся параллельно с теорией «блинов» в последнее десятилетие. Это теория гигантских космических взрывов, предложенная американским теоретиком Дж. Острайкером и его сотрудниками.

Ключевой момент этой теории — формирование и быстрая эволюция плотных систем массивных звезд. Согласно исходной предпосылке, лежащей в основе этого подхода, гравитационная неустойчивость формирует не «блины», а сгущения меньшей массы, сравнимой с массой отдельных галактик. Эти сгущения распадаются на звезды, основная часть которых имеет массы, заметно превышающие массу Солнца. Жизнь таких звезд гораздо короче жизни Солнца, она длится лишь миллионы лет и завершается взрывом с выделением большой энергии. Звезды подобного рода в их гипотетических системах должны, как предполагается, взрываться более или менее одновременно.

По своему физическому, гидродинамическому существу эти взрывы вполне похожи на «обычные» взрывы атомных или водородных бомб и, конечно, не имеют ничего общего с Большим Взрывом. Перепад давления между областью взрыва, где взорвавшиеся звезды превратились в горячий газ, и окружающей средой с низкой температурой и плотностью создает силу, которая заставляет и горячий газ, и увлекаемый им внешний газ двигаться с большими скоростями, значительно превышающими скорость звука во внешнем газе. По этой причине в газе возникают и быстро распространяются сферические волны, фронты которых отделяют движущийся газ от внешнего покоящегося. На поверхности фронтов происходят, как это и должно быть, скачки скорости, давления, температуры и плотности среды. При этом газ, пришедший в движение, как бы «сгребается» в сравнительно тонкие сферические оболочки большой плотности и температуры. В них, как считается, могут быть заключены очень большие массы, сравнимые с массами скоплений и сверхскоплений галактик. В этом сходство оболочек Острайкера с «блинами» Зельдовича. Эти образования похожи на «блины» и тем, что их поперечный размер заметно меньше двух других размеров. И дальнейшая судьба оболочек и «блинов» должна быть похожей: им предстоит так или иначе распасться, образовав галактики, их группы, скопления и сверхскопления.

Хотя на первый взгляд теория Острайкера может показаться несколько искусственной, ее, в действительности, нельзя — по крайней мере до сих пор — опровергнуть на основании каких-либо веских соображений физического или астрономического характера. Она не без успеха конкурирует сейчас с теорией «блинов» в попытках объяснить происхождение и наблюдаемые свойства космических структур. Это не означает, что у нее нет каких-либо трудностей или противоречий с наблюдениями. Они имеются, как мы говорили, у любой известной сейчас космогонической теории. Для теории Острайкера наиболее сложным является, по-видимому, вопрос о месте и роли скрытых масс в процессе формирования галактик. Движущийся во взрывных оболочках газ не способен, кажется, достаточно эффективно сообщать движение скрытым массам; газ и скрытое вещество взаимодействуют только через гравитацию. Остается поэтому не вполне ясным, как при космических взрывах могли бы возникать невидимые короны галактик, сгущения скрытых масс в группах и скоплениях галактик. Будущие исследования покажут, преодолима ли эта трудность на пути, предложенном Острайкером. Пока что его теория остается разработанной несколько слабее, чем теория «блинов».

Стоит упомянуть и еще об одной теории, которая развивается в самые последние годы на основе идеи космических струн. Струны — объекты в гораздо большей степени гипотетические, чем даже плотные системы массивных звезд у Острайкера; они представляют собой сравнительно тонкие нити, или трубки, оставшиеся во Вселенной со времен рождения всего ее вещества. Согласно гипотезе американского теоретика А. Виленкина, струны состоят не из вещества, хотя бы даже скрытого, а из... первичного вакуума. Не будем здесь входить в сколько-нибудь подробное обсуждение удивительных и крайне необычных свойств космических струн. Скажем лишь, что по своей длине они, как считается, могут быть не меньше размеров наиболее крупных образований во Вселенной. Самое, однако, поразительное в том, что, судя по всему, струны способны создавать сильные возмущения в окружающем их обычном веществе. Согласно некоторым предположениям, струны могут создавать довольно сильное электромагнитное излучение, потоки которого заставляют окружающее их обычное ве-

шество двигаться в направлении от струн. И в этом случае возможно ускорение газа до сверхзвуковых скоростей с возникновением ударных волн и их фронтов на границах движущегося вещества. В этом процессе, как можно себе представить, возникают не плоские «блины» и не оболочки, а какие-то гигантские «макароны» — трубки малой толщины, большого диаметра и еще гораздо большей длины. Теоретики, изучающие эту диковинную картину, пытаются выяснить, каким путем из таких трубок могли бы возникнуть наблюдаемые астрономические структуры. Эта работа еще только начинается.

При всем различии исходных космологических предположений и начальных предположений современные космогонические идеи и гипотезы так или иначе сходятся в одном: на определенном этапе эволюции Вселенной в заполняющем ее газе должны были возникнуть мощные гидродинамические движения огромных масштабов. В разных теориях они вызываются различными причинами. Но во всех случаях эти движения являются сверхзвуковыми и сопровождаются появлением гидродинамических разрывов — ударных волн со скачками скорости, давления, температуры и плотности вещества на их фронтах. Похоже, что сверхзвуковая гидродинамика разрывных течений космической среды становится общей основой, на которой может быть найдено решение вопроса о происхождении галактик и их систем. Какова бы ни была предыстория таких движений, они оказываются самым важным фактором этого процесса, когда он вступает в свою решающую, финальную фазу. Эта фаза отстояла от начала космологического расширения приблизительно на один миллиард лет.

ПРИРОДА ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК

В 1644 г. Декарт выдвинул идею о существовании в далеком прошлом протосолнечной туманности — вращающегося, завихренного облака газа и космической пыли, в центре которого в свое время сформировалось Солнце, а на периферии — планеты с их спутниками. Это была первая в истории научная космогоническая концепция. Обогащенная трудами классиков космогонии Канта, Лапласа, Джинса, она остается в центре космогонических исследований и дискуссий почти три с по-

ловинной столетия. Вместе с тем она служит примером и образцом для новейшей космогонии, предметом которой, наряду с Солнечной системой, стали теперь звезды, галактики, крупномасштабная структура Вселенной. Мысль о том, что не только Солнечная система, но и вращающиеся галактики родились из завихренных сгустков космической среды, высказывали в 50-е годы нашего века К. Ф. фон Вейцеккер и Г. А. Гамов.

Вихревая космогония. К. Ф. фон Вейцеккер говорил о быстро вращающихся спиральных галактиках как о замороженных вихрях. Заморозила «каждую галактику» собственная гравитация ее вещества, которая связала и обособила протогалактический вихрь, выделив его из сплошной завихренной космической среды. Эта идея, ясная и красивая в своей наглядности, немедленно вызывает вопрос: а откуда взялись сами космические вихри галактических масштабов? Автор теории горячей Вселенной Г. А. Гамов считал, что ответ должен быть такой: вихри существовали во Вселенной изначально; они родились вместе с самой Вселенной и обязаны своим происхождением той самой причине, которая породила и общее космологическое расширение. Причина эта в действительности не была известна; неизвестна она по настоящему и до сих пор.

Но важнее в данном случае другое: изначальные вихри несовместимы с изотропным расширением Вселенной. Это обстоятельство было выяснено в конце 60-х годов в работах Л. М. Озерного и автора. Детальному изучению ранней Вселенной с точки зрения ее вращательных гидродинамических свойств были посвящены работы Я. Б. Зельдовича и И. Д. Новикова, Г. В. Чибисова, А. А. Курскова, а также Х. Сато и его коллег в Японии, Э. Харрисона, Дж. Пиблса (США), М. Риса, Б. Джонса (Англия) и других теоретиков. Как выяснилось, гидродинамика ранней Вселенной может быть сколь угодно богатой и сложной; одно только в ней строго исключено — изначальные, первичные вихри. Ничего не меняет в этом отношении гравитационная неустойчивость, способная усиливать малые отклонения от общей равномерности в распределении плотности космической среды и скорости ее расширения. Исходные протоструктуры, служащие «затравками» для гравитационной неустойчивости, сами изначально являются безвихревыми и остаются таковыми при дальнейшей своей эволюции под

действием сил тяготения. Из этого исходят как в теории «блиннов», так и в других современных теориях происхождения космических структур.

Когда же и как возникли протогалактические вихри, если они не могли существовать извечно? В 1970 г. автор высказал предположение о том, что вращательные движения галактических масштабов рождаются во Вселенной тогда, когда в ней появляются сильные сверхзвуковые движения с разрывами и ударными волнами. Эти движения, первоначально безвихревые, сами собой порождают вихри и питают их своей энергией. Такого рода процессы генерации завихренности известны в гидродинамике уже давно. Наша идея состояла в том, чтобы перенести их в космологию и проверить, способны ли они эффективно развиваться в конкретных физических условиях ранней Вселенной.

Как мы уже говорили, современные теории образования крупномасштабной космической структуры так или иначе связаны с сверхзвуковой гидродинамикой. Крупномасштабные сверхзвуковые движения играют в них основную, ключевую роль: они возникают при возрасте Мира около одного миллиарда лет и создают слои уплотнения, в которых происходит формирование наблюдаемых космических систем. В теории «блиннов» причиной появления сильных движений служит гравитационная неустойчивость; в теории гигантских взрывов космический газ приходит в движение и сильно разгоняется перепадами давления, создаваемыми при взрывном энерговыделении; в теории космических струн газ быстро движется под напором излучения, генерируемого струнами. Причины различны, различна и геометрия движений. Но неизбежными элементами любой гидродинамической картины такого рода должны быть разрывы и ударные волны. И столь же неизбежна в этих условиях генерация вторичных вращательных гидродинамических движений.

Стоит в этом смысле подчеркнуть, что идея рождения протогалактических вихрей сама по себе не является отдельной, дополнительной гипотезой, присоединяемой специально к той или иной космогонической теории, чтобы объяснить вращение галактик. Это прямое следствие и неотъемлемая черта сверхзвуковой гидродинамики как единого явления, формирующего весь комплекс космических систем. Те самые потоки вещества, кото-

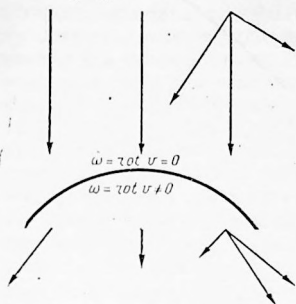


Рис. 2

рые порождают сгущения всех масштабов, обеспечивают и рождающиеся галактики их быстрым вращением. В сверхзвуковой гидродинамике берут начало и сильные неоднородности плотности, и их собственные движения, составляющие вместе общую динамическую картину космических структур большого масштаба.

Конкретные вопросы, связанные с особенностями генерации вихрей в многообразных условиях сверхзвуковой космической гидродинамики, изучались в последние почти 20 лет в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе АН СССР и Педагогическом институте им. А. И. Герцена в Ленинграде, в других научных учреждениях в нашей стране и за рубежом. Общим итогом этих исследований является доказательство достаточной эффективности процесса: различные по своему характеру крупномасштабные движения, предполагаемые в современных космогонических теориях, оказываются одинаково благоприятными для рождения протогалактических вихрей. Применительно к теории «блинов» этот результат позволил Я. Б. Зельдовичу сказать в одном из его последних обзоров, что теперь «удается успешно решить проблему вращения галактик».

Фронты и вихри. Каков же физический механизм рождения завихренности в разрывных движениях газа? Рассмотрим сначала один пример, дающий простой и наглядный ответ на этот вопрос. Пусть имеется гладкий параллельный поток газа, который натекает на фронт ударной волны. Допустим, что этот фронт не плоский, а выпуклый (рис. 2). На фронте поток испытывает раз-

рыв, он перестраивается: по общим законам гидродинамики (следующим из условий сохранения энергии, импульса и массы) перпендикулярная фронту составляющая скорости потока уменьшается скачком, касательная же ее компонента остается неизменной. По этой причине после пересечения фронта поток уже не будет параллельным, он станет расходящимся. Представим себе «щепку», брошенную в такой поток. Перед фронтом она будет сноситься потоком параллельно самой себе. Но после фронта она будет еще и поворачиваться. Это указывает на то, что и сам поток получает вращение, когда он пересекает фронт.

В гидродинамике количественной мерой вращения служит величина, называемая вихрем и вычисляемая как ротор скорости потока: $\omega = \text{rot } v$. Вихрь является вектором с компонентами (в прямоугольных декартовых координатах x, y, z):

$$\omega_x = \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z}; \quad \omega_y = \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x}; \quad \omega_z = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}.$$

Как мы видим, вихрь определяется через частные производные от скорости по пространственным координатам. В случае одномерного течения — скажем, вдоль координаты x — вихрь может быть отличен от нуля, если v_x зависит от поперечных к скорости координат y или z . При зависимости скорости только от координаты y у вихря будет иметься лишь z -компонента:

$$\omega_z = - \frac{\partial v_x}{\partial y}.$$

В примере, который мы только что рассмотрели, перед фронтом вихрь равен нулю, так как имеется лишь одна компонента скорости — например, x -компонента, не зависящая от поперечных к ней координат. За фронтом, очевидно, имеется уже и y -компонента скорости, а x -компонента зависит от поперечной к ней координаты: поэтому вихрь за фронтом отличен от нуля и направлен вдоль оси z .

В гидродинамике известна формула Труделла—Лайтхилла, которая дает очень простое соотношение для абсолютной величины вихря:

$$\omega = \frac{(\rho_2 - \rho_1)^2}{\rho_2 \rho_1} \frac{v_t}{R}.$$

Здесь ρ_1 и ρ_2 — плотности газа соответственно до фронта и после него, причем обычно $\rho_2 = 4\rho_1$; v_t — касательная к фронту компонента скорости, R — радиус кривизны фронта. Если в нашем примере поверхность фронта считать частью цилиндра радиуса R , то радиус цилиндра и будет служить радиусом кривизны фронта. Из этой формулы видно, что вихрь появляется на фронте в любой его точке, где поверхность фронта искривлена и неперпендикулярна натекающему на нее потоку.

А. Г. Дорошкевич, ученик Я. Б. Зельдовича, рассмотрел применительно к теории «блинов» пример, в некотором смысле противоположный тому, который мы только что описали. Пусть фронт ударной волны является не искривленным, а плоским. Что же касается натекающего на него потока, то газ в нем движется не строго по параллельным линиям. Тем не менее все три компоненты вихря в нем равны нулю. Для простоты можно считать, что у потока имеются лишь компоненты скорости v_x и v_y , зависящие от y и x соответственно, но так, что

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial y}.$$

Плоскость фронта при этом параллельна плоскости (zy). Тогда при пересечении фронта скачком уменьшается компонента скорости v_x , а компонента v_y остается неизменной, так как первая из них перпендикулярна, а вторая параллельна фронту. По этой причине написанное выше равенство производных, которое обеспечивало нуль вихря до фронта, разрушается на фронте, и поток за фронтом оказывается завихренным. Такую картину позднее изучали также С. Ф. Шандарин и тартуский теоретик Э. М. Саар.

Вихрь и момент. Вращение можно характеризовать как вихрем, так и величиной вращательного момента, о котором мы говорили во второй главе брошюры, когда обсуждали вращательные свойства галактик. Связь между вихрем и моментом можно пояснить на примере твердотельного вращения, т. е. вращения с постоянной угловой скоростью. Если эта угловая скорость есть Ω , то легко видеть (проделав вычисления по общим формулам для компонент вихря, которые мы выше приводили), что вихрь $\omega = 2\Omega$. Момент твердотельно вращающегося тела массы M с размером l есть $L \sim M\Omega l^2$ с точностью до

коэффициента (обычно близкого к единице), зависящего от формы тела и распределения плотности в нем. Отсюда видно, что с той же точностью можно было бы написать $L \sim M\omega l^2$.

Конечно, реальные вихревые движения жидкостей и газов гораздо сложнее по своему характеру, чем твердотельное движение. В общем случае сложнее и связь между вихрем и моментом. Тем не менее приближенное соотношение, которое мы только что записали, остается пригодным практически всегда для ориентировочной количественной оценки момента, соответствующего данному вихрю. Так, в нашем примере рождения вихря на искривленном фронте ударной волны момент, приобретенный средой, можно было бы приближенно оценить следующим образом.

Пусть скорость перед фронтом есть v . Ее касательная к фронту компонента в том месте потока, где она показана на нашем рисунке (не слишком близко к центральной линии — оси симметрии картины), раза в два меньше: $v_1 \simeq v/2$. Чтобы теперь воспользоваться формулой Трузделла—Лайтхилла для вихря, остается подсчитать коэффициент, выражающийся через плотности (учтем, что $\rho_2 = 4\rho_1$). Тогда для вихря за фронтом получим

$$\omega \simeq \frac{9}{4} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{v}{R} \simeq \frac{v}{R}.$$

Если рассмотреть небольшую область за фронтом размера $l < R$ (тоже в стороне от центральной линии), то при массе этой области $M \sim \rho_2 l^3$ заключенный в ней момент

$$L \sim \rho_2 l^3 \cdot \frac{v}{R} l^2 = \rho_2 v \frac{l^5}{R}.$$

Удельный момент, т. е. момент единицы массы, есть $k \sim vl^2/R$. Допустим теперь, что фронт ударной волны служит границей огромной области уплотнения, содержащей в себе массу вещества, сравнимую с массой большого скопления или сверхскопления. Эта масса, можно считать, приблизительно в тысячу раз больше массы отдельной галактики. Соответственно размеры этого образования должны быть раз в десять больше размера протогалактики (так как масса приблизительно пропорциональна кубу размера). Пусть размер протогалактики

есть l , тогда размеры всего образования $\sim 10l$. Если принять еще, что последняя величина не слишком сильно отличается от радиуса кривизны фронта, т. е. $R \sim 10l$, то в соответствии с нашей приближенной формулой для удельного момента найдем, что вихрь, рожденный на фронте, создает в рассматриваемой области за фронтом удельный момент $k \sim 10^{-2}vl$.

Чтобы довести до конца эти оценки, вспомним, что типичная протогалактика должна иметь размер $\sim 10^{23}$ см и линейную скорость вращения $\sim 10^6$ см/с. Такой скорости и размеру отвечает удельный момент $\sim 10^{29}$ см²/с. Может ли удельный момент, связанный с нашим вихрем, иметь такую величину? Как видно из полученного выше соотношения, это действительно возможно, если скорость исходного движения достаточно велика: $v \sim 10^3$ см/с.

Скорости именно такого порядка величины и фигурируют в теории «блинов», а также в теориях взрывов и струн. Столь большие скорости — тысяча километров в секунду! — способны остановить космологическое расширение в объемах, которые содержат массы скоплений или сверхскоплений, и осуществить сжатие этих масс в огромные сгущения, подобные «блинам», оболочкам или трубкам гигантских размеров.

Приближенная количественная оценка, которую мы здесь воспроизвели, конечно, весьма груба. Но с таких оценок начинается всякое теоретическое исследование. И если оценки благоприятны, то приступают к более строгим и, естественно, более сложным расчетам. Чаще всего в таких сложных вычислениях используются ЭВМ.

Структура завихренности. Перейдем от простых примеров и приближенных оценок к описанию точных количественных моделей, в которых отражаются принципиальные черты процесса возникновения вращения в различных физических условиях, создаваемых в космической среде сверхзвуковыми разрывными течениями. Эти результаты получены в совместных исследованиях с ленинградскими теоретиками Д. И. Бараусовым, П. А. Войновичем, А. Л. Грозовым, А. С. Зильберглейтом, Э. А. Троппом, А. Ю. Ушаковым.

В крупномасштабном потоке, натекающем на фронт ударной волны масштаба скопления или сверхскопления, могут (или, скорее, даже должны) быть те или иные слабые неоднородности плотности, сгущения и разрежения

вещества в масштабе отдельных галактик. Какова судьба неоднородностей с небольшим контрастом плотности ($\delta < 1$) после пересечения ими фронта? Для ответа на этот вопрос был произведен модельный расчет на ЭВМ. Пусть имеется сферическое сгущение вещества, «впечатанное» в общий параллельный поток, натекающий на фронт ударной волны. Искривлением фронта в масштабе сгущения пренебрежем (это возможно, когда радиус сгущения много меньше радиуса кривизны фронта) и будем считать фронт плоским. Никакого вращения в исходном потоке нет. Но за фронтом, как показывает расчет, возникает сложная картина завихренности.

На рис. 3 показана структура течения в сечении плоскостью, содержащей ось симметрии потока. Она включает в себя два основных элемента: сгущение, сжатое на фронте вдоль направления движения, и систему линий тока*, отражающую характер возникшей на фронте завихренности. Имеются как бы два «буруна», расположенных по краям сгущения. Но это только в сечении. Трехмерная картина сложнее (рис. 4). Когда сжатый за фронтом газ распадается на отдельные протогалактические сгустки, они «делят» между собой тот вихрь и тот угловой момент, которыми обладает вся эта динамическая структура. Как показывает типичный вариант расчета, фрагмент, имеющий галактическую массу, может получить удельный момент $k = 3 \cdot 10^{30} \delta \text{ см}^2/\text{с}$. Отсюда видно, что при не слишком малом исходном контрасте плотности эта величина вполне может иметь значение $\sim 10^{29}$, типичное для спиральных галактик.

В серии наших расчетов этот результат подтверждается для исходных сгущений более или менее произвольной геометрии. Во всех случаях скорость исходного основного потока принималась равной уже упомянутой выше характерной величине $\sim 10^8 \text{ см/с}$.

Вихри Фридмана. Процесс, который мы сейчас рассмотрим, отличается от всего до сих пор рассказанного тем, что фронт ударной волны, формирующей крупномасштабное сгущение («блин», сферическую оболочку или трубку), сам по себе в расчете не будет фигуриро-

* Это линии, касательные к которым дают направление скорости движения в данной точке. На рисунке линии тока представлены в системе отсчета, движущейся вместе с основным потоком среды.

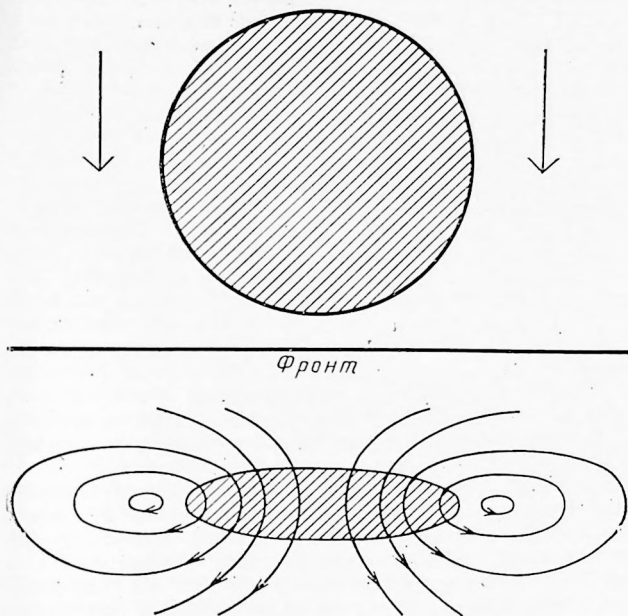


Рис. 3

вать. Важно, однако, то обстоятельство, что в области сжатия за фронтом осуществляется особое состояние среды: давление в ней всюду одинаково, а температура и плотность неоднородны и зависят от поперечной к фронту координаты. Это, как оказывается, может служить причиной генерации завихренности в этой области.

Законы рождения вихрей в гидродинамике формулируются весьма общей теоремой Кельвина—Гельмгольца. Точнее, это теорема об условиях сохранения вихря. Она утверждает, что вихри не исчезают и не появляются, если выполнены следующие четыре условия:

- 1) на жидкость или газ либо не действуют внешние

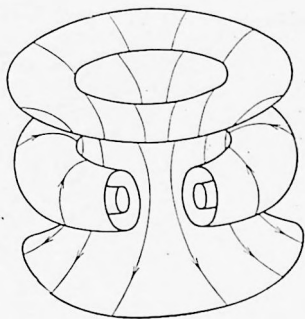


Рис. 4

силы, либо эти силы потенциальны (т. е. ротор силы равен нулю);

2) в среде отсутствует вязкость;

3) в потоке отсутствуют разрывы (ударные волны);

4) давление среды есть функция только ее плотности: это свойство среды называют баротропией.

Основная сила, действующая во Вселенной, — сила тяготения — является именно потенциальной и потому, согласно первому из условий, она сама по себе не может создавать или уничтожать вихри. Что касается вязкости, то в потоке без твердых стенок она способна лишь гасить вихри, но не порождать их. Как рождаются вихри при нарушении третьего условия теоремы, мы только что показали. Наконец, обсудим четвертое условие — менее наглядное, чем первые три. Именно оно и может нарушаться в областях сжатия за фронтами ударных волн.

В этом случае процесс рождения вихря управляется уравнением Фридмана. Основоположник современной космологии, классик теоретической метеорологии А. А. Фридман вывел это уравнение из общих гидродинамических уравнений движения сжимаемого газа специально для случая, когда среда оказывается не баротропной. Он изучал вопрос о циклонах — крупномасштабных атмосферных вихрях, и это уравнение описывало их зарождение и эволюцию. В несколько упрощенном виде уравнение Фридмана можно записать так:

$$\frac{d\omega}{dt} = \rho^2 [\nabla \rho \times \nabla p].$$

Здесь слева стоит производная от вихря по времени.

Если эта производная равна нулю, вихрь не рождается и не уничтожается. Если она отлична от нуля, происходит изменение вихря и, в частности, его усиление или даже рождение от нуля. Вихрь — векторная величина, и само уравнение Фридмана тоже векторное. В его правой части стоит векторное произведение двух векторов — градиента плотности $\nabla \rho$ и градиента давления ∇p . Векторное произведение, а с ним и производная по времени от вихря отличны от нуля, когда векторы $\nabla \rho$ и ∇p наклонены друг к другу. Чаще всего в гидродинамике эти векторы просто параллельны, так как давление в этих случаях является функцией одной только плотности. (Например, в идеальном газе при адиабатическом процессе $p = A(\gamma - 1)\rho^\gamma$, где $A = \text{const}$, γ — показатель адиабаты.) Но в среде, где имеется градиент (т. е. перепад) плотности, возможно, например, распространение звуковых волн поперек направления, в котором изменяется плотность. В этом случае появляются — хотя бы и слабые — перепады давления в поперечном направлении, и тогда градиент давления в поперечной звуковой волне образует с исходным градиентом плотности среды отличное от нуля векторное произведение. В этом случае согласно уравнению Фридмана обязательно возникает и вихрь: звук рождает вращение среды.

Рассмотрение этого процесса применительно к условиям внутри «блинов» (а также сферических оболочек и трубок) приводит к интересным теоретическим задачам. Оно показывает, что слабые возмущения, способные распространяться в этих образованиях наклонно к перепаду плотности, вносят в среду вихрь и момент вращения, вполне достаточные для обеспечения будущих галактик быстрым вращением. Удельный момент в масштабе галактики оказывается равным $k \simeq 6 \cdot 10^{32} \delta \text{ см}^2/\text{с}$. Здесь $\delta < 1$ — контраст плотности в любом первоначально безвихревом гидродинамическом возмущении (не обязательно только типа звуковой волны) внутри области сжатия.

Привлекая эти соображения к объяснению вращения галактик, мы как бы переносим фридмановские вихри из его метеорологии в его космологию.

Столкновение ударных фронтов. В теории космических взрывов, развиваемой Острайкером, допустима, а может быть, и весьма вероятна ситуация, когда гигантские сферические оболочки, порожденные соседними

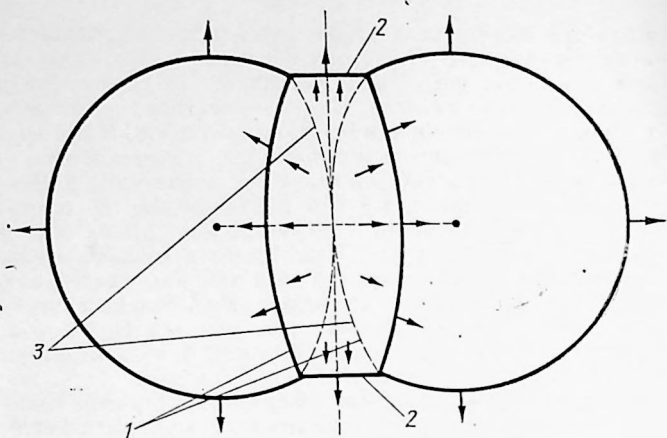


Рис. 5. Отраженные (1), маховские (2) фронты и тангенциальные разрывы (3) в зоне взаимодействия сферических ударных волн взрывами, сталкиваются между собой. Точно так же и в теории космических струн можно ожидать столкновения соседних гигантских трубок. В обоих случаях происходит мощное взаимодействие налетающих друг на друга ударных фронтов.

Динамическая структура зоны взаимодействия фронтов (см. рис. 5) довольно сложна. Она включает в себя прежде всего два расходящихся в разные стороны фронта — это возвратное, отраженное движение тех участков каждого из фронтов, которые при столкновении пришли в прямой контакт друг с другом. Далее, имеются два добавочных фронта, называемых в гидродинамике фронтами Маха, которые ограничивают зону взаимодействия в поперечных (к первоначальному движению) направлениях. При столкновении сферических ударных волн они образуют замкнутое кольцо; при столкновении цилиндрических фронтов маховские фронты представляют собой две параллельные плоскости. Наконец, важнейшим динамическим элементом этой картины являются два тангенциальных разрыва. Тангенциальный разрыв — это поверхность, на которой происходит скачок касательной к ней компоненты скорости (а не перпендикулярной, как на ударном фронте).

В гидродинамике давно уже установлено, что тангенциальный разрыв абсолютно неустойчив. Он распадается, порождая на том месте, где он первоначально возник, широкую полосу завихрения. В этой полосе присутствуют вихри разных масштабов, в которые переходит — при развитии неустойчивости — кинетическая энергия относительного движения среды по разные стороны поверхности разрыва. Расчет на ЭВМ позволяет установить, что самые крупные из этих вихрей, содержащие в себе больше всего энергии, охватывают массы, сравнимые с массами типичных галактик. Каждый из этих вихрей обладает удельным моментом

$$k \simeq 10^{30} \left(\frac{E}{E_0} \right)^{1/2} \text{ см}^2/\text{с}.$$

Здесь E — энергия, выделенная при взрыве (для простоты считалось, что взрывы одновременны и одинаковы по мощности энерговыделения), $E_0 = 10^{62}$ эрг — характерная энергия взрыва, фигурирующая в теории Острайкера. Как видно из нашей формулы, типичный галактический момент $\sim 10^{29}$ см²/с здесь вполне достигим.

К сожалению, ни в «ручных» расчетах, ни даже на ЭВМ не удастся достаточно детально проследить сам процесс выделения вихрей в полосе тангенциального разрыва; здесь возникает очень сложное и запутанное движение, называемое турбулентностью. В гидродинамике изучение турбулентности составляет целую область со своей особой системой понятий, гипотез и идей. Стоит заметить, что А. А. Фридман и в эту область внес значительный вклад, заложив основы статистической теории турбулентности (в работе, выполненной совместно с Л. В. Келлером).

Идеи и образы гидродинамической турбулентности активно использовали Г. А. Гамов и К. Ф. фон Вейцеккер в своих вариантах вихревой космогонии. То динамическое состояние среды, которое возникает и развивается в зоне взаимодействия ударных фронтов, очень напоминает «сверхзвуковую турбулентность», о которой говорили в 50-е годы эти исследователи. Они постулировали тогда возможность этого состояния; теперь мы видим, как оно могло бы реализоваться в действительности в конкретных космологических условиях.

Развитие турбулентности следует ожидать и в других рассматриваемых нами явлениях генерации вихрей.

Например, в потоке газа, натекающего на фронт крупномасштабной ударной волны, может иметься большое число различных по амплитуде и масштабу неоднородностей плотности. Каждое из них вызывает появление за фронтом вихря, описываемого нашей моделью (см. рис. 3, 4). В своей совокупности рожденные таким путем вихри образуют сложную систему движений, бурную и беспорядочную в целом, т. е. турбулентную. Сходным путем можно представить себе возникновение турбулентности и внутри слоя сжатия, когда различные гидродинамические возмущения, развиваясь с нарушением условия баротропии (четвертого условия теоремы Кельвина—Гельмгольца), создают в среде сложную систему фридмановских вихрей. Рождение и усиление этих вихрей тоже представляет собой, по существу, гидродинамическую неустойчивость.

Возникновение вихревой турбулентности при гидродинамической неустойчивости — явление довольно общего порядка. Нужно думать, что оно способно осуществляться фактически в любой картине формирования крупномасштабной структуры, привлекающей сверхзвуковую гидродинамику в качестве ключевого процесса. Общей закономерностью здесь является рождение и усиление вихрей масштаба галактик за счет энергии движений более крупных масштабов, соответствующих скоплениям и сверхскоплениям.

Динамика облаков. Крупномасштабные области уплотнения — «блины», оболочки, трубки — рано или поздно должны испытать фрагментацию, распад на отдельные сгустки, которым предстоит затем превратиться в галактики и их системы. Фрагментация, да еще с учетом сложных вихревых движений среды, — очень сложное для описания и анализа явление. Определенная наглядность этой картине может быть все же придана, если воспользоваться образом «облаков», т. е. тех или иных сгущений, вообще говоря, неправильной формы, которые погружены в среду сравнительно низкой плотности и движутся в ней. Распад областей уплотнения приводит к рождению большого многообразия такого рода облаков различных масс и размеров, которые обладают и поступательными и вращательными движениями. При своих поступательных движениях облака могут сталкиваться между собой, слипаться или, напротив, дробиться. Сложная динамика облаков включает в себя также

и собственное их сжатие, сопровождающееся в дальнейшем фрагментацией с образованием внутри них более мелких облаков, тоже движущихся и сталкивающихся между собой; и эти малые облака могут при столкновении слипаться и дробиться, испытывать собственное сжатие и т. д. Можно говорить о целом каскаде распадов и столкновений, который в конечном итоге ведет к формированию всей иерархии звездных систем.

В этой картине столкновения облаков играют роль важнейшего «элементарного» процесса. Эти столкновения являются сверхзвуковыми: относительные скорости облаков больше скорости звука в их собственном материале. По этой причине такие столкновения не похожи на упругие столкновения бильярдных шаров. Налетая друг на друга, газовые облака порождают друг в друге ударные волны, на фронтах которых происходит превращение в тепло части кинетической энергии их первоначального относительного движения. Облака из-за этого разогреваются. Вместе с тем они «сминаются», уплотняются.

Как уже говорилось, два столкнувшихся облака могут слипнуться и образовать новое, более крупное облако. Очень важно, что образовавшееся таким путем облако может обладать весьма быстрым вращением, даже когда никакого собственного вращения у облаков первоначально и не было. Если столкновение облаков является не центральным (т. е. их сближение происходит не строго лоб в лоб), часть момента, связанного с их относительным движением, может перейти в момент собственного осевого вращения итогового сгустка. Очевидно, происхождение вращения из поступательных движений заслуживает изучения с точки зрения динамики протогалактик.

Мы моделировали процесс столкновения и слипания газовых облаков протогалактического газа на ЭВМ. Цель состояла в том, чтобы проверить, действительно ли возможны неупругие столкновения, сопровождающиеся слипанием с образованием вращающегося протогалактического сгущения. Оказалось, что этот процесс на самом деле достаточно эффективен. Если, например, сталкиваются два газовых облака с размерами $\sim 10^{23}$ см и с массами, близкими к массам гигантских галактик, то их нецентральный удар друг о друга приводит к формированию из их материала (с потерей части газа) но-

вого сгущения, обладающего удельным моментом $\sim 10^{29}$ см²/с.

Стоит заметить, что вращение внутри результирующего сгустка распределено не так, как в твердом теле. Это вращение дифференциальное, причем внутренняя часть сгустка почти не вращается, так что основная доля момента приходится на его периферию. Возможно, это обстоятельство способно повлиять на динамическую структуру галактики, формирующейся из такого сгущения. Центральная его область могла бы дать начало медленно вращающейся сферической подсистеме, а периферия — после сжатия и оседания к центральной плоскости — могла бы превратиться в быстро вращающийся диск.

Итак, в картине сталкивающихся облаков вращательные движения с нужной величиной момента действительно возникают из поступательных движений. Но каково происхождение и сам характер первоначального поступательного движения? Можно представить себе, например, такую картину. Пусть какая-то часть общей области уплотнения распалась на несколько фрагментов — облаков. Эти облака не могут, очевидно, стоять на месте — они обязательно приходят в движение — хотя бы уже под действием их взаимного тяготения. Облака притягиваются друг к другу, но сближение двух облаков происходит не без влияния притяжения облаков-соседей. Поэтому-то два облака движутся друг к другу не по прямой и сталкиваются затем не лоб в лоб. Необходимое условие передачи момента — нецентральный характер столкновений двух облаков — обеспечивается просто наличием в близкой окрестности третьих тяготеющих тел.

Динамика системы нескольких тяготеющих тел тоже может быть промоделирована на ЭВМ. Соответствующие результаты показывают, что даже из исходного состояния, в котором облака покоятся, со временем развивается их сложное относительное движение, весьма часто приводящее к нецентральным сближениям.

Вспомним здесь и о скрытых массах. Пока речь шла только о гидродинамике, в которой тяготение не играло особой роли, о них мы не упоминали. Теперь же нужно сказать, что наличие скрытых масс заметным или даже определяющим образом влияет на движения облаков-фрагментов. Проиллюстрируем это простым при-

мером. Пусть имеются два облака, покоящиеся в начальный момент где-то на границах сферического сгущения скрытой массы. В следующие моменты времени они начнут двигаться к центру распределения скрытой массы под действием ее тяготения. При этом они будут и сближаться друг с другом. Легко представить себе, что они могут и столкнуться вблизи центра скрытой массы, причем имеется очевидная возможность того, что это столкновение будет нецентральным.

В этих наглядных примерах в начальном состоянии облака лишены всякого движения; затем возникают их поступательные движения, а после столкновения появляется и вращательное движение результирующего сгустка. Можно сказать, что быстрое вращение берется здесь, если угодно, как бы из ничего.

* * *

Подводя итог, заметим, что разнообразные динамические явления, развивающиеся в космической среде в эпоху образования крупномасштабных космических структур, способны, как мы видели, «обеспечить» галактики быстрым вращением. Однако относительная роль каждого из этих явлений в реальных космогонических процессах остается все еще далеко не ясной. До сих пор не существует общей космогонической концепции, которая объясняла бы происхождение всего комплекса космических структур большого масштаба. Три конкурирующие теории, о которых мы постоянно упоминали выше, еще далеки от совершенства; они развиваются и углубляются, но никто не возьмется сейчас предсказать, какая из них (а возможно, какая-то четвертая?) выйдет победителем в их соревновании. При всей неопределенности такого рода мы можем тем не менее довольно уверенно говорить вместе с Я. Б. Зельдовичем, что проблеме вращения галактик «удается успешно решить». Об этом мы и стремились рассказать в нашей брошюре.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ: ПРИБЛИЖЕНИЕ К ИСТИНЕ, ИЛИ АНЗАЦ ЗЕЛЬДОВИЧА

Эту брошюру, посвященную памяти Я. Б. Зельдовича, хотелось бы завершить несколькими страницами воспоминаний о встречах и беседах с ним.

8 марта 1965 года в день рождения Зельдовича немногочисленные молодые сотрудники Якова Борисовича в Институте прикладной математики (ИПМ), к которым на время стажировки присоединился и я, в веселом поздравлении пожелали ему еще до конца года покончить с проблемой образования галактик, а заодно и раскрыть загадку квазаров. Обе эти темы, как известно, глубоко занимали Зельдовича. Квазары были открыты в 1963 году; проблема происхождения галактик ждала своего решения с середины 20-х годов, когда была установлена природа внегалактических туманностей как гигантских звездных систем. В нашем пожелании шуточными и несерьезными были, пожалуй, только сроки, а по существу оно точно соответствовало устремлениям именинника и в дальнейшем сбылось. Зельдович оказался среди первых, кто указал на черную дыру как на генератор энергии в ядре квазара. Сегодня мало кто сомневается, что так оно в действительности и есть. И самый крупный вклад в современную космогония галактик принадлежит Зельдовичу — это его знаменитая теория «блинов».

«Блины» начались с короткой заметки, которую еще в рукописи Я. Б. показывал летом 1969 года. В ней было дано точное нелинейное ньютоновское решение, описывающее развитие гравитационной неустойчивости в расширяющемся мире. Решение одномерное и плоское (для возмущения), частное (одна произвольная функция одной декартовой переменной). Общего четырехмерного решения найти не удалось и до сих пор. А тогда Зельдович сделал смелое предположение: временное поведение возмущений по всем трем направлениям такое же, как в точном одномерном решении. Соответствующую трехмерную формулу, написанную «от руки», Зельдович назвал приближенным решением.

Когда он рассказывал об этом на Объединенном астрофизическом семинаре в заполненном, как всегда на его докладах, до отказа актовом зале ГАИШ, я спросил: если решение приближенное, то к чему оно приближено?

— К истине, — был мгновенный ответ.

И притом абсолютно точный: это выяснилось лишь позднее, когда численные расчеты, проделанные сначала Андреем Дорошкевичем, а затем и многими другими, показали, что приближенное решение — может быть,

его вернее назвать «анзац Зельдовича»? — дает не только правильную качественную картину нелинейного трехмерного процесса, но и количественно оказывается близким к истине.

Как смог он это угадать? А считается, что человеческая интуиция способна действовать только в линейных задачах...

Возвращаясь мысленно в те уже далекие, но незабываемые 60-е, оживляя по свойству памяти лучшее и светлое, радуешься (и удивляешься), как много было вдохновения, задора, веселья, а также и мягкости, уюта вокруг Зельдовича, в атмосфере, которую он с терпением и тактом создавал. Трогало, как, например, всякий раз он заботился, чтобы совсем зеленого мэнээса, которого академическое начальство, как мы говорили, в упор не видит (нынешним академическим нравам это соответствует в еще большей степени), устроили в гостиницу, звонил важным каким-то чиновникам в Академию, солидно с ними по этому поводу говорил. Была тут и непосредственная чуткость по отношению к наивной и очарованной им молодежи, а вместе с тем, мне кажется, и определенная педагогическая система.

Мягкое обращение Я. Б. произвело немалое впечатление в первый мой приезд к нему. Вернувшись потом в Ленинград, я сказал моему учителю Л. Э. Гуревичу (Я. Б. не раз говорил и писал, что считает Льва Эммануиловича одним из своих первых учителей), что Зельдович показался мне как бы даже застенчивым. Лев Эммануилович оставил это высказывание без внимания, как он это всегда делает, когда слышит чушь.

Пишущий воспоминания поневоле не может не говорить о себе; к оправданиям и извинительным словам, сказанным на этот счет мемуаристами почище моего, добавлю лишь сравнение, близкое физикам: пишущий — «как прибор», без которого не обойтись при изучении «объекта».

— Это красиво, и это нужно подать элегантно, — сказал Зельдович, — садитесь и пишите.

И он продиктовал от начала до конца мою первую научную работу, соавтором которой не был. В ней сообщалось новое точное решение для фридмановской космологической модели, учитывающее как вещество, так и излучение. Зельдович увлекался тогда космологией с холодным началом, и под излучением мы понимали изо-

тропный фон ультрарелятивистских нейтрино и, возможно, гравитонов. На этот счет уже имелись работы Я. Б. — одна совместная с Я. А. Смородинским, другая — с С. С. Герштейном. О горячем начале в «моем» тексте не упоминалось; считалось, что теория Гамова надежно закрыта только что вышедшей работой двух сотрудников Зельдовича А. Дорошкевича и И. Новикова. Я. Б. поставил доклад по моей работе и на семинаре Ландау; три года как семинар собирался без Льва Давидовича. Это было зимой 1965 года.

А в сентябре получаю в Ленинграде письмо Я. Б.: «Кажется, холодная модель была ошибкой. Американцы измерили фоновое радионизлучение. Пока слухи, не в печати». Открытие предсказанного Гамовым излучения (которое все сразу же с легкой руки И. С. Шкловского стали называть реликтовым) стало самым крупным событием за всю историю космологии со времен Фридмана и Хаббла. Вскоре Я. Б. в переполненных аудиториях с увлечением и темпераментом читал лекции о реликтовом излучении и горячей Вселенной. Холодная модель с легкостью была «отпущена» в историю науки или, может быть, поставлена на «запасный путь» — однажды, лет 15 спустя, Зельдович снова ненадолго вернулся к ней, но уже на совсем новых основаниях.

Вместе с Я. Б. и Борисом Комбергом весной 1966 года мы ездили на Долгопрудную в Физтех (московский), где его лекция вызвала необычайное возбуждение. Проходя по коридору в актовом зале, мы слышали, как студенты, спешившие занять места, громко переговаривались: «Зельдович приехал! Будет читать про реликт! Да, все идут!»

Ехали туда, помнится, в просторной черной машине, ЗИМе; у какого-то сельпо, уже вне Москвы, Я. Б. попросил шофера остановиться, купил буханку черного хлеба, и по дороге мы ее как-то быстро и весело съели.

В космологии ощущался тогда настоящий взлет. Казалось, все еще только начинается (это было верно лишь отчасти), а самое главное должно вот-вот произойти (что тоже подтвердилось не вполне). Ощущение подъема было не только у молодых и начинающих (кстати, во всей нашей стране молодых, приступивших к занятиям космологией, было тогда всего несколько человек, и никто не подозревал, что лет через 15—20 наступит то, что Шкловский назовет «самовытаптыванием в релятивист-

ской астрофизике»). Зельдовичу самому было как-никак за 50, но по энергии и страсти к науке он был моложе молодых. И молодые безмерно и безраздельно обожали его.

Его шутки, анекдоты «про Зельдовича» многократно пересказывались в обеих столицах, он был человеком-легендой. Например, вдруг приезжает в ИПМ при всех «звездах» на груди — гаишник отобрал права, надо ехать выручать.

В его подходе к молодым само собою разумелось, что от них ожидается продукция на уровне, как говорится, лучших мировых стандартов. Эта требовательность воспринималась как естественная; чем, собственно, мы хуже? — такого вопроса тогда не возникало. В том деле, которое мы сами делаем, мы, может быть, и лучше. Да, в этом не было нарочитого напряжения, и высокие критерии сочетались с непринужденностью.

Присзая к Зельдовичу с очередной новой работой, я либо рассказывал ее с мелом в руках у доски в домашнем кабинете Я. Б., либо, что потом было чаще, передавал уже предварительный текст, черновик черновика, как он говорил, который не позже чем на завтра получал обратно с устными или письменными замечаниями. После обдумывания их можно было в короткой или более продолжительной беседе задать вопросы, все обсудить, а бывало, и согласовать окончательный текст со ссылками (последним придавалось немалое значение). Жалею, что так немного сохранилось этих записок с замечаниями Я. Б. — обычно на листках из ученической тетрадки. В них редко бывали вопросы; чаще утверждения, точные, краткие. Иногда не без иронии или шуток. Например: «Ох, сколько будет дискуссий. Мы лебедь, рак и щука!»

Привет.

1/IV

(Симптоматично!)

Это по поводу книги «Гидродинамика Вселенной», затеянной Я. Б., Дорошкевичем и мной. «Черновик черновика», кажется, уже был тогда составлен, а книга так и не получилась.

Мы восхищались научной проницательностью Зельдовича, яркими вспышками его физической фантазии и интуиции, которые посчастливилось наблюдать вблизи.

Казалось, для таланта такого масштаба не должно быть неподдающихся проблем, скрытое от других для него явно. Так чаще всего и было, он был впереди всех. Хотя случались и исключения. Совсем немного, на какие-то, я думаю, месяцы его опередил Хоккинг с квантовым испарением черных дыр. За инфляцию он взялся, увы, после Гуса, а ведь в этом случае были известны более ранние работы ленинградцев Э. Б. Глинера, И. Г. Дымниковой и Л. Э. Гуревича, в которых уже имелись зачатки того, что выросло позднее в инфляционную теорию. Эти ленинградские работы Я. Б. сначала резко отвергал; позднее он говорил нам, что «в свое время недооценил их».

Могущество и силу государства, как и вес облеченных властью личностей, он, по-видимому, глубоко чувствовал и чтит. В его присутствии его самого называли государственным человеком; он не возражал.

У памятника Курчатову в Москве (наиболее бросающейся в глаза деталью которого является, естественно, борода) я спросил, был ли тот действительно так внушителен. После паузы Я. Б. сказал серьезно:

— Он сразу говорил генералам «ты».

Я. Б. случалось знать больших начальников, бывать и самому «начальником над людьми». Каким он был в этой роли, мне узнать не пришлось. Переход в ИПМ, предложенный им в 1966 г., почему-то не состоялся; позднее я оценил и преимущества дистанции в 650 км. Этой дистанции я обязан письмами Я. Б. В них были научные новости, критика моих работ, отзывы и соображения об идеях и результатах, которые привлекали его внимание. Изредка речь шла не только о физике.

В одном письме — не в славные 60-е, а совсем в другую эпоху, в начале 80-х — он писал: «...мудрое и благожелательное спокойствие! Это очень редкое нынче качество; я очень ценю его в моих старых друзьях Овсее Лейпунском, покойном Давиде Альбертовиче Франк-Каменецком... Мне мудрого спокойствия не хватает... тем более ценю его в других...»

Спокойствие было для него невозможно; энергичное кипение, управляемое, а иногда и не очень, было его стилем, способом его существования в жизни и науке. Какое, однако, здоровье для этого нужно...

Очень сильно, чрезмерно сильно Я. Б. волновала те-

ма, нашедшая отражение в его последней работе, которая вышла в УФН уже без него, летом 1988 г. Почему бы не отнестись к этому с «мудрым спокойствием»? Но нет, он кипел, негодовал. Раскаты его гнева доносились и до Ленинграда. Поздней осенью его последнего года звонит, говорит громко, твердо, резко; он зол, ответов не воспринимает. Слушаю, удивляюсь (а еще поговаривали, что с годами он стал не так крут), все же пытаюсь возразить и, в общем, не уступаю. Разговор вышел нехороший. Вскоре в Физтехе побывал Рашид Сюняев и согласился передать Я. Б. мои разъяснения. Я. Б. позвонил снова, недоразумение легко рассеялось, и этот разговор, который — кто бы мог подумать тогда — оказался последним, кончился на теплой ноте: Я. Б. приглашал приехать, что-то пообсуждать и т. д.

На другой день после Новодевичьего Рашид сказал, что мое имя с восклицательным знаком, написанное рукой Я. Б., осталось в углу так хорошо знакомой многим доски на стене его рабочей комнаты. Чтобы не забыть еще что-то сказать или написать? Что-нибудь серьезное или пустяковое дело, кто знает.

О современной космологии можно сказать, что это наука по преимуществу ленинградская. В Петербурге—Петрограде—Ленинграде родился, жил, работал и умер создатель теории расширяющейся Вселенной Александр Александрович Фридман. Учеником Фридмана по Ленинградскому университету, воспринявшему космологию из его рук, был Георгий Антонович Гамов, автор теории горячей Вселенной.

Зельдович родился в Минске, там и поставлен его бронзовый бюст. Но по научному происхождению он, конечно, ленинградец. Здесь он учился физике, в ленинградском Физтехе нашел первых своих наставников и товарищей в науке, которым — и это хорошо известно — всегда хранил верность. Многое связывало его с Ленинградом и тогда, когда он жил и работал в Москве; лучшие москвичи — это ленинградцы, как было сказано кем-то на одном из физтеховских юбилеев, на котором присутствовал и Зельдович.

Рядом с Фридманом и Гамовым завоевал своими трудами место в науке о Вселенной Яков Борисович Зельдович. На этих трех китах-ленинградцах и стоит космология.

1 декабря 1989 г. с космодрома Байконур с помощью ракеты-носителя «Протон» запущена в космос астрофизическая обсерватория «Гранат». Выведение ее на рабочую орбиту осуществлялось по двухимпульсной схеме. Сначала ракета-носитель обеспечила доставку космического аппарата на промежуточную орбиту искусственного спутника Земли с параметрами: максимальная высота — 2009 км, минимальная высота — 166 км. На первом витке этой орбиты были включены двигатели четвертой ступени (разгонного блока), и аппарат перешел на рабочую орбиту с высотой в апогее 200 тыс. км и в перигее 2000 км.

Научная аппаратура обсерватории «Гранат» разрабатывалась учеными и специалистами Советского Союза, Франции, Болгарии и Дании.

Конструкция и основные приборы обсерватории. Конструктивно космическая обсерватория «Гранат» состоит из орбитального модуля и комплекса научной аппаратуры. Основой орбитального модуля является связка из последовательно расположенных приборного отсека и опорного цилиндра, соединенных между собой конической проставкой.

Приборный отсек герметичный. В нем размещены радиокomплекс, телеметрическая система, система автономного управления ориентацией и стабилизацией, система электропитания, элементы системы терморегулирования, блоки электроавтоматики. Снаружи на отсеке, на стороне аппарата, постоянно обращенной к Солнцу, расположен блок астродатчиков.

Источники электрической энергии — солнечные батареи с кремниевыми фотопреобразователями, состоящие из трех панелей. Две панели, каждая из которых имеет две складывающиеся секции, расположены симметрично относительно продольной оси аппарата на фермах, крепящихся к опорному цилиндру. До вывода обсерватории на рабочую орбиту они находятся в сложенном положении и раскрываются после отделения разгонного блока. Третья панель установлена неподвижно на опорном цилиндре. Общая площадь солнечных батарей 8 м².

Устойчивая радиосвязь космического аппарата с Землей обеспечивается при любой его ориентации с помощью установленных на орбитальном модуле приемно-передающих антенн дециметрового и сантиметрового диапазонов.

Управление угловым положением КА при его ориентации и стабилизации в пространстве осуществляется газореактивными соплами, работающими на сжатом азоте. Сопла расположены на раскрывающихся панелях солнечных батарей и на приборном отсеке.

Снаружи космический аппарат покрыт многослойной экранно-вакуумной теплоизоляцией (за исключением окон оптических датчиков ориентации и рабочих поверхностей некоторых научных приборов).

Научная аппаратура размещается на орбитальном модуле. Функционально весь комплекс приборов делится на две основные группы: телескопы с узким полем зрения (СИГМА, АРТ-П, АРТ-С) — для наблюдения стационарных источников космического излучения и обзорные детекторы (КОНУС-В, ФЕБУС, ВОТЧ) — для регистрации и исследования переменных источников космического излучения.

К верхнему фланцу опорного цилиндра через коническую проставку крепится гамма-телескоп «СИГМА», визирная ось которого совпадает с продольной осью космического аппарата. По обе стороны от телескопа на двух неподвижных основаниях, закрепленных на опорном цилиндре, установлены соосно с последним телескопы АРТ-П и АРТ-С. Такое расположение телескопов позволяет одновременно исследовать источники космического излучения в чрезвычайно широком энергетическом диапазоне. Рядом с телескопом АРТ-С расположена двухстепенная подвижная платформа с научными приборами эксперимента «ПОДСОЛНУХ». Установлена она таким образом, что в любой момент времени можно привести установленные на ней научные приборы в любую точку небесной полусферы.

Обзорные детекторы комплекса научной аппаратуры «КОНУС-В», «ФЕБУС», «ВОТЧ» расположены на орбитальном модуле. Кроме перечисленных научных приборов, на приборном отсеке установлен монитор заряженных частиц — прибор КС-18М.

Общая длина КА достигает 6,5 м, размах по пане-

лям солнечных батарей 8,5 м, масса научной аппаратуры 2,2 т.

Телескопы АРТ-П (разработан учеными СССР) и «Сигма» (разработан французскими специалистами) считаются основными приборами обсерватории. Они позволяют получать изображения рентгеновских источников излучения в широком диапазоне энергий.

«Сигма» работает в диапазоне от 30 до 2000 кэВ, имеет позиционно-чувствительный детектор на основе кристалла NaI и кодирующую апертуру. Телескоп может строить изображения участков небесной сферы размером $7,3 \times 7,3^\circ$ и локализовать дискретные источники рентгеновского и мягкого гамма-излучений. Эффективная площадь телескопа 1024 см^2 , что обеспечивает его высокую чувствительность. Спектральное разрешение прибора близко к предельно возможному для данного типа детекторов.

Советский телескоп АРТ-П работает в диапазоне от 3 до 100 кэВ. Телескоп может строить изображение участка небесной сферы и локализовать дискретные источники рентгеновского излучения с точностью порядка угловой минуты. Эффективная площадь прибора составляет 2400 см^2 . Поле зрения прибора выбрано таким образом, чтобы в его пределах одновременно находилось от 3 до 10 слабых источников. Прибор обеспечивает разделение этих источников и исследование их спектров и поведения во времени. Чувствительность его за 24-часовую экспозицию достаточна для наблюдения квазаров, находящихся на космологических расстояниях. Используемый тип детектора позволяет проводить детальные спектральные исследования источников. Важнейшая особенность прибора — возможность измерения линейной поляризации излучения рентгеновских источников. Поле зрения прибора $1,8 \times 1,8^\circ$.

В состав обсерватории входит также построенный по традиционной схеме рентгеновский телескоп АРТ-С, работающий в диапазоне от 3 до 100 кэВ. В качестве детекторов в нем используются многопроволочные позиционно-чувствительные камеры общей эффективной площадью 2400 см^2 . Поле зрения прибора $2 \times 2^\circ$. Прибор предназначен для детального спектрального исследования и слежения во времени за поведением сравнительно ярких рентгеновских источников.

Диапазоны «Сигма», АРТП-П и АРТ-С перекрыва-

ются. Это обеспечивает возможность взаимного контроля, облегчает проблемы исследования фона. Следует отметить, что спектр абсолютного большинства рентгеновских источников характеризуется спаданием потока в области высоких энергий. Работать в жесткой области, следовательно, труднее. В этой ситуации данные, полученные в мягкой области, помогут при построении изображений в более жестком диапазоне. Сильно вытянутая орбита космического аппарата и наличие на борту французского запоминающего устройства большой емкости позволяют вести наблюдения длительностью до 24 часов. Это, наряду с большой площадью детекторов, делает обсерваторию «Гранат» рекордной по чувствительности в исследуемом диапазоне. Приборам с рентгеновскими зеркалами косого падения (обсерватория «Эйнштейн», западно-германский спутник «РОСАТ») доступно для наблюдений большее число рентгеновских источников, но они могут работать лишь в мягком диапазоне энергий — от 0,1 до 3 кэВ. В своей широчайшей «энергетической нише» (от 3 до 2000 кэВ) «Гранат» является рекордным как по чувствительности телескопов, так и по широте решаемых научных задач среди осуществленных и принятых к разработке космических проектов. (Продолжение следует.)

СССР: МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В КОСМОСЕ (ГОД 1989)

С. НИКИТИН

Международное сотрудничество Советского Союза в исследовании и использовании космического пространства в мирных целях в 1989 г. проводилось с девятью социалистическими странами (НРБ, ВР, СРВ, ГДР, Республика Куба, МНР, ПНР, СРР, ЧССР) в рамках многосторонней программы «Интеркосмос», на двусторонней основе — с Австрией, Великобританией, Индией, Канадой, США, Финляндией, Францией, ФРГ, Швейцарией и другими странами, а также с Европейским космическим агентством. По программе «Интеркосмос» совместные работы ведутся в области космической физики, включая космическое материаловедение, в области космической метеорологии, связи, космической биологии и медицины, а также дистанционного зондирования Земли в целях изучения ее природных ресурсов.

Организацией международного сотрудничества СССР

в космосе с перечисленными выше государствами в основном занимаются Главкосмос СССР и Совет «Интеркосмос» при АН СССР.

В 1989 г. основными событиями в международном сотрудничестве Советского Союза в космосе стали: международные эксперименты на орбитальном научно-исследовательском комплексе «Мир», запуски спутников «Интеркосмос-24», «Фотон» и «Ресурс-Ф», запуск биоспутника «Космос-2044», новые соглашения о международных космических проектах.

Международные эксперименты на орбитальном комплексе «Мир». Экипажи орбитального комплекса «Мир» — сначала космонавты В. Г. Титов и М. Х. Манаров, затем А. А. Волков, В. В. Поляков и С. К. Крикалев и, наконец, космонавты А. С. Викторенко и А. А. Серебров — продолжили исследования с помощью международной аппаратуры астрофизического модуля «Квант». Основное внимание при этом было уделено Сверхновой 1987А в Большом Магеллановом Облаке, вспыхнувшей 23 февраля 1987 г.

Данные за сентябрь-октябрь 1988 г. свидетельствуют о том, что жесткое рентгеновское излучение от Сверхновой 1987А за предыдущие 9 месяцев наблюдений уменьшилось в 2,5 раза. Такое уменьшение потока является следствием практически полного распада одного из элементов звездной материи — радиоактивного кобальта, образовавшегося при взрыве Сверхновой в БМО. В последующих наблюдениях за эволюцией спектра этого объекта астрофизики пытаются выяснить, что образовалось при взрыве Сверхновой 1987А — рентгеновский пульсар, нейтронная звезда или черная дыра.

Вторым объектом пристального внимания орбитальной обсерватории «Рентген» был новый рентгеновский источник, вспыхнувший 26 апреля 1988 г. в созвездии Лисичка. От этого источника в серии наблюдений удалось, помимо мягкой компоненты, зафиксировать жесткое рентгеновское излучение, соответствующее температурам свыше миллиарда градусов. На долю жесткой компоненты излучения от этого источника приходится около трети выделяемой энергии. В дальнейшем при наблюдении рентгеновского источника в созвездии Лисичка изучалась эволюция температуры и спектра излучения этого уникального небесного объекта — нового кандидата в черные дыры.

Анализ информации по результатам наблюдений нейтронной звезды Геркулес X-1 подтвердил обнаруженный ранее телескопами модуля «Квант» переход рентгеновского пульсара в новую стадию ускорения своего вращения.

В ходе наблюдений рентгеновского пульсара в созвездии Парус исследован спектр его излучения и определено изменение периода вращения этой нейтронной звезды.

Помимо излучений от этих объектов телескопы обсерватории «Рентген» вели наблюдения рентгеновских источников Лебедь X-1, Лебедь X-3, двойной системы в Малом Магеллановом Облаке, ядра активной галактики в созвездии Гончих Псов, источника X-3 в созвездии Центавр, двойной системы в созвездии Циркуль (еще один кандидат в черные дыры), источника X-1 в созвездии Скорпион, рентгеновского пульсара в созвездии Персей, центральной части нашей Галактики с целью картографирования этой области в рентгеновском диапазоне.

С помощью УФ-телескопа «Глазар» проводились съемки отдельных участков небесной сферы в созвездиях Орион, Эридан, Киль, Голубь, Корма, Лев, Большая и Малая Медведица, Ворон, Дева, Северная Корона, Большой Пес, Южная Рыба, Скорпион, Телец, Персей, Кассиопея, Возничий, Парус, Близнецы, Южный Крест, Волосы Вероники, Центавр, а также участков вблизи α Орла, α Змееносца, α Волка.

Интересные данные были получены в период с конца апреля по сентябрь 1989 г., когда орбитальный комплекс «Мир» совершил полет в автоматическом режиме. Около 40 сеансов наблюдений было проведено за две недели июня 1989 г. Информация о Сверхновой 1987А в Большом Магеллановом Облаке свидетельствует о дальнейшем ослаблении интенсивности потока излучения от этого звездного образования.

В начале июля 1989 г. было выполнено около 30 сеансов наблюдений рентгеновского пульсара в созвездии Парус, а начиная с 6 июля телескопы обсерватории были направлены на рентгеновскую Новую, вспыхнувшую в созвездии Лебедь в конце мая 1989 г. Цель исследований — изучение эволюции температуры и спектра излучения этого небесного объекта. Зафиксирован спектр источника, соответствующий температуре около 100 млн. градусов. Это второй астрофизический объект, открытый

«орбитальной обсерваторией «Рентген».

16 августа 1989 г. в рамках международного проекта «Рентген» был открыт новый рентгеновский источник в созвездии Змееносец. В одном из сеансов зафиксирован мощный всплеск излучения, природа которого связана с ядерным взрывом на поверхности этой нейтронной звезды. Велись также наблюдения за источником в созвездии Персей, рентгеновским пульсаром в созвездии Центавр и рентгеновскими источниками в центре Галактики.

Исследования с помощью аппаратуры астрофизического модуля «Квант» в рамках международных проектов «Рентген» и «Глазар» продолжаются.

Спутник «Фотон». 26 апреля 1989 г. в Советском Союзе был запущен спутник «Фотон», предназначенный для продолжения исследований по космическому материаловедению*. Ракета-носитель «Союз» вывела спутник массой около 6200 кг на орбиту с высотой в апогее 402 км, в перигее 225 км, наклоном $62,8^\circ$ и периодом обращения 90,5 мин. Спутник представляет собой автоматический специализированный космический аппарат, созданный в КБ «Фотон» Главкосмоса СССР и обеспечивающий возвращение на Землю научной аппаратуры и результатов исследований (масса возвращаемой научной аппаратуры до 500 кг).

Программа полета была рассчитана на 16 суток и предусматривала проведение экспериментов по получению в условиях микрогравитации полупроводниковых материалов с улучшенными свойствами и особо чистых биологически активных препаратов, а также изучение протекающих при этом процессов.

На «Фотоне» была размещена следующая научная аппаратура:

— установка «Зона-04» для отработки технологии получения особо чистых полупроводниковых материалов методом бестигельной зонной плавки и исследования влияния магнитных полей на качество кристаллизации полупроводниковых материалов;

— установка «Сплав-02» для проведения исследования кристаллизации полупроводниковых материалов и отработки технологии получения плоских линз из стек-

* Это второй спутник в серии «Фотон»; первый был запущен 14 апреля 1988 г. с программой исследований, рассчитанной на 14 суток полета.

ла (эксперименты проводились в интересах Института металлургии АН СССР и ГОИ);

— аппаратура «Каштан» для получения высокоочищенных гормональных и белковых препаратов, разделения клеток микроорганизмов, проведения кристаллизации белковых молекул (полученные результаты предполагается использовать в исследовательских работах Института молекулярной биологии АН СССР, Института молекулярной генетики АН СССР и других научных организаций);

— установка «Бисер» для получения полимерных чистых и наполненных монодисперсных микросфер (латексов);

— прибор СЕФА для проведения фундаментальных исследований в области космического материаловедения, в частности, для изучения циркуляции и разделения фаз (газа и жидкости) в условиях микрогравитации (процессы в приборе фиксировались с помощью фотосъемки); прибор массой 23 кг изготовлен во Франции фирмой «Матра» и установлен на «Фотоне» в соответствии с коммерческим соглашением. Эксперименты с помощью прибора СЕФА проводились в рамках европейской исследовательской программы «Эврика».

На спутнике «Фотон» проводились также эксперименты по изучению влияния факторов космического полета на живые организмы (тритоны, мухи-дрозофилы, пустынные жуки-чернотелки).

11 мая 1989 г. возвращаемый аппарат «Фотона» с научной аппаратурой благополучно совершил посадку в расчетном районе территории Советского Союза в 207 км южнее г. Оренбурга.

На советском серийном спутнике «Ресурс-Ф», запущенном 6 сентября 1989 г., в соответствии с коммерческим соглашением с фирмой «Интоспейс» (ФРГ) была размещена научная аппаратура для проведения биотехнологических экспериментов в условиях микрогравитации. 22 сентября 1989 г. в 11 ч 10 мин по московскому времени спускаемая капсула спутника приземлилась в 105 км юго-западнее Актюбинска. Капсула доставила на Землю 104 пробы, содержащие более тысячи кристаллов различных веществ, которые будут применимы для нужд фармакологии. Тем самым был успешно завершён советско-западногерманский проект «Козима-2». (Продолжение следует.)

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Вселенная — мир галактик	4
Галактическое вращение	12
Предыстория звездных систем	21
Взрывы и струны	29
Природа вращения галактик	32
Вместо заключения: приближение к истине, или анзац Зельдовича	49
Астрофизическая космическая обсерватория «Гранат»	56
СССР: международное сотрудничество в космосе (год 1989)	59

Научно-популярное издание

Чернин Артур Давыдович

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК

Гл. отраслевой редактор Л. А. Ерышкин

Редактор И. Г. Вирко

Мл. редактор С. С. Патрикеева

Обложка художника Т. С. Егоровой

Худож. редактор К. А. Вечерин

Техн. редактор Н. В. Клецкая

Корректор В. И. Гульева

ИБ № 10873

Сдано в набор 28.12.89. Подписано к печати 07.02.90. Т-00044. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57. Уч.-изд. л. 3,44. Тираж 27 816 экз. Заказ 2268. Цена 15 коп. Издательство «Знание», 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 904203.
Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

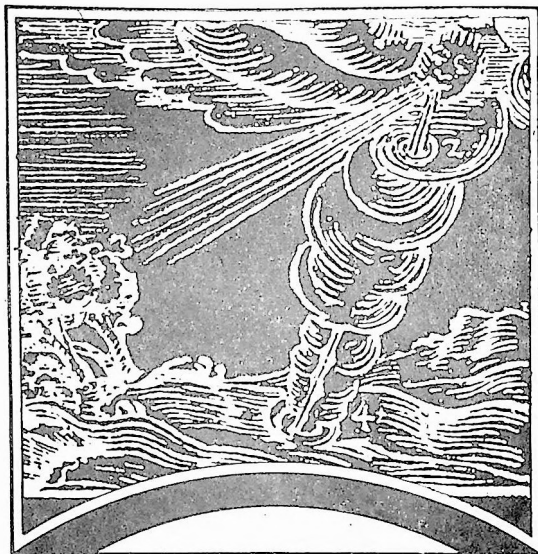
Дорогой читатель!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.

Подписка на брошюры издательства «Знание» ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в «Каталоге советских газет и журналов» в разделе «Центральные журналы», рубрика «Брошюры издательства «Знание»

Цена подписки на год 1 руб. 80 коп.



Наш адрес:
СССР,
Москва,
Центр,
проезд Серова, 4