1961 г. Январь *Т. LXXIII, вып. 1*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ И РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ НА ВОЛНЕ 21 *см* *)

Ван де Холст

Существование электромагнитных волн было предсказано Максвеллом за несколько лет до того, как они были получены экспериментально Герцем. Аналогичная история произошла и при развитии радиоастрономии, потому что возможность наблюдения радиоволн внеземного происхождения была указана за тридцать лет до того, как были сделаны первые успешные наблюдения такого рода.

Впервые радиосигнал на расстояние в несколько километров был передан в 1895 г. А. С. Поповым в России и в 1896 г. Маркони. В том же 1896 г. Вилсинг и Шейнер пытались принимать радиосигналы, исходящие от Солнца; они исходили из правильного предположения о том, что спектр солнечного излучения может простираться через область инфракрасного излучения вплоть до радиодиапазона.

Однако радиоизлучение неземного происхождения было обнаружено при наблюдении совершенно неожиданного источника. В 1930 г. Янский обнаружил радиоизлучение, исходящее вовсе не от Солнца, а от Млечного Пути. Сегодня это открытие представляется нам весьма удивительным, однако в то время астрономы почти не обратили на него внимания. Только десять лет спустя, когда стали известны более подробные данные, полученные Ребером, два астрофизика — Хени и Кинан сделали первую попытку объяснить наблюдаемое излучение. Их работа была опубликована в Astrophysical Journal, и с тех пор астрономы начали понимать величайшие возможности, таящиеся в этом направлении.

Развитие радиоастрономии в последующие двадцать лет было поистине грандиозным. Радиоастрономия отнюдь не стала небольшим придатком астрономии, которым интересуется небольшое число специалистов, но вошла существенной частью во многие вопросы, имеющие первостепенное значение для всей астрономии в целом. Во многих случаях она оказалась значительно более эффективной, чем оптическая астрономия. Положение вещей прекрасно иллюстрируется тем, что в современном курсе, служащем введением в астрономию, неизбежно приходится использовать радиоастрономические данные, по крайней мере в двенадцати основных вопросах, таких, как скорость и статистика метеоров, температура планет, солнечная корона, солнечные протуберанцы, газообразные туманности и ионизованные области межзвездного пространства, нейтральные облака межзвездного пространства, оболочки сверхновых,

*) H. C. Van de Hulst, Galactic structure and 21-centimetre microwave line Endeavour 18, № 71, 117 (1959). Перевод В. А. Угарова.

структура вращения нашей Галактики, вращение и масса других звездных систем (спиральные туманности) и расширение Вселенной.

Мысль об исследовании структуры галактик с помощью наблюдения излучения нейтрального водорода впервые возникла в 1944 г., когда Голландия была лишена нормальной связи с другими странами, а университетская жизнь была нарушена. Все, что мы знали в Голландии, так это то, что радиоастрономией занимаются в основном в Америке, но в то же время в Англии и Австралии также ведутся значительные работы в этой области. Оорт, которому принадлежат многочисленные исследования по структуре галактик, попросил меня изучить и доложить на семинаре теорию, касающуюся наблюдений Ребера. Он просил меня выяснить, какие спектральные линии могут наблюдаться в этой области, поскольку наблюдение за такими линиями позволяет определять скорости их источников по допплеровскому эффекту и тем самым дает ключ к установлению местонахождения этих источников.

Здесь мы должны напомнить обычные способы определения расстояний, принятые в астрономии. Неизменной трудностью для астрономов, исследующих структуру галактик, было то, что расстояния до интересующих их объектов было либо неизвестно, либо известно очень ненадежно. Наиболее распространенные типы звезд в Галактике расположены в области, имеющей форму плоского диска, толщиной в несколько сотен парсек и радиусом порядка 15 000 *парсек* *). Солнце расположено примерно в плоскости симметрии диска, на расстоянии 8000 *парсек* от центра. Производя наблюдения с этого достаточно удаленного пункта наблюдения, мы можем производить вполне надежные определения расстояний всех звезд, расположенных в пределах до 50 *парсек* с помощью триангуляции, где в качестве базы берется диаметр земной орбиты; однако такие звезды составляют лишь ничтожную часть всей Галактики. Тем не менее наблюдение за этими звездами дает нам возможность получить в свое распоряжение некоторые данные для калибровки вторичных эталонных расстояний, которые уже могут быть использованы для дальнейших целей. Многие из этих эталонов основаны на статистике звездных движений.

Эффективный метод, годный для звезд, отстоящих от нас на расстояния более чем 500 *парсек*, представляется нам при наблюдении дифференциального вращения галактики. За некоторыми исключениями, звезды в данном локальном объеме представляются движущимися беспорядочно. Их скорости относительно центра тяжести своей группы равны примерно 10—20 *км/сек*; Солнце также не является исключением из этого правила, оно движется со скоростью 18 *км/сек* относительно центра тяжести всех звезд в нашей окрестности. Однако в масштабе Галактики все звезды совершают общее движение: центры тяжести отдельных групп описывают круговые орбиты вокруг центра Галактики, причем каждая отдельная звезда проходит некоторую эксцентрическую траекторию. Наблюдаемые здесь скорости очень велики — звезды вблизи Солнца обладают орбитальной скоростью около 220 *км/сек*, с орбитальным периодом 230 миллионов лет; однако все это можно обнаружить, лишь изучая другие группы звезд, отстоящие от них на значительном удалении.

Угловая скорость вращения звезд, связанная с вращением Галактики, убывает с увеличением расстояния от центра; это иллюстрируется с помощью длин стрелок на рисунках 1, *а* и *б*. Пунктирной линией на рисунке 1, *а* изображено направление движения Солнца; отсюда очевидно, что Солнце имеет тенденцию догонять звезды, расположенные в правом верхнем квадранте, и приближается к ним. Подобно этому звезды в нижнем

*) 1 *парсек*=3,08 10^{18} *см* ≈3 световым годам.

левом квадранте имеют тенденцию догонять Солнце и также приближаются к нему. Звезды, расположенные в двух других квадрантах, имеют тенденцию удаляться от Солнца. Это подтверждается астрономическими наблюдениями. Относительные скорости увеличиваются с увеличением расстояний, а их величина может быть получена на основании эффекта Допплера. Следовательно, эти скорости могут быть использованы для определения расстояний. Этот метод имеет свои жесткие пределы, обусловленные тем, что на расстояниях свыше 2000 *парсек* от Солнца оптические наблюдения звезд, расположенных вблизи плоскости Галактики,

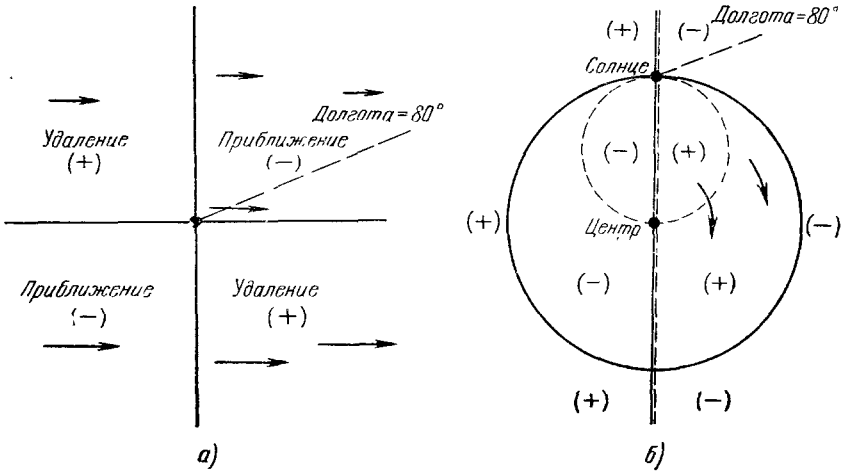

Рис. 1. Дифференциальное вращение Галактики.

а) Ситуация в окрестности Солнца: фотографические и фотоэлектрические наблюдения бессильны за пределами этой области. *б)* Ситуация, имеющая место во всей плоскости Галактики. Общая картина выясняется только благодаря наблюдению излучения на волне 21 см. На обоих рисунках знак «+» указывает на систематические скорости удаления, знак «—» на систематические скорости приближения. Сплошная линия указывает нулевую скорость. Оценку расстояний невозможно производить на пунктирной прямой и на пунктирном круге, где в первом порядке скорость не зависит от расстояния.

становятся чрезвычайно затруднительными, так как большинство этих звезд частично или полностью скрыто из-за межзвездного поглощения. Кроме того, линейное приближение становится неприменимым. Возникающая ситуация иллюстрируется рисунком 1, *б*.

Аналогичная техника может быть использована и в радиоастрономии. Если задуматься над тем, какая спектральная линия будет подходящей, то одна линия с тонкой структурой напрашивается сама собой. Эта линия соответствует переходу между двумя уровнями, на которые расщепляется основной уровень атома водорода в силу эффекта сверхтонкой структуры. Говоря наглядно, электрон и протон, образующие атом водорода, могут рассматриваться как два постоянных магнита; спектральная линия, о которой идет речь, испускается тогда, когда направление этих магнитов меняется от параллельного к антипараллельному. Длина волны этой линии равна 21,2 *см*; она очень удобна для современной техники. В 1945 г. еще существовали некоторые технические затруднения при работе с коротковолновым излучением, и хотя первые попытки обнаружить это излучение были предприняты именно в это время, фактически упомянутая линия была наблюдена лишь в 1951 г., причем почти одновременно это открытие сделали Ивен в Соединенных Штатах, Мюллер в Голландии и Христиансен и Хиндман в Австралии. С этого момента начинается длительный период накопления экспериментального материала; наблюдения ведутся в Голландии, Австралии и других странах.

ТЕХНИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В принципе, задача исчерпывающего наблюдения линии 21 *см* состоит в составлении карты интенсивности излучения в функции трех переменных: частоты (по которой может вычисляться скорость) и двух небесных координат. Необходимое оборудование в течение последних лет было в значительной степени усовершенствовано. Так что, если взять в качестве примера Голландию, то даже трудно сравнивать оборудование, которое имелось в 1952 г. в Котвик и оборудование в Двинглоо в 1959 г.

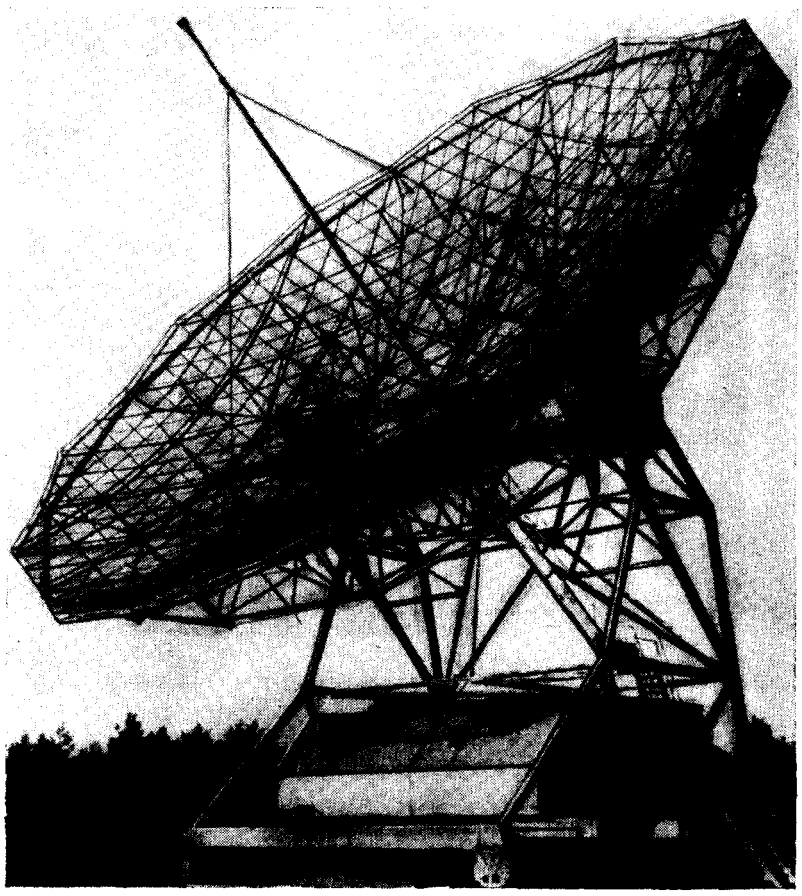

Рис. 2. 25-метровый телескоп в Двинглоо.

Первым использованным прибором было старое немецкое радарное зеркало с эллиптическим антенным пучком $2^\circ \times 3^\circ$. Телескоп перемещался вручную, а для определения частоты и стабилизации осцилляторов применялись весьма сложные и утомительные способы. В настоящее время в нашем распоряжении находится превосходно выполненное двадцатипятиметровое зеркало (рис. 2) с антенным пучком кругового сечения и диаметром 0,57°; специальное приспособление позволяет либо выдерживать заданные координаты, либо сканировать определенные участки; частота фиксируется автоматически. Широкие возможности имеются также для выбора ширины полосы пропускания и времен наблюдения. Однако наиболее существенным достижением является

повышение чувствительности и стабильности приемного приспособления. Удобной единицей, с помощью которой можно выражать яркость протяженных участков неба, для радиоастрономии является градус шкалы Кельвина (°К). Абсолютно черное тело имело бы при указанной температуре в точности такую же яркость для данной частоты, какую имеет рассматриваемый объект. Когда линия 21 *см* была обнаружена впервые, то максимальную интенсивность линии (около 100°К) обнаружить было довольно затруднительно. В течение нескольких лет случайные флуктуации и отклонения на 5—10 К были достаточно обычным явлением. Но путь

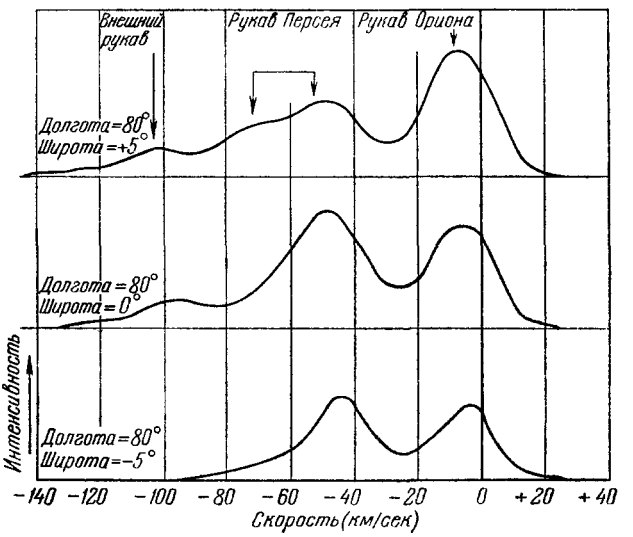

Рис. 3. Профиль спектральной линии для трех точек в Кассиопее и Цефее.

Каждый профиль представляет собой зависимость интенсивности излучения от допплеровской скорости. Общая долгота всех линий 80° (пунктир на рис. 1). Средняя точка лежит в плоскости Галактики. Две другие—на 5° выше и ниже галактической плоскости. Следует отметить зависимость профиля линии от широты в трех рукавах.

современного приемника для периодов, составляющих много дней, подошел к значению в 1°К. В конечном счете точность результатов, по-видимому, определяется главным образом шириной полосы пропускания и тем временем, которое можно взять для усреднения шумов приемника. При современных исследованиях внегалактических систем, где интенсивность наименьшая, систематически достигается точность до 0,15 К.

Сканирование может производиться различными способами, выбор между которыми определяется практическими соображениями. Чаще всего телескоп следует суточному движению некоторой точки неба, причем производится медленное сканирование по частоте. В результате получается непосредственно профиль линии, который полностью совпадает с профилем линии испускания в обычной спектроскопии. Пример такого профиля приведен на рис. 3. Ордината линии при нулевой скорости определяет несмещенную частоту; уширение частоты всецело связано с эффектом Допплера. Это обстоятельство непосредственно указывает на один из методов анализа этих данных, который мы будем называть стандартным методом. Если допустить, что хаотические скорости атомов в их «локальном» окружении равны нулю, так что каждый атом описывает круговую орбиту вокруг центра Галактики с угловой скоростью, соответствующей

расстоянию от центра, то скорости могут быть сразу связаны с расстояниями. Следовательно, максимум для данной частоты в профиле линии соответствует скоплению водорода на некотором определенном расстоянии. Эти скопления и указывают спиральные рукава нашей Галактики.

КАРТИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМНОГО ВОДОРОДА

Тот же самый метод может быть превращен в количественный, так как известно время жизни верхнего уровня линии 21 *см*: излучение, (спонтанный переход атома) происходит в среднем за 11 миллионов лет. Таким образом становится возможным, зная интенсивность линии для каждой частоты, определить плотность атомов водорода в каждой точке по лучу зрения. Плотность водорода изменяется от 2 атомов на *см*^{3} до столь малых величин, что они не обнаруживаются; средняя величина для диска Галактики составляет 0,7 атома на *см*^{3}.

Однако существует немало проблем, которые необходимо решить, и немало допущений, которые следует принять, прежде чем такой результат может быть получен.

Необходимо, например, знать расстояние от центра Галактики до Солнца. Кроме того, существенно знать скорость вращения звезд на любом расстоянии от центра. Бо́льшая часть этих сведений заимствуется из оптической астрономии. Вместе с тем радиоастрономические измерения сами по себе довольно неожиданным образом предоставляют ценные данные. Если посмотреть от нас (от Солнца) под некоторым углом к прямой, соединяющей нас с центром Галактики, то мы обнаружим в какой-то точке, где луч зрения проходит вблизи центра, максимальную скорость. Эта максимальная скорость непосредственно дает нам скорость вращения в данной точке. Для внешних областей вселенной этот метод непригоден, и в этом случае приходится использовать теоретическую кривую, которая получена, исходя из некоторого предполагаемого распределения масс в Галактике. На расстояниях, меньших 3000 *парсек* от центра, метод оказывается также недействительным; это будет ясно из материала, приводимого в последнем разделе.

Практически нельзя пренебрегать хаотическим движением атомов. Не только потому, что атомы имеют скорости, соответствующие температуре около 100° К, но также и потому, что облака межзвездного газа как целое обладают, точно так же как звезды, хаотическим движением. Следствием этого обстоятельства является то, что эталонные расстояния в стандартной методике определены не вполне четко. Эта неопределенность по своему влиянию вполне тождественна неопределенности в угловых координатах, связанной с ограниченной разрешающей силой антенны. Вдобавок к этому профиль спектральной линии обнаруживает слабый эффект насыщения в местах, где интенсивность максимальна, так что необходимо вводить поправки на самопоглощение газа; эти поправки зависят от температуры газа.

После того как приняты определенные предположения, касающиеся этих обстоятельств, усложняющих проблему, можно набирать данные и картировать их. На рис. 4 приведена типичная карта, представляющая собой исчерпывающую картину для долготы 80°, области, заключенной между —10° и +10° галактической широты. Эта карта составлена по данным телескопа в Котвике. Плотность водорода подсчитывалась по профилям линии по лучу зрения с интервалами 2,5° по широте. Проведенные на основании этих данных контуры показывают полную картину распределения атомного водорода в плоскости, перпендикулярной к плоскости Галактики. Эта плоскость, как видно из рисунка, пересекает несколько

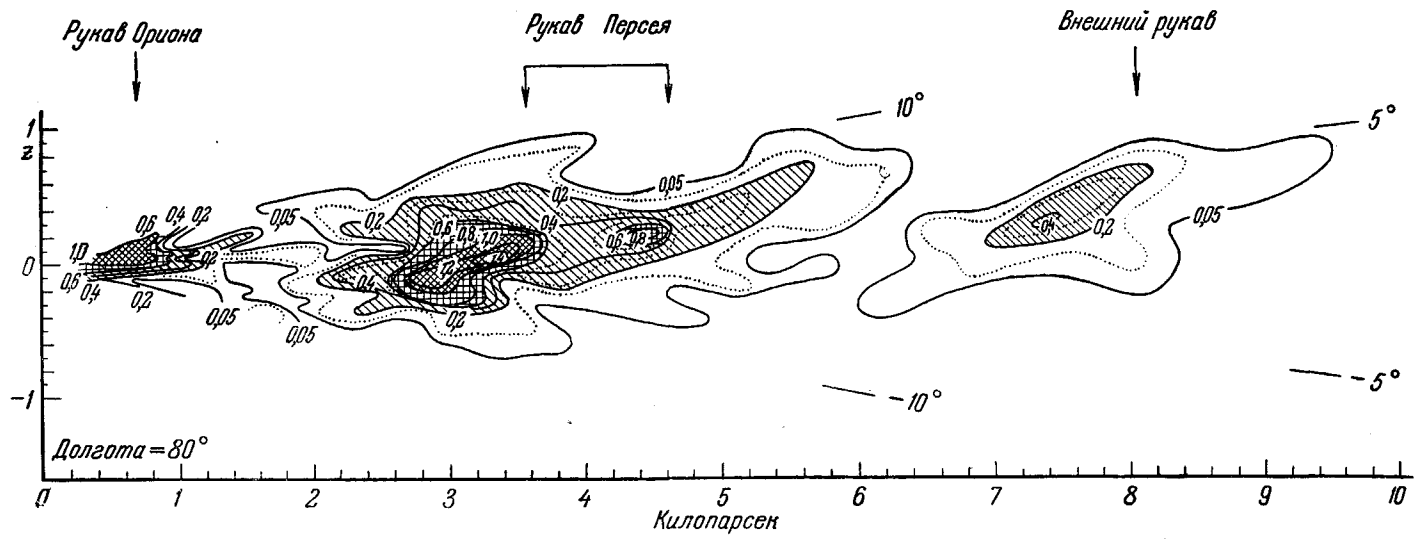

Рис. 4. Сечение Галактики, перпендикулярное галактической плоскости.

Линии на рисунке показывают места с одинаковой плотностью атомного водорода в плоскости, перпендикулярной к галактической плоскости. Солнце (или Земля) расположено в начале координат, абсцисса—расстояние от Солнца вдоль плоскости Галактики, z—расстояние от Солнца, перпендикулярное к той же плоскости. Жирная штриховка отмечает области с плотностью 2 атома на 1 $см^3$. Контур с наименьшей плотностью соответствует 0,05 атома на 1 $см^3$. Следует обратить внимание на то, что (как и на рис. 2) рукав Персея расщеплен и что внешний рукав расположен выше галактической плоскости.

спиральных рукавов, а также несколько второстепенных объектов. Основным спиральным рукавам даны условные наименования; на рис. 3 «рукав Ориона» показан не полностью, так как для того, чтобы получить о нем исчерпывающее представление, необходимы данные для более высоких широт.

Ближайшие рукава целиком или частично могут наблюдаться также и оптически. Фактически три ближайших рукава были обнаружены Морганом с его сотрудниками в 1951 г. до того, как началось их исследование радиометодами. До сих пор остается открытым вопрос о том, совпадают ли рукава, обнаруживаемые при оптических наблюдениях молодых ассоциаций звезд, областей ионизованного газа и переменных цефеид, с теми, которые обнаруживаются в результате наблюдений за атомным водородом. Хотя в общем согласие вполне удовлетворительное, уже были отмечены некоторые исключения.

Около 150 карт, подобных приведенной на рис. 3, полученных наблюдениями на различных широтах, могут дать полную трехмерную картину распределения водорода по диску Галактики, доступную разрешающей силе использованного 7,5-метрового телескопа. Линейные размеры, которые еще могут быть разрешены, составляют примерно 150 *парсек* для угловых координат и 600 *парсек* по лучу зрения. Эти цифры слишком велики для того, чтобы рассмотреть отдельные межзвездные облака, диаметр которых имеет порядок около 10 *парсек*. Однако неопределенность картины такова, что вполне возможно получить ясную картину общей структуры Галактики, избегая усложнения излишними деталями.

Такая трехмерная карта была выполнена в 1955 г. Она была еще очень неполной, во-первых, потому что определение расстояний стандартными методами было невозможно в местах вблизи пунктирной прямой и пунктирного круга, показанных на рис. 1, а во-вторых, потому что в Голландии *один квадрант Млечного Пути вообще никогда не наблюдается*. Два года спустя ученые Австралии вновь повторили бóльшую часть измерений, выполненных на Севере несколько иными методами, и заполнили пробелы, соответствующие южной части.

Для того чтобы получить единую картину, Вестерхоут и Керр, имея на руках соответственно голландские и австралийские данные, работали совместно в течение нескольких месяцев. Их результат лучше всего может быть представлен в виде рисунка художника, воспроизведенного на рис. 5. На этом рисунке отчетливо видны большие и малые детали, причем значительно лучше, чем на картах с контурами одинаковой плотности. Хотя бóльшая часть водорода сосредоточена в узком и поразительно плоском слое, рукава во внешней части имеют тенденцию к отклонению от этой плоскости. Картина, изображенная на рис. 5, очень точно воспроизводит все отчетливо выявленные особенности в галактической плоскости и около нее. Эта картина представляет собой именно то, что увидел бы гипотетический наблюдатель в другой галактике, обладающий глазами, подобными нашему гигантскому радиотелескопу, взглянув на нашу Галактику. Детали, которые он заметил, были бы «спиральными рукавами».

Взглянув на приведенную картину, уместно спросить, не является ли термин «спиральные рукава» слишком фантастическим. Однако когда готовился этот рисунок, имелось в виду сравнить его с фотографиями других спиральных галактик, которые раньше назывались спиральными туманностями. Следует, конечно, помнить, что наша карта еще не полна и может изменяться. К этому есть по крайней мере два основания. Во-первых, локальные отклонения от кругового движения могут приводить к изменениям расстояния, которые фактически являются изменениями

скорости. Во-вторых, секторы около направления Центр—Солнце еще не исследованы, так как метод в этих областях непригоден.

Однако эти секторы могут содержать столько же водорода, сколько и остальные части Галактики. Наконец, остается главный вопрос, не могут ли спиральные рукава на обычных фотографиях, представленные яркими звездами и газообразными туманностями отличаться от рукавов

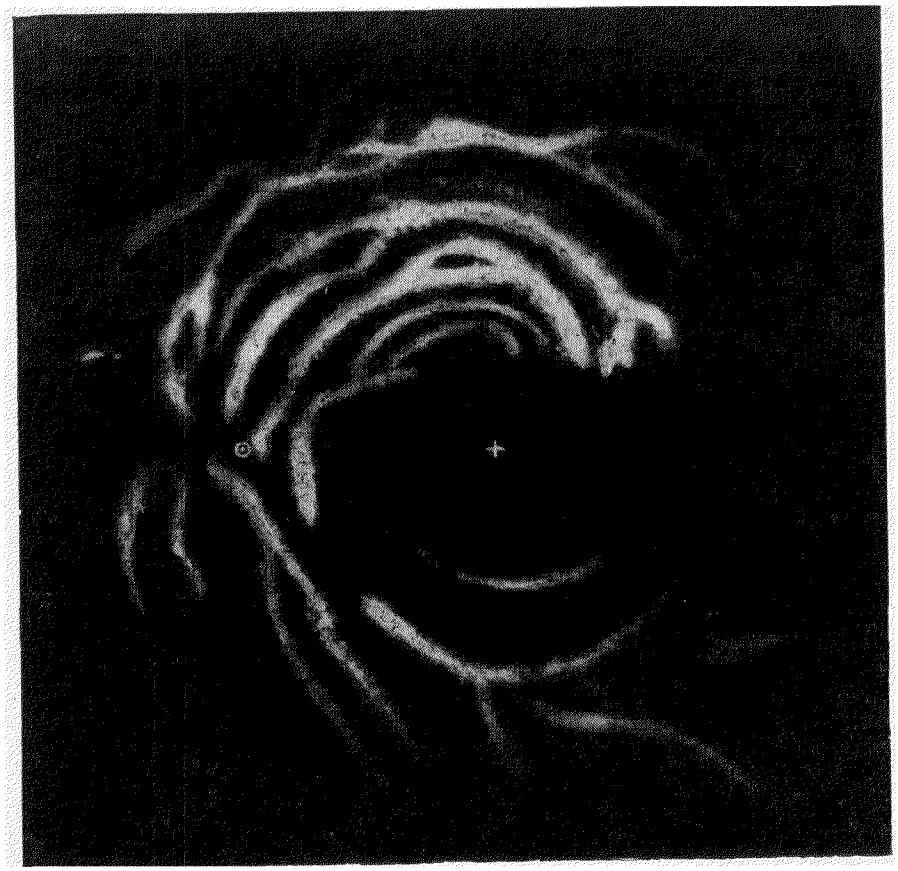

Рис. 5. Спиральные рукава водорода в нашей Галактике (рисунок художника). Относительное скопление атомов водорода проектируется на плоскость Галактики. ⊙—Солнце, +—центр Галактики. Секторы вблизи линии, соединяющей Солнце и центр Галактики, еще не исследованы.

атомного водорода. На этот вопрос ответить нельзя, так как нам очень мало известно как из наблюдений, так и из теории относительно происхождения и эволюции спиральных рукавов.

Но несмотря на эти неясности, вполне возможно определить, к какому типу принадлежит наша Галактика. Принято подразделять спиральные галактики на три основных типа: *Sa*, *Sb* и *Sc*. Галактики типа *Sa* имеют очень большое ядро и большое число ровных спиральных рукавов, тесно навитых на него. Галактики типа *Sc* обладают небольшим ядром и обычно двумя выдающимися рукавами неровной формы, простирающимися от него. Тип *Sb* является промежуточным между типами *Sa* и *Sc*. Радиокарты явно указывают на то, что наша Галактика принадлежит типу *Sb*. Оптические исследования, основанные на рассмотрении звездных

населений, также свидетельствуют в пользу этого предположения. То обстоятельство, что многие рукава имеют почти круговую форму, не должно нас смущать. Рукава, имеющие хорошо выраженные края относительно тангенциального направления, особенно в своей внешней части, все до одного показывают, что характер их вращения таков, что эти рукава волочатся в общем вращении.

ПРОГРАММА ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В противоположность всей остальной радиоастрономии развитие исследований на волне 21 *см* происходило относительно спокойно. Открытие излучения на этой волне было предсказано, метод интерпретации был также предсказан и даже основной результат — карта, указывающая на наличие спиральных рукавов, мог бы быть в принципе предвиден. Такое стечение обстоятельств привело к тому, что наше продвижение в познании галактических структур осуществлялось крупными шагами, причем новые открытия не опрокидывали предыдущих выводов, а интерпретация результатов не нуждалась в пересмотре. Тем не менее твердо установленным фактом является то, что мы больше узнаем из того, что нельзя предсказать, а не из того, что предсказывается. К счастью, после того как получены более или менее предвиденные результаты, в любой области науки наступает время полных неожиданностей или даже блуждания в потемках.

Как раз такое время и наступило для радиоастрономии на волне 21 *см*. После того мы выяснили с помощью телескопов средней силы, насколько мы были правы в наших предположениях, теперь другие выясняют с помощью более совершенного оборудования, насколько мы ошибались. Теперь я попытаюсь коротко описать некоторые направления исследований в этой области, которые получили развитие в последнее время.

Прежде всего, были сделаны тщетные попытки обнаружить по крайней мере еще одну линию. Группа ученых в России сообщила как-то о том, что им удалось обнаружить линию дейтерия на волне 93 *см*, но последующие более точные измерения в Англии показали, что излучение этой линии находится все еще вне возможностей приемной аппаратуры.

Во-вторых, было начато изучение бо́льшей части неба вне двадцатиградусного пояса Млечного Пути. Превосходный общий обзор был выполнен Институтом Карнеги в Вашингтоне; области, представляющие особый интерес, такие, например, как созвездие Ориона, изучались в Гарвардской обсерватории и в Двинглоо. Надежда на то, что исследования такого рода позволят что-то узнать о мощном гало, окружающем Галактику, почти полностью исчезла. Напротив, более вероятно, что эти области неба позволяют нам судить лишь об очень ограниченных частях галактического диска. Возможность разрешения деталей межзвездного газа, размером 1 *парсек* на характерном расстоянии в 100 *парсек*, до сих пор привлекает к себе внимание. Не исключено, что принятая в настоящее время рабочая модель рыхлых межзвездных облаков, размером порядка 10 *парсек*, потребует существенного пересмотра.

В-третьих, существуют по крайней мере пять источников непрерывного радиоизлучения, достаточно сильного для того, чтобы выявить спектр поглощения линии 21 *см*. Некоторые из этих источников имеют угловые размеры от 5 минут и меньше. Эти источники предоставляют радиоастрономам в Джодрел Бенк, Морской исследовательской лаборатории в Вашингтоне, а также сотрудникам обсерватории в Двинглоо возможность определения скоростей движения атомов водорода в малом телесном угле

и одновременно получение весьма полезных оценок расстояний этих источников.

В-четвертых, исследуются другие галактики. Радиофизическая лаборатория в Сиднее завершила несколько лет назад очень детальное исследование двух Магеллановых Облаков. Примерно половина массы этих ближайших галактик, представляющих собой небольшие спутники нашей собственной Галактики, по-видимому, составляется атомами водорода. Однако наша собственная Галактика в противоположность этому содержит всего-навсего 2% атомного водорода. Хорошо известная туманность Андромеды, представляющая собой *Sb*-систему, какой представляется и наша собственная Галактика, и вдвое большая, чем наша, содержит лишь 1% атомного водорода. Эта туманность и еще полдюжины других были исследованы в Двинглоо и Гарварде. Следующий шаг — исследование еще более отдаленных объектов вселенной на волне 21 *см* еще не сделан с должной надежностью, хотя радиоастрономия в широком значении этого слова принесла и в этой области немало ценных данных.

РАСШИРЕНИЕ ОКОЛО ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ

Наконец, наша собственная Галактика преподнесла нам большой сюрприз. За последние два года все время нарастало убеждение в том, что газообразный водород в центральной части галактического диска не только вращается, но также и расширяется. Этот факт, впервые обнаруженный в Двинглоо и почти полностью неясный, является наиболее волнующим результатом, полученным до сих пор в радиоастрономии на волне в 21 *см*. Все рабочее время телескопа в течение трех часов дня или ночи, когда область вблизи галактического центра находится над горизонтом в Двинглоо, зарезервировано в течение многих лет для дальнейшего исследования этого явления. Поэтому представляется вполне целесообразным посвятить конец этой статьи краткому описанию наблюдений, которые привели к этому открытию.

Наблюдения, производившиеся с целью установления закономерностей вращения внутренних частей Галактики, натолкнулись в 1954 г. на некоторые трудности. Метод состоял в том, что пытались обнаружить максимальную скорость для каждого направления в плоскости Галактики. Эта процедура вполне оправдывала себя для углов (разность по долготе) от 25 до 65° относительно направления на галактический центр. Однако на долготах, меньших 25° от центра, отчетливый максимум скорости не обнаруживался. Вместо этого профиль линии давал крылья малой интенсивности со скоростями, достигающими высоких значений. Совсем близко от центра крыльев были обнаружены как положительные, так и отрицательные скорости, одна из которых была запрещенной на основании предположения о характере вращения. Очевидным выводом из этого факта было то, что газ в области, расположенной на расстояниях до 3000 *парсек* от центра, совершает движение, отличающееся от простого вращения; мы подозревали турбулентное движение.

Однако наблюдения этих крыльев с помощью более совершенного оборудования в Двинглоо сразу же выявили такие подробности, которые противоречили общим представлениям о турбулентном движении. Максимум, обнаруженный для некоторой частоты на некоторой долготе, обычно имел место и для близлежащих долгот, но, как правило, со слегка смещенной частотой. Именно такое положение вещей имеет место в спиральных рукавах внешней части галактических систем. Однако «запрещенные» скорости по-прежнему остаются, так что положение этих рукавов в пространстве не может быть определено стандартными методами.

Наиболее выдающийся рукав в этой области может быть прослежен на протяжении 28° по долготе. Интерполируя от соседних долгот, компонента его скорости по лучу зрения, наблюдаемая точно в направлении галактического центра, должна была бы быть равной —53 *км/сек*. В этом направлении имеется сильный источник непрерывного радиоизлучения, который, по всей вероятности, находится в действительном центре Галактики. Непрерывный спектр этого источника делает невозможным наблюдение линии испускания 21 *см* обычным способом. В этом случае мы наблюдаем сложный спектр (см. рис. 6) с компонентами, соответствующими поглощению (облака водородных атомов в малом телесном угле, стягиваемом источником), наряду с компонентами, соответствующими испусканию (облака водородных атомов, излучающих в антенный пучок, но не покрывающих источник). В начале 1957 г. была найдена сильная линия

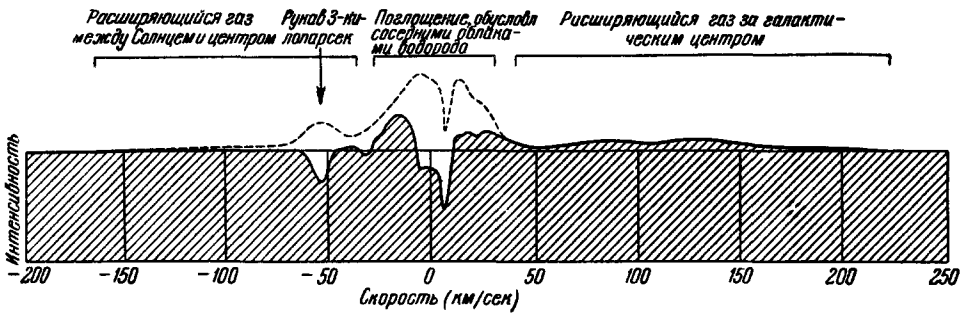

Рис. 6. Данные в спектре источника, расположенного в центре Галактики, указывающие на расширение газа.

Сплошной спектр источника отмечен тонкими наклонными линиями. Линия излучения водорода в антенном пучке, которая была получена интерполяцией из профилей излучения в близлежащих точках неба, добавляет к этому спектру интенсивность, указанную пунктиром. Наблюдаемый профиль, когда антенна направлена на источник, отмечен сплошной кривой. Очевидно, что разность между сплошной и пунктирной кривой определяет влияние поглощения водорода между источником и наблюдателем.

поглощения, точно соответствующая скорости —53 *км/сек*. Этот факт может быть интерпретирован таким образом, что мы имеем дело все с тем же спиральным рукавом, находящимся между нами и галактическим центром и имеющим в этой точке компоненту скорости в направлении к нам, равную —53 *км/сек*. Эта скорость направлена от центра, следовательно, мы наблюдаем расширение. Поперечная скорость (скорость вращения) не может быть определена столь точно, но ее можно оценить из наблюдений на другой долготе; она составляет 190 *км/сек*. Этот рукав, возможно, образует каемку совершенно особой области и поэтому назван «рукав 3 килопарсека».

Примечательно, что несколько других, менее выдающихся рукавов с положительной скоростью простираются в направлении к центру, однако они не обнаружены в спектрах поглощения. Следовательно, они должны находиться за галактическим центром и их движение в направлении от нас опять-таки является расширением от центра. Когда это было обнаружено, выяснилась настойчивая необходимость систематического исследования с высокой степенью точности наличия возможного поглощения в спектре источника, находящегося в центре при всех допплеровских смещениях от —300 *км/сек* до +300 *км/сек*. Результат, кратко разъясняемый на рис. 6, крайне удивителен. Для положительных скоростей нет вовсе никакого поглощения. Однако все отрицательные скорости обнаруживают более или менее четко выраженное поглощение. Это показывает на то, что расширение вовсе не ограничено несколькими спираль-

ными туманностями, а присуще всему атомному водороду в центральной части галактической системы.

Объяснение этого расширения едва ли возможно в настоящее время. Одним из наиболее загадочных обстоятельств является то, что атомный водород здесь, так же как и в остальных местах, сосредоточен в тонком слое вдоль плоскости Галактики. Слой водорода даже несколько тоньше, он составляет 100 *парсек*. Любая сила, вызывающая расширение, должна иметь резко выраженную направленность вдоль плоскости. Другая проблема, требующая разрешения, состоит в выяснении того, откуда происходит водород. Представляется весьма затруднительным допустить существование в центре некоторого источника, который постепенно истощается в течение жизни нашей Галактики. Более вероятно, что этот материал черпается из галактического гало, где он существует в виде полностью ионизованного, очень разреженного газа. Общее впечатление таково, что какие-то магнитные силы ответственны за все происходящее, но требуется значительно бо́льшее число наблюдений и значительно бо́льшее число новых идей, чтобы дать разумное объяснение всей ситуации в целом.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Предсказание, открытие и теория радиоизлучения на волне 21 *см*:

1. Van Hulst H. C., Ned. Tijdschr. Natuurk. **11**, 201 (1945).
2. Ewen H. I. and Purcell E. M., Muller C. A. and Oort J. H., Pawsey J. L., Nature (Lond.) **068**, 356 (1951).
3. Wild J. P., Astrophys. Z. **115**, 206 (1952).
4. Field G. B., Proc. IRE **46**, 240 (1958).
5. Field G. B., Astrophys. Z. (в печати).

Структура Галактики и карты, полученные на основе излучения 21 *см*:

6. Oort J. H., Astrophys. Z. **116**, 237 (1952).
7. Oort J. H., Kerr F. J. and Westerhout G., Mon. Not. R. astr. Soc. **118**, 4 (1958).
8. Van de Hulst H. C., Revs. Mod. Phys. **30**, 913 (1958).

Подробное изложение работ в Котвик и Двинглоо:

9. Bull. astr. Insts. Nethlds. **12**, No. 452, 117 (1954); **12**, No. 458, 211 (1954); **13**, No. 475, 151 (1957); **14**, No. 480, 1 (1957); **14**, No. 492 (в печати).

Симпозиумы:

10. Труды пятого совещания по космогонии, М., Изд. АН СССР, 1956.
11. International Astromical Union Symposium No. 4 on «Radio Astronomy». H. C. van de Hulst (Editor), Cambridge University Press, London. 1957.
12. International Astronomical Union Symposium No. 5 on «The Large-scale Structure of the Galactic System». N. Roman (Editor), Cambridge University Press, London, 1958.
13. Onzieme Conseil de physique Solvay, «La structure et l'evolution de l'univers». Stoops, Brussels, 1958.
14. International Astronomical Union Symposium on «Radio Astronomy». R. N. Bracewell (Editor), Stanford University Press — Paio Alto (в печати).