

Радиоастрономические исследования на Украине в диапазоне декаметровых волн

(Обзор)

С.Я.Брауде, А.В.Мень

Радиоастрономический институт Национальной Академии наук Украины
Украина, 310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 15 августа 1995г.

Стаття присвячена короткому огляду основних напрямків експериментальних і теоретичних досліджень, проведених колективом співробітників Радіоастрономічного інституту НАН України в галузі декаметрової радіоастрономії. Розглянуті також питання спорудження декаметрових телескопів та інтерферометрів, на яких велись описані спостереження.

Статья посвящена краткому обзору основных направлений экспериментальных и теоретических исследований, проведенных коллективом сотрудников Радиоастрономического института НАН Украины в области декаметровой радиоастрономии. Рассматриваются также вопросы сооружения декаметровых телескопов и интерферометров, на которых велись описываемые наблюдения.

Радиоастрономия сравнительно молодая область знания, возникшая на стыке двух наук – астрономии и радиофизики, посвящена изучению Вселенной с помощью радиоволн. Бурное развитие радиоастрономии началось после второй мировой войны с исследований методами радиолокации различных космических тел метеоров, астероидов, Луны и планет солнечной системы, хотя историческим годом рождения радиоастрономии считается 1931 год, когда американский радиоинженер Карл Янский впервые принял на декаметровых волнах сигналы, связанные с радиоизлучением галактического фона. До этого все сведения о Вселенной, накопленные человечеством в течение нескольких тысячелетий, были получены астрономией путем приема из космоса электромагнитного излучения в оптическом диапазоне, охватывающем примерно одну октаву. Радиоастрономические же исследования в дециметровом и метровом диапазонах волн затем стали проводиться на более коротких волнах (от сантиметровых до субмиллиметровых) и на более длинных декаметровых, охватывая в настоящее время полосу частот около 15 октав. Так произошло первое в нашем веке существенное расширение полосы электромагнитных волн, используемых в астрономии. Второе, не менее важное событие, произошло после запуска первого спутника в 1957 г., с которого началась эра космических исследований. С развити-

ем космонавтики появилась возможность размещать различные астрономические приборы на ракетах и космических аппаратах. Это позволило вести астрономические наблюдения на гектаметровых радиоволнах, в инфракрасном, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах частот, а также в гамма-лучах, т.е. во всех тех диапазонах электромагнитных волн, которые из-за очень сильного поглощения и рассеяния не проходят через ионосферу Земли и поэтому не могли приниматься инструментами, расположенными на земной поверхности. С этого времени астрономия стала наукой всеволновой, изучающей космические объекты по излучению, поглощению или рассеянию электромагнитных колебаний от сверхдлинных радиоволн до гамма-лучей. Учитывая связанное с этим колоссальное увеличение уже полученной из космоса информации, можно предполагать, что наше современное представление о Вселенной не может быть в ближайшем будущем изменено в корне. Такую точку зрения образно выразил один из крупнейших в мире астрофизиков член-корреспондент Академии наук СССР Иосиф Самойлович Шкловский, отметивший, что “вторая великая революция в астрономии подходит к концу”.¹

¹ Первая революция в астрономии связана с учением Н.Коперника.

В пятидесятых годах, когда было решено начать радиоастрономические исследования на Украине в Институте радиофизики и электроники Академии наук, одним из наименее освоенных в радиоастрономии диапазонов был декаметровый – наиболее длинноволновой, в котором еще можно проводить прием космического излучения с поверхности Земли. В то же время исследования в этом диапазоне представляли большой научный интерес, связанный с тем, что радиоволны этого диапазона рассеиваются и поглощаются космической плазмой. Многие космические объекты состоят из плазмы – больших областей пространства, заполненных электронами (позитронами) и протонами. Плотность плазмы в этих объектах такова, что она на декаметровых волнах перестает быть прозрачной, как на более коротких радиоволнах и в оптике. Излучение декаметрового диапазона частично поглощается и переизлучается этой плазмой, т.е. взаимодействует с ней. Изучая характер такого взаимодействия, можно исследовать свойства космической плазмы и судить о межпланетной и межзвездной среде. Используя результаты наблюдений как на декаметровых, так и на более коротких волнах, можно определить физические параметры различных космических объектов: солнечной короны, остатков сверхновых звезд, областей ионизированного водорода и углерода, квазизвездных объектов – квазаров (источников колоссальных энергий), пульсаров – вращающихся нейтронных звезд огромной плотности и малых размеров, обладающих большими магнитными полями. Эти измерения позволяют находить плотность и температуру электронов и других частиц межзвездной среды, изучать распределение яркости по разным космическим объектам и многое другое. Хотя, как уже указывалось, радиоастрономические измерения начались с приема сигналов декаметровых волн в 1931 году, в дальнейшем в течение более четверти века в радиоастрономии широко использовали более короткие метровые и дециметровые волны. Радиоастрономические наблюдения на декаметровых волнах начались только в конце пятидесятых годов. Такая задержка в проведении исследований была связана с рядом принципиальных и технических трудностей, которые не столь существенны на более высоких частотах. Укажем на основные из них. Во-первых, это значительно более низкая, по сравнению с более короткими волнами, разрешающая способность декаметровых радиотелескопов при практически реализуемых их размерах. Во-вторых, это обилие радиопомех, создаваемых в декаметровом диапазоне различными радиостанциями. Помехи

вблизи радиотелескопов имеют интенсивность в сотни тысячи или миллионы раз большую, чем сигналы, которые принимаются от космических объектов. В-третьих, сильное воздействие на прием космического излучения оказывает ионосфера Земли, влияя на амплитуду, фазу и поляризацию проходящих сигналов. В-четвертых, в диапазоне декаметровых волн излучение космических объектов принимается на фоне мощного нетеплового излучения Галактики, температура которого достигает десятков и сотен тысяч градусов Кельвина, что создает значительные трудности при приеме слабых космических сигналов.

Указанные проблемы в определенной степени можно преодолеть, используя радиотелескопы с большой эффективной площадью, одновременно обеспечивающие достаточное угловое разрешение. Для ослабления влияния ионосферы и радиопомех измерения на декаметровых волнах следует вести в основном ночью в осенне-зимние месяцы радиотелескопами, у которых приемные устройства – радиометры имеют узкую полосу принимаемых частот. Однако даже при соблюдении этих требований необходимо для получения надежных данных проводить большое число повторных измерений каждого исследуемого объекта.

Несмотря на указанные трудности, учитывая проведенные ранее в Институте радиофизики и электроники АН УССР разработки принципов построения нового класса антенн, позволяющие создать радиотелескопы декаметрового диапазона с требуемыми характеристиками, в 1958 г. были начаты радиоастрономические исследования в декаметровом диапазоне волн, которые с 1980 г. были продолжены в Отделении радиоастрономии этого же института, а с 1985 г. ведутся в Радиоастрономическом институте АН Украины.

Радиотелескопы и интерферометры

Основными элементами радиотелескопов являются антенные системы, конструкция и размеры которых могут быть разными в зависимости от назначения инструмента и диапазона частот, в котором он работает. Кроме антенн, в состав радиотелескопов входят специальная радиоприемная аппаратура (радиометры), системы индикации, записи и трансляции данных, измерительная и градуировочная аппаратура, служба точного времени и ряд других радиотехнических и электромеханических систем.

Из всего многообразия применяемых в радиоастрономии инструментов можно выделить два существенно различных между собой типа. Первый – это радиотелескопы так называемого

квазиоптического типа, применяемые на высоких частотах (от субмиллиметровых волн до коротких метровых). Характерной их особенностью является применение, как правило, антенн со сплошными поверхностями (апертурами), которые механически ориентируются в заданном направлении по одной или двум угловым координатам подобно тому, как управляются оптические телескопы. Наибольшее распространение получили зеркальные антенны, состоящие из параболического рефлектора, в фокусе которого располагается облучатель либо вторичное зеркало значительно меньших размеров, которые передают сфокусированное излучение на вход радиоприемного устройства.

Второй тип радиотелескопов, применяемых на более длинных радиоволнах (метровых и декаметровых) – это инструменты с электрически управляемым лучом. Обычно они имеют дискретную структуру (незаполненную апертуру) и состоят из отдельных излучателей или малых антенн, образующих антенные решетки. Управление лучом антенны (диаграммой направленности) проводится не механическими, а электрическими способами путем регулировки фаз высокочастотных токов излучателей. При этом луч антенны изменяет свое положение в пространстве, в то время, как сама антенна остается механически неподвижной. Для обеспечения высокой разрешающей способности и чувствительности размеры антенн радиотелескопов этого типа достигают сотен и тысяч метров. Однако, несмотря на большие размеры антенн радиотелескопов любых типов, разрешающая способность (которая определяется отношением длины волны λ к размеру антенны D) даже на очень коротких волнах сравнима с разрешением человеческого глаза – десятки угловых секунд, что во многих случаях совершенно недостаточно. Для повышения разрешающей способности радиотелескопов приходится переходить от использования одиночных инструментов к системам, состоящим из ряда радиотелескопов, которые находятся на больших расстояниях друг от друга. Такие системы носят название интерферометров со сверхдлинными базами, размеры их баз могут достигать тысяч и более километров. Для радиоастрономии эти системы были впервые предложены российскими учеными Н.С.Кардашевым, Л.И.Матвеевко и Г.Н.Шоломицким. Разрешающая способность таких интерферометров огромна, она превышает на сантиметровых волнах разрешающую способность лучших оптических телескопов в тысячи и десятки тысяч раз, достигая десяти-

тысячных долей угловой секунды. На Земле действуют сотни различных радиотелескопов и интерферометров, которые отличаются друг от друга как размерами, так и конструкцией, некоторые из них работают в декаметровом диапазоне. Самые крупные в этом диапазоне – это инструменты Радиоастрономического института Академии наук Украины – радиотелескоп УТР-2 (Украинский Т-образный радиотелескоп, вторая модель) [1, 2] и УРАН (Украинский интерферометр Академии наук) [3]. Остановимся кратко на описании этих инструментов.

Для эффективной работы радиотелескоп на декаметровых радиоволнах должен быть широкополосным, иметь высокую направленность в двух плоскостях, быть оптимально согласованным по чувствительности и разрешающей способности, иметь эталонные (т.е. точно известные) основные характеристики во всем секторе обзора в рабочей полосе частот. При этом должна быть обеспечена возможность быстрой оперативной смены ориентировки луча инструмента в любое направление по заданной программе, а также способность работать одновременно несколькими лучами, разнесенными по направлению в пространстве. Радиотелескоп должен быть надежным, простым в эксплуатации и экономически рентабельным. Исходя из указанного был разработан и сооружен в 1970 г. декаметровый широкополосный радиотелескоп УТР-2 оптимального типа с электрическим управлением диаграммой направленности по двум угловым координатам. Инструмент работает в диапазоне частот от 10 до 25 МГц, основной сектор обзора – конус с углом $\pm 70^\circ$ относительно направления в зенит. Находится он вблизи села Волохов Яр, примерно в 80 км к юго-востоку от г. Харькова. Антенна радиотелескопа состоит из двух многоэлементных решеток, расположенных на местности в виде буквы Г. Первая решетка длиной 1860 м и шириной 53 м ориентирована вдоль меридиана (рис. 1а), вторая, вытянутая вдоль параллели, имеет длину 900 м и ширину около 40 м (рис. 1б). Площадь, занимаемая антеннами УТР-2, около 16 га. Обе антенные решетки состоят из широкополосных горизонтальных вибраторов, расположенных на высоте 3,5 м над землей. В северо-южном поле всего 1440 вибраторов, а в западно-восточном – 600. Вибраторы представляют собой цилиндрические конструкции с диамет-

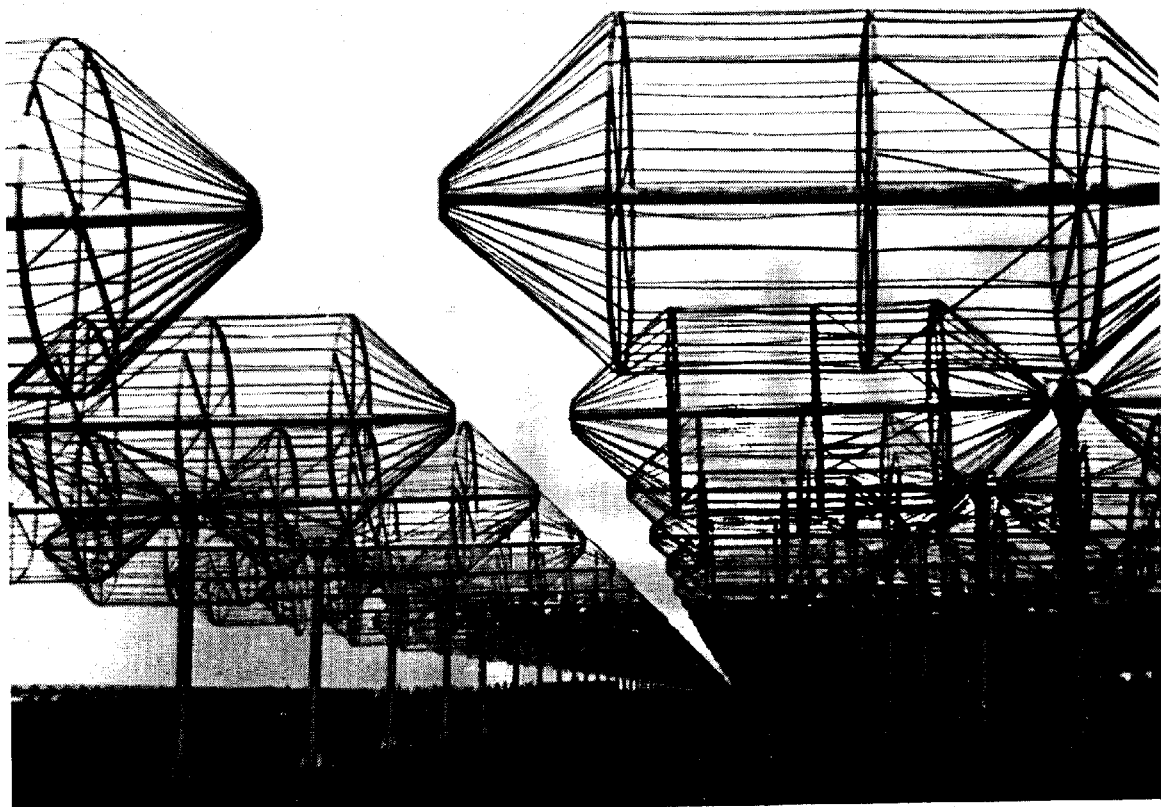


Рис.1а. Антенна радиотелескопа
(длина 1860 м, ширина 53 м)

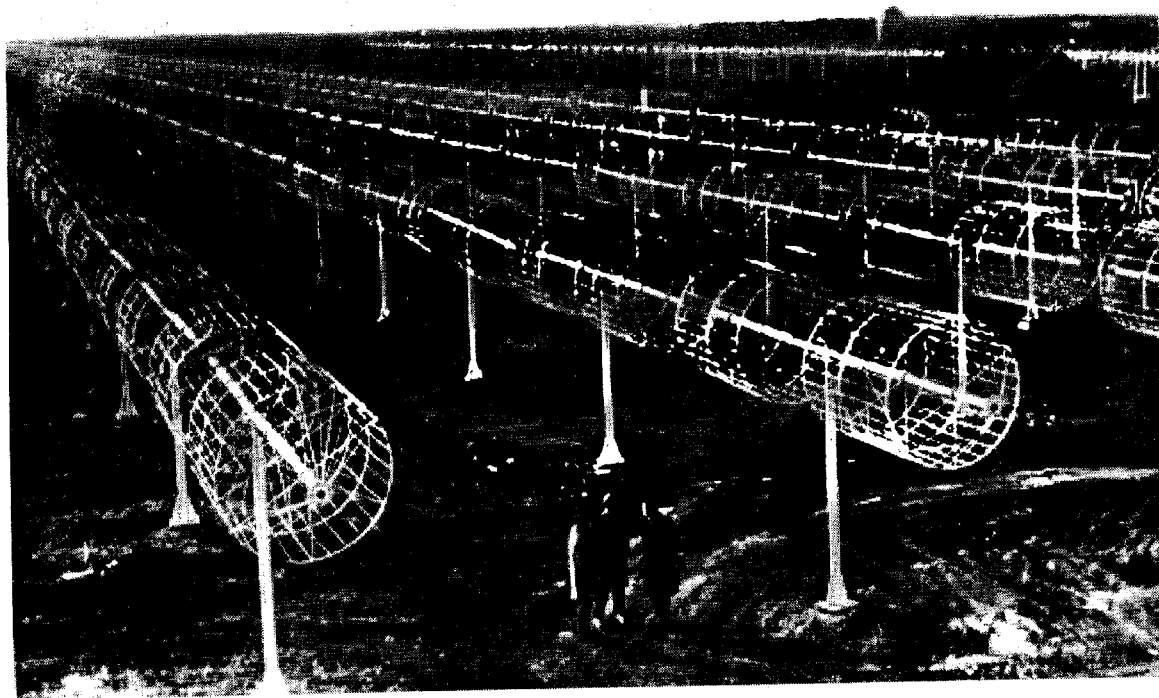


Рис. 1б. Антенна радиотелескопа
(длина 900 м, ширина 40 м)

ром 1,8 м и длиной 8 м, оси которых ориентированы вдоль параллели. Луч УТР-2 имеет карандашную форму, управление лучом ведется из центрального здания в секторе $\pm 50^\circ$ по прямому восхождению и $\pm 80^\circ$ по склонению. В пространстве луч перемещается дискретно, в секторе обзора имеется более $2 \cdot 10^6$ его положений на небесной сфере. Смена положений луча инструмента производится дистанционно как вручную, так и с помощью ЭВМ по заданной программе. Для повышения эффективности наблюдений, учета рефракции в ионосфере и борьбы с помехами радиотелескоп обеспечивает одновременно прием сигналов пятью лучами, которые разнесены по склонению. Управление лучами УТР-2 осуществляется по временному принципу 439 фазовращателями с переключаемыми кабельными линиями задержки. Фазовращатели расположены в подземных коллекторах, которые находятся непосредственно под антенными полями. Из-за больших размеров УТР-2 и временного принципа фазирования затухание сигналов в коммуникационных кабелях и аппаратуре фазирования антенн оказалось очень большим. Для компенсации этих потерь применена система распределенных по антеннам усилителей высокочастотных сигналов. Для обеспечения высокой помехозащищенности этих усилителей от связных и других помех применена специальная схема широкополосного усиления, основанная на согласованном разделении полосы частот, в которой ведется усиление, на ряд узкополосных каналов с последующим сложением сигналов на их выходе. Более 20 лет наблюдения проводились в основном в районе частот 10; 12,6; 14,7; 16,7; 20 и 25 МГц, где отмечался минимум помех от связных радиостанций. При измерениях на шести частотах в пятилучевом режиме использовалась 30-канальная приемная радиоаппаратура, сигналы которой записывались и подавались на ЭВМ² (рис. 2).

По ряду программ обработка информации ведется в реальном времени. Для обеспечения высокой надежности работы УТР-2 предусмотрены системы автоматической защиты и поиска неисправностей. Кроме того, используется система оперативного высокочастотного контроля, позволяющая проверять исправность инструмента в целом и отдельно каждого

² Сейчас проведена реконструкция системы антенного усиления УТР-2. Установлены усилители с большим, чем раньше динамическим диапазоном, т.е. с лучшей линейностью характеристик, причем усиление сигналов ведется в сплошной полосе частот от 8 до 30 МГц.

из 2040 вибраторов инструмента. Приведем основные параметра УТР-2. Его эффективная площадь в зенит на частоте 25 МГц – 150000 м², разрешающая способность на частоте 25 МГц при ориентировке луча в зенит $27' \times 27'$ (угловых минут). Сектор слежения по прямому восхождению не менее ± 4 ч, по склонению от -20° до $+90^\circ$. Чувствительность радиотелескопа составляет на средней частоте диапазона 20 Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ вт.м}^{-2} \text{ гц}^{-1}$) при отношении мощности полезного сигнала к шуму, равному трем.

Несмотря на то, что УТР-2 обладает высокой для декаметрового диапазона волн разрешающей способностью, для ряда радиоастрономических наблюдений она недостаточна. Чтобы обеспечить существенно большую, чем у УТР-2, разрешающую способность, была разработана система интерферометров УРАН. сооружение первой очереди которой закончено в 1993 году. Отметим, что максимальное разрешение, которое может быть реализовано в декаметровом диапазоне волн, ограничивается рассеянием на неоднородностях ионосферы, межпланетной и межзвездной плазмы и по разным оценкам не превосходит 0,5 - 1" (угловой секунды). Поэтому оказывается нецелесообразным применять декаметровые интерферометры с базами, превышающими тысячу километров. Это было учтено при построении системы УРАН, в которой базы интерферометров заключены в пределах 42,3 - 946,2 км. В качестве основной базовой антенны в этих интерферометрах используется антенная система север-юг УТР-2, а в качестве дополнительных инструментов применены четыре относительно небольших радиотелескопа УРАН.

Радиотелескоп УРАН-1 расположен на окраине города Змиева Харьковской области на расстоянии 42,3 км от УТР-2. Он состоит из 96 турникетных широкополосных вибраторов, образующих четыре параллельных ряда, ориентированных с запада на восток. Размеры антенной решетки 193 x 28 м. Каждый турникетный вибратор этого и всех остальных радиотелескопов УРАН установлен на высоте 3,5 м над землей и состоит из двух взаимно перпендикулярных широкополосных вибраторов, конструкция которых такая же, как и вибраторов УТР-2. Оси линейных вибраторов ориентированы к линии меридиана под углом $\pm 45^\circ$. Вид таких излучателей и всей антенны сверху приведены на рис. 3 и 4. Луч антенны управляется электрически, при этом обеспечивается слежение за источниками

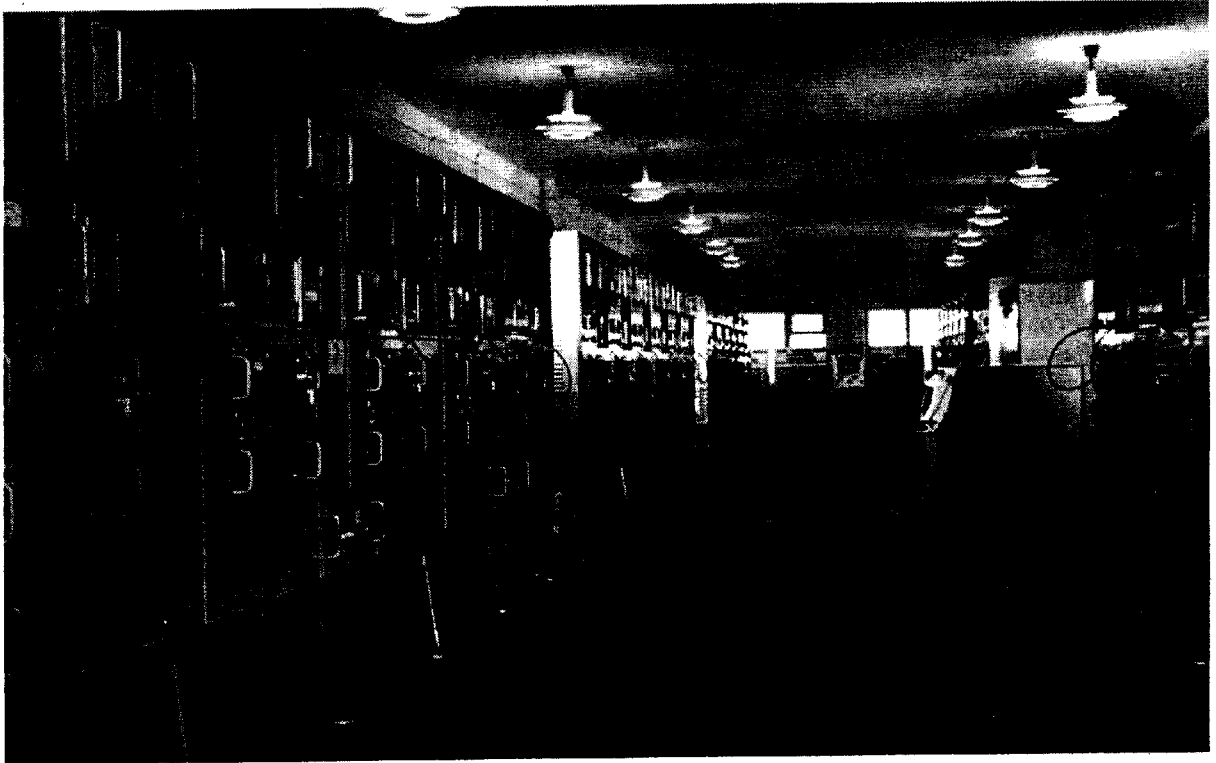


Рис. 2. Аппаратный зал радиотелескопа

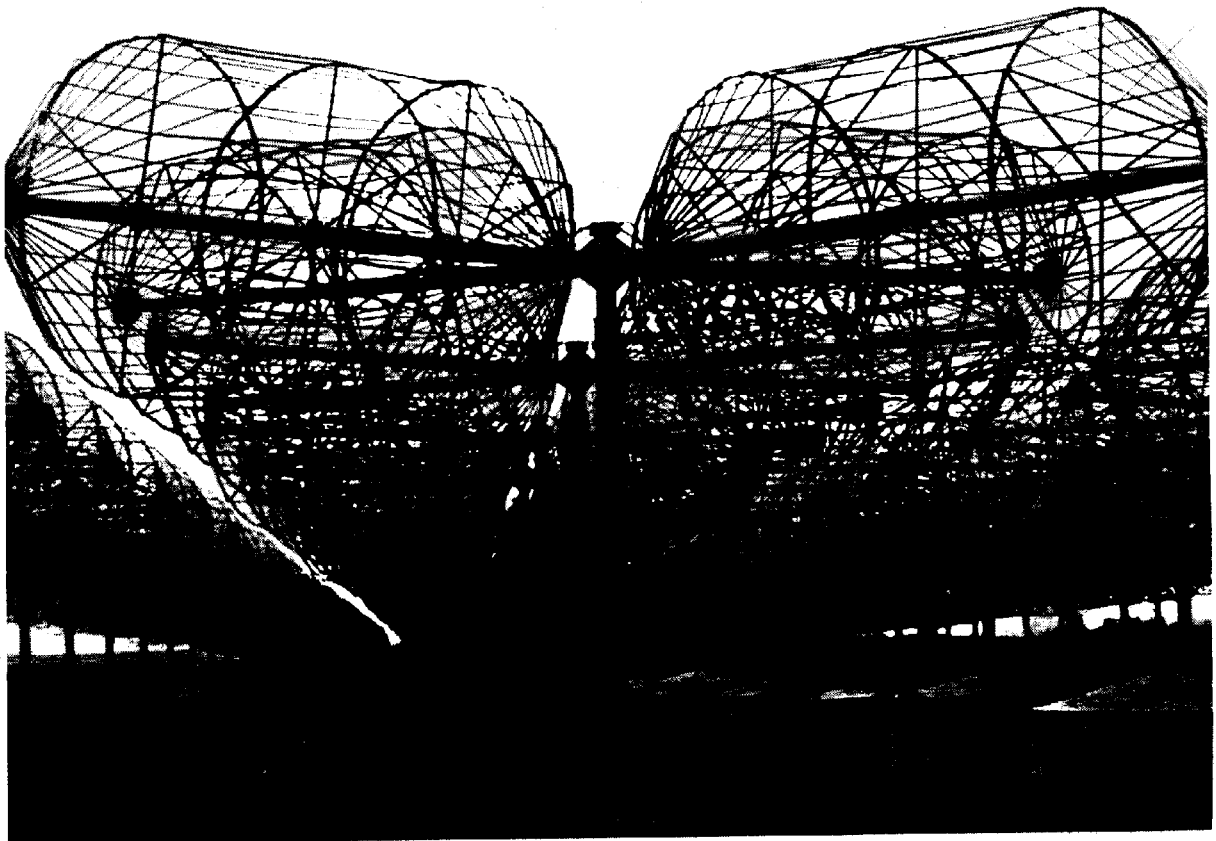


Рис. 3. Антенная решетка

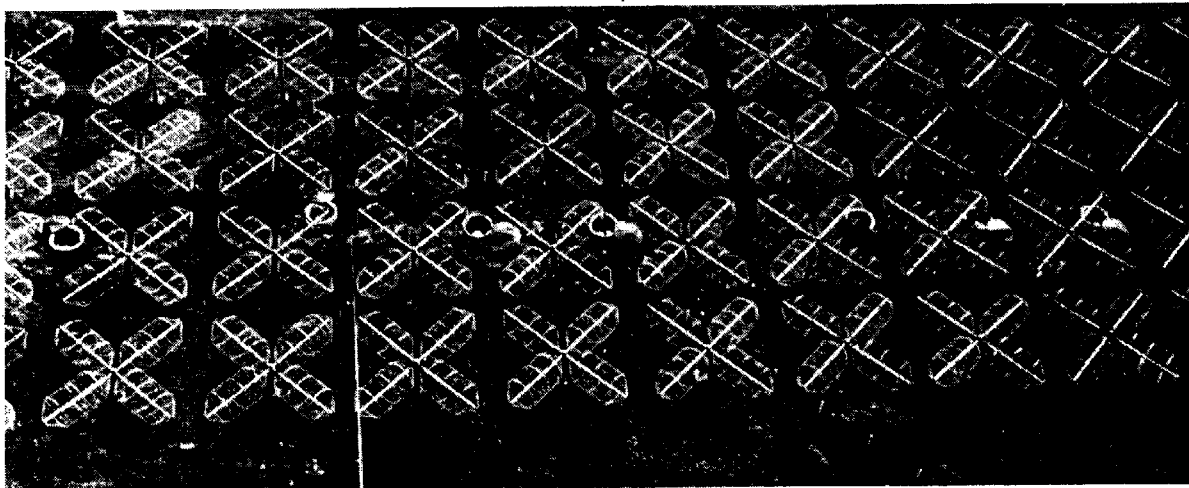


Рис. 4. Антенная решетка

при склонениях от -20° до $+90^\circ$, а по прямому восхождению в пределах $\pm 4\text{ч}$. Эффективная площадь антенны 5000 м^2 . Наличие турникетной антенны позволяет вести одновременно наблюдения на двухлинейных или круговых поляризациях и благодаря этому можно учесть влияние ионосферы на поляризацию принимаемых сигналов при измерениях. Этот интерферометр обеспечивает на частоте 25 МГц разрешение около $15''$.

Радиотелескоп УРАН-2 расположен в селе Степановка восточнее г.Полтавы на расстоянии 152,3 км от УТР-2. Инструмент состоит из 512 турникетных вибраторов, размеры его антенного поля $118 \times 238\text{ м}$, эффективная площадь 28000 м^2 . Разрешающая способность интерферометра УРАН-2 составляет на частоте 25 МГц около $4''$.

Радиотелескоп УРАН-3 расположен вблизи города Шацка Волынской области на расстоянии 946,2 км от УТР-2. Антенная система его состоит из 256 турникетных вибраторов. Размеры антенной решетки $58 \times 238\text{ м}$, эффективная площадь 14000 м^2 , разрешающая способность интерферометра УРАН-3 на частоте 25 МГц около $0''{,}7$.

Радиотелескоп УРАН-4 расположен вблизи поселка Беляевка Одесской области на расстоянии 613,1 км от УТР-2. Антенная система радиотелескопа состоит из 128 турникетных вибраторов. Размеры ее $28 \times 238\text{ м}$, эффективная площадь 7000 м^2 , разрешающая способность интерферометра УРАН-4 на частоте 25 МГц около $1''$. Из-за небольшой эффективной площади антенн радиотелескопов УРАН интерференцию между сигналами антенн инструментов наблюдать практически невозможно. Поэтому при измерениях наблюдается только интерференция между сигналами, принятыми антенной север-юг радиотелескопа УТР-2 и каждым из инструментов

системы УРАН. Разработка системы УРАН была проведена тремя организациями Академии наук Украины - Радиоастрономическим институтом (УТР-2, УРАН-1, УРАН-4), Львовским физико-механическим институтом им.Г.В.Карпенко (УРАН-3) и Полтавской гравиметрической обсерваторией Института геофизики им.С.И.Субботина (УРАН-2). На радиотелескопе УТР-2 и радиоинтерферометрах УРАН в течение ряда лет ведутся наблюдения различных космических объектов, излучающих дециметровые волны, находящихся как в нашей Галактике, так и за ее пределами. Результаты этих исследований опубликованы в нескольких монографиях и во многих статьях отечественных и зарубежных научных журналов.

Космические объекты, излучающие и поглощающие дециметровые волны

Как показали наблюдения, дециметровые радиоволны излучают или поглощают Солнце, планета Юпитер, межзвездная среда, остатки сверхновых звезд, пульсары, области ионизированного водорода и углерода, радиогалактики, квазары.

Исследование всех этих объектов проводилось по программам, приведенным ниже.

Солнце

Солнце наиболее близкая к нам звезда, находящаяся на расстоянии 150 миллионов километров. Кроме яркого диска с четкими краями с радиусом R_\odot в 700 тысяч километров, называемого фотосферой, который наблюдается невооруженным глазом, на Солнце вокруг фотосферы существует еще один тонкий слой - хромосфера.

Вокруг хромосферы располагается солнечная корона, которую в оптическом диапазоне удастся наблюдать лишь во время солнечных затмений. Обычно температура фотосферы не превышает 6000 К, хромосферы 30000 К, а температура солнечной короны около 1000000 К. Каждая из этих областей Солнца излучает и поглощает излучение с различной длиной волны. Из фотосферы принимаются миллиметровые и сантиметровые радиоволны, из хромосферы – дециметровые, а метровые и декаметровые радиоволны излучаются солнечной короной. Таким образом, изучая солнечное излучение в различных радиодиапазонах, мы получаем возможность исследовать солнечную структуру в глубину. Декаметровое излучение солнечной короны регулярно наблюдалось на радиотелескопе УТР-2 и интерферометре УРАН-1. Для этих наблюдений была разработана специальная аппаратура (спектрограф и поляриметр), с помощью которой изучались рассеивающие свойства солнечной короны как на сравнительно небольших расстояниях от центра Солнца (порядка нескольких радиусов Солнца R_{\odot}), так и на больших расстояниях до $200 R_{\odot}$ [4]. Кроме того, проводился поиск локальных источников медленно меняющейся со временем компоненты радиоизлучения Солнца, которая по мнению ряда радиоастрономов существует не только на сантиметровых радиоволнах, но и наблюдается на волнах декаметрового диапазона. В ходе этих исследований на угловых расстояниях от центра Солнца меньше $10 R_{\odot}$ был обнаружен более слабый, чем квадратичный закон (обычно наблюдаемый на более коротких радиоволнах) роста угла рассеяния распространяющегося в солнечной короне радиоизлучения в зависимости от длины радиоволны. Была разработана теория этого явления, рассматривающая распространение электромагнитных волн в сферически симметричной неоднородной короне с учетом рассеяния и рефракции, которая объяснила наблюдаемый эффект. Установлен закон распределения электронной концентрации в солнечной короне на больших расстояниях (больше $100 R_{\odot}$) путем просвечивания солнечной короны излучением пульсара в Крабовидной туманности [4, 5]. Аналогичной методикой получены двумерные изображения космических источников, наблюдаемых через солнечную корону, для объяснения которых была впервые использована модель эллиптической солнечной короны с почти радиально вытянутыми, прижатыми к экваториальной плоскости неоднородностями электронной плотности. Впервые на частоте 25 МГц получены двумерные распределе-

ния яркости спокойного Солнца. Оказалось, что используемые обычно при изучении такого распределения модели с мелкомасштабными изотропными неоднородностями в верхней, пронизываемой солнечным ветром короне, встречаются с трудностями при объяснении ряда экспериментальных фактов. Показано, что как и в случае просвечивания солнечной короны радиоизлучением дискретных источников наблюдается лучшее согласие расчетов с экспериментом, если рассматривать модели с почти радиально вытянутыми корональными структурами. В отличие от данных, полученных ранее на сантиметровых и дециметровых радиоволнах, и более ранних наблюдений некоторых иностранных радиоастрономов, в декаметровом диапазоне не была обнаружена медленно меняющаяся компонента солнечного радиоизлучения. В последнее время этот результат подтвержден австралийскими учеными, проводившими измерения на радиоволнах метрового диапазона.

Наряду с изучением спокойного Солнца проведены наблюдения нестационарного излучения – солнечных всплесков [6 - 8], которых различается до пяти типов. Всплески первого (I) типа и связанные с ними шумовые бури состоят из медленно возрастающего непрерывного радиоизлучения в широкой полосе частот. Этот процесс может длиться от нескольких часов до нескольких дней. Всплески второго (II) и третьего (III) типов представляют процессы, длящиеся минуты и даже секунды. При этом происходит изменение частоты с большой скоростью – от 0,5 МГц/с (II тип) до 20 МГц/с (III тип). Эти дрейфующие по частоте всплески связаны с плазменными колебаниями в короне, вызванными либо ударными волнами (II тип), либо пучками электронов (III тип). Всплески IV типа – это частично поляризованное непрерывное широкополосное излучение, которое наблюдается от сантиметровых до декаметровых радиоволн. Всплески U типа, принимаемые в основном на волнах метрового диапазона, длятся от нескольких секунд до нескольких минут. U некоторых всплесков, в частности – III типа, существуют еще подтипы, обозначаемые различными буквами и наблюдаемые чаще всего на метровых волнах, которые обладают сложной частотно-временной структурой (диффузно размытые по частоте в виде цепочки или отдельных узкополосных линий). На УТР-2 наиболее подробно исследовались всплески солнечного излучения III типа.

Для источников всплесков этого типа на различных гелиодолготах наблюдалась идентичность распределения угловых размеров, положений и знаков поляризаций излучения. Эти

данные свидетельствуют о единстве природы различных подтипов источников всплесков III типа. Существует теория плазменной природы генерации всплесков III типа. В пользу этой теории свидетельствует ряд проведенных измерений на кратных частотах: 25; 12,5; 6,25 МГц. Эти данные подтверждают гармоническую связь между составляющими двойных всплесков IIIв и III типов. Оказалось, что имеет место замедление примерно на 17% средней скорости электронных потоков, которые возбуждают всплески типа IIIв при движении между уровнями 25 и 6,25 МГц. При изменениях были обнаружены диффузные (размытые во времени) всплески и их цепочки типа IIIд, которые, как оказалось, представляют собой наложение приходящих к наблюдателю прямым и отраженным от низких слоев солнечной короны лучом обычного диффузного всплеска, который генерируется на второй гармонике плазменной частоты. Было установлено, когда источник декаметровой шумовой бури III типа наблюдается в центральной части солнечного диска, его излучение регистрируется на основном тоне плазменной частоты, а если это происходит вблизи лимба, то регистрируется вторая гармоника плазменных колебаний.

Пульсары

Пульсары – это космические объекты, которые в отличие от всех других излучают не непрерывные во времени, а дискретные сигналы в виде строго периодически повторяющихся радиоимпульсов. Возможность приема декаметрового радиоизлучения пульсаров до начала этих исследований вообще подвергалась сомнению некоторыми радиоастрономами. Это было связано с тем, что с понижением частоты увеличивается рассеяние в межзвездной среде, что может приводить к исчезновению импульсного характера излучения, как, например, у пульсара, находящегося в Крабовидной туманности, или у миллисекундного пульсара 1937 + 21 (цифры означают прямое восхождение и склонение объекта). Только эксперименты, выполненные с помощью УТР-2 в начале 60-х годов, впервые показали, что радиоизлучение пульсаров в декаметровом диапазоне в принципе можно принимать вплоть до частоты 10 МГц [9] (пульсар PSR 0869 + 71). Оказалось, что можно наблюдать лишь близкие к Земле пульсары и поэтому на декаметровых волнах удалось пока исследовать около десяти пульсаров из общего числа пятисот известных. Наиболее существенное отличие излучения пульсаров на декаметровых волнах от излуче-

ния на более высоких частотах заключается в следующем. На высоких частотах излучение пульсаров состоит из одиночных импульсов, которые повторяются через определенный период, а в промежутке между этими импульсами излучение, как правило, отсутствует. На низких частотах в декаметровом диапазоне у всех пульсаров, которые удалось наблюдать, в промежутках обнаружено интенсивное, так называемое интеримпульсное излучение. Хотя межимпульсная картина излучения пульсаров очень сложна и изменяется во времени, в ряде случаев, определив средний профиль излучения, удается установить стабильные по положению во времени максимумы и минимумы и наблюдать симметрию структуры излучения относительно главных импульсов. Оказалось, что по своей структуре низкочастотное излучение пульсаров похоже на декаметровое излучение планеты Юпитер [10]. Хотя эти объекты по своей структуре и физическим свойствам совершенно различны, тем не менее и у пульсаров, и у Юпитера существуют магнитные поля, имеющие дипольный характер, которые не совпадают с осями вращения объектов. Очень важно попытаться установить, как далеко может быть проведена аналогия между этими столь различными космическими телами. Если будет доказано, что излучения пульсаров и Юпитера идентичны, то близость планеты по сравнению с пульсарами позволит более детально изучать физические процессы, происходящие в них.

Спектральные линии декаметрового диапазона

Под радиолиниями в радиоастрономии подразумевают космическое излучение, которое генерируется или поглощается в очень узкой полосе частот сравнительно с центральной частотой сигнала. Исследование излучения радиолиний атомами и молекулами стало одним из основных направлений в современной радиоастрономии. Это излучение связано с атомной структурой вещества. Электроны располагаются вокруг ядра на различных уровнях, характеризуемых главным квантовым числом n . При поглощении энергии внешнего излучения электроны переходят с уровней с меньшей энергией на внешние с большей энергией (процесс ионизации). При обратном процессе (рекомбинации) электроны переходят с внешних уровней с большей энергией на внутренние с меньшей, излучая на строго определенных частотах рекомбинационные линии. Чем больше n , тем ближе друг к другу соседние

уровни и при достаточно большом n они сливаются, образуя так называемый континуум, характеризуемый излучением в сплошной полосе частот. До радиоастрономических исследований предполагалось, что это происходит при $n > 10$, однако прием космических радиолиний заставил изменить такую точку зрения. Хотя подавляющее большинство таких линий находится в области миллиметровых, сантиметровых и дециметровых радиоволн, оказалось, что и в декаметровом диапазоне также должны наблюдаться радиолинии. Как показал впервые И.С.Шкловский, на этих волнах могут быть обнаружены линии сверхтонкой структуры нейтрального азота [II]. Интенсивность излучения этой линии очень небольшая, поэтому отношение температуры излучения линии к температуре космического фона по различным оценкам должно составлять $10^{-4} - 10^{-5}$. Тем не менее предполагалось, что на таком чувствительном инструменте, как УТР-2, можно попытаться обнаружить эту линию. Другой известный советский радиоастроном и астрофизик Н.С.Кардашев показал, что в радиодиапазонах можно наблюдать рекомбинированные линии межзвездных атомов. Эти линии были впервые обнаружены в нашей стране на высоких частотах, на которых главные квантовые номера этих линий не превышали 100. Хотя излучение в таких линиях в декаметровом диапазоне ожидалось очень слабым, так как главные квантовые номера должны были превышать 600, было решено по инициативе С.Я.Брауде наряду с линией азота начать поиск рекомбинационных линий водорода. С этой целью луч радиотелескопа УТР-2 ориентировался на интенсивный радиоисточник, который находится в остатке сверхновой звезды Кассиопеи А. Было известно, что излучение этого источника распространяется через плотные облака нейтрального водорода в галактической плоскости, которые концентрируются как в более близком к Земле рукаве Ориона, так и в более дальнем рукаве Персея. Однако в ходе длительных наблюдений рекомбинационные линии водорода, так же как и линию азота, в первых наблюдениях обнаружить не удалось. После разработки специальной спектральной аппаратуры с целью резкого увеличения чувствительности в дальнейших экспериментах был обнаружен ряд радиолиний, оказавшихся рекомбинационными линиями углерода с очень высокими квантовыми номерами [12, 13]. Главные квантовые номера обнаруженных линий в несколько раз превышали наблюдавшиеся ранее, а их частоты на порядок ниже всех измеренных линий. В настоящее время удалось

принять рекомбинационные линии углерода с максимальным значением $n = 814$, при этом размеры излучающего иона углерода составляют около 0,05 мм. Отметим, что впервые обнаружены линии не в излучении, а в поглощении, причем наблюдается очень существенное (до десятикратного) их расширение. Эти исследования показали, что в межзвездной среде имеет место сильно выраженное отклонение от равновесных условий. Так как углерод и его ионы играют важную роль в различных процессах, протекающих в межзвездной среде, то данные, полученные с помощью этих исследований, являются источником новой информации о физических условиях в космосе [14]. В частности определено, что значительные объемы холодного межзвездного газа с температурой 20 - 50 К могут содержать ионизированный углерод плотностью 0,05 - 0,1 см⁻³ при практически нейтральном водороде. Такая модель межзвездной среды отличается от той, которая формирует высокочастотные рекомбинационные линии. Наблюдение декаметровых рекомбинационных линий проводилось не только в направлении на Кассиопею А, но и в других направлениях, на такие, например, объекты, как пылевые облака и галактики. У обнаруженных здесь линий отношение их температуры к температуре среды достигало 10^{-3} , что позволяло проводить на радиотелескопе УТР-2 достаточно точные измерения. Из полученных результатов следует, что в дальнейшем может существенно расшириться круг объектов, в направлениях на которые можно будет наблюдать рекомбинационные линии декаметрового диапазона. В настоящее время разрабатывается новая спектральная аппаратура, с помощью которой А.А.Коноваленко и его сотрудникам, может быть, удастся обнаружить предсказанную более 30 лет тому назад И.С.Шкловским линию нейтрального азота.

Области ионизированного водорода и молекулярно-пылевые облака

Одними из возможных областей космического пространства, где могут образовываться звезды, являются области ионизированного водорода III. Поэтому изучение физических процессов, протекающих в этих областях, представляет большой научный интерес. Исследование областей III проводится как оптическими, так и радиометодами. В радиоастрономии с этой целью наблюдают в основном рекомбинационные линии, возникающие в этих областях. При этом внутренний объект областей III возможно изучать с помощью наблюдений высокочастотных рекомбинационных линий. Однако с увеличением длины радио-

волн такая среда становится оптически более плотной и ее внутренние области экранируются. Появляется возможность, используя как декаметровый континуум, так и декаметровые рекомбинационные линии, исследовать внешнюю структуру областей НН. Кроме того, излучение космического фона, распространяясь через области НН, может очень сильно поглощаться, и по величине этого поглощения можно определять ряд важных физических характеристик областей, а также изучать нетепловое излучение Галактики и Метагалактики. Области НН в Галактике имеют различные угловые размеры – от секунд угловой дуги до нескольких градусов. Разрешающая способность радиотелескопа УТР-2 позволяет измерять области НН с размерами около одного углового градуса. Таких областей в северном небе Галактики оказалось около двадцати. Это в основном протяженные газовые туманности. Кроме того, удалось исследовать несколько молекулярных пылевых облаков. У газовых туманностей были определены такие физические параметры, как электронная температура, оптическая толщина, плотность электронов и связанная с ней мера эмиссии, а также объемная плотность излучения галактического фона. Ряд этих характеристик был определен с помощью радиотелескопа УТР-2 впервые. Эти измерения показали, что параметры различных туманностей могут изменяться в широких пределах. Так, электронная температура изменяется от 1500 К до 11000 К, мера эмиссии от 80 до 13000 пк см^{-6} , оптическая толщина от 0,7 до 50 и объемная плотность нетеплового излучения галактического фона от 7 до 30 кпк^{-1} . Полученные данные позволили сделать ряд важных выводов, касающихся спиральной структуры нашей Галактики и межзвездного магнитного поля. Кроме того, удалось оценить интенсивность метагалактического фона, измеряя поглощение этой компоненты в отдаленных от центра Галактики областях НН [15 - 17]. Например, было определено, что на частоте 14,7 МГц температура изотропного метагалактического излучения примерно равна 31100 К. Эти и другие данные впервые были получены экспериментально, а не из анализа разных теоретических моделей. Наряду с измерениями областей НН удалось также впервые обнаружить поглощение излучения галактического фона в направлении на ряд молекулярно-пылевых облаков, объектов, качественно отличных от эмиссионных газовых туманностей. Для этих облаков были сделаны оценки степени ионизации, электронной плотности и меры эмиссии.

Наблюдения остатков сверхновых звезд (ОСН)

Остатки сверхновых звезд и их структура оказались в центре внимания современной астрофизики, так как эти объекты связаны с пульсарами, черными дырами, с происхождением космических лучей, эволюцией звезд, рентгеновскими и гамма-источниками, с параметрами межзвездной Среды. В настоящее время в Галактике обнаружено около 150 ОСН. Среди этих объектов имеется много таких, угловые размеры которых измеряются от нескольких угловых минут до десятков градусов. Поэтому ОСН на декаметровых волнах оказалось целесообразным наблюдать как с помощью радиотелескопа УТР-2 (протяженные объекты), так и на интерферометрах УРАН (компактные объекты). Рассмотрим кратко, как образуются ОСН. Рождение новых звезд в непрозрачных в оптике запыленных облаках сопровождается радиоизлучением в области ионизированного водорода и в молекулярных линиях. Примерно для одного процента звезд их гибель также сопровождается радиоизлучением. Пройдя положенный в соответствии с массой звезд цикл термоядерных превращений, большинство звезд эволюционирует в красные гиганты, которые, теряя часть оболочки в виде кольцевых планетарных туманностей, оставляют плотный планетарный остаток, называемый белым карликом. Однако некоторые звезды заканчивают свою эволюцию иначе. Связанная, по видимому, с сжатием центральной части звезды ударная волна и детонация ядерного горючего на ее периферии приводят к срыву оболочки и ярчайшей световой вспышке. Такая звезда и называется сверхновой. Обычно она в течение месяцев гаснет, но сброшенная оболочка (остаток сверхновой) продолжает расширяться в пространстве и светиться в виде туманности иногда многие тысячелетия. Энергия взрыва в значительной мере расходуется на ускорение частиц до релятивистских скоростей. Кроме того, в ОСН частицы ускоряются и на фронте ударной волны, обрамляющей сорванную взрывом оболочку. В некоторых случаях обнаружены мощнейшие источники ускоренных частиц, связанные с звездным остатком сверхновой. В частности, таким источником оказался пульсар, обнаруженный в Крабовидной туманности. Ускоренные релятивистские частицы излучают радиоволны, в том числе и декаметрового диапазона. Это излучение изучалось с помощью УТР-2 и системы интерферометров УРАН [18]. Определены как структура ОСН, т.е. распределение интенсивности радиоизлучения по их поверхности, так и зависимость

плотности излучаемого потока от частоты. Такие данные были определены для всех протяженных ОСН северного неба (около двадцати), у которых угловые размеры превышали один градус. Кроме того, детально исследовались такие радиосточники, как пульсар в Крабовидной туманности и наиболее интенсивно излучающий в декаметровом диапазоне ОСН Кассиопея А. Было установлено, что у многих протяженных ОСН в декаметровом диапазоне наблюдаются особенности в частотном спектре. Линейно (в логарифмическом масштабе) растущая с понижением частоты интенсивность излучения на декаметровых волнах сперва достигает максимума и при дальнейшем понижении частоты начинает уменьшаться. Как показали детальные исследования, основной причиной этого эффекта является поглощение нетеплового излучения ОСН в областях ионизированного водорода или углерода. В некоторых случаях наблюдается поглощение радиоизлучения галактического фона, которое генерируется в пространстве за источником в направлении на него. Оказалось, что излучение ОСН в общем случае представляет собой смесь из тепловой и нетепловой компонент радиоизлучения. В разных ОСН эти компоненты могут быть перемешаны или тепловая компонента представляет собой области НН, которые либо окружают ОСН, либо находятся перед ними на луче зрения. Именно поэтому частотные спектры протяженных ОСН имеют указанные особенности на декаметровых волнах.

Интересные данные были получены при изучении ОСН в Кассиопее А. Обнаруженный ранее в ряде работ точечный радиосточник, как показали наблюдения на УРАН, в этом ОСН отсутствует. Угловая структура радиоизлучения остатка, определенная на сантиметровых и дециметровых радиоволнах, в декаметровом диапазоне в основном сохраняется, хотя и начинает несколько деформироваться, возможно, из-за поглощения излучения в облаках ионизированного углерода [18].

Дискретные источники космического излучения

Астрономия в основном наблюдательная наука, многие закономерности, установленные в ней, получены статистической обработкой большого объема наблюдательных данных. Такая информация содержится в специальных каталогах звезд, галактик, квазаров, ОСН и других космических объектов. Одной из основных научных программ, для которой предназначался радиотелескоп УТР-2, было составление систематического каталога дискретных

радиосточников северного неба на радиоволнах декаметрового диапазона. Такого каталога до этого еще не было, хотя на более высоких радиочастотах существовал ряд каталогов, содержащих десятки тысяч космических радиосточников. В декаметровом диапазоне аналогичный каталог начал составляться с 1972 года. Он называется Граковским и имеет обозначение GR [19]. Здесь приведены координаты наблюдаемых радиосточников и плотности потоков радиоизлучения на шести частотах – 10; 12,6; 14,7; 16,7; 20 и 25 МГц с оценкой ошибок измерений, число наблюдений каждого радиосточника и характеристика надежности данных. К настоящему времени получены данные, охватывающие около 70% поверхности северного неба по склонению от -13° до $+20^\circ$, от $+41^\circ$ до $+60^\circ$ и по прямому восхождению от 0 до 24 ч. Измерено около 4000 источников космического радиоизлучения, из которых около 10% наблюдались впервые. Все эти источники находятся вне пределов нашей Галактики и представляют собой квазары, радиогалактики или объекты, пока не отождествленные с известными в оптическом диапазоне. Используя полученные данные, а также измерения на более высоких частотах, определены частотные спектры более 1000 источников в широком диапазоне волн – от декаметровых и сантиметровых [20]. Оказалось, что 70% частотных спектров линейны, причем интенсивность излучения с ростом частоты убывает, что свидетельствует о нетепловом, синхротронном механизме радиоизлучения во всех этих объектах. Около 20% источников имеют спектры с отрицательной кривизной, когда при понижении частоты наблюдаемый поток излучения вначале достигает максимума, а затем начинает уменьшаться. 10% спектров имеют положительную кривизну, когда при понижении частоты меньше определенного значения плотность потока начинает возрастать быстрее, чем по линейному закону, наблюдаемому на более высоких частотах. Пользуясь данными полученного с помощью радиотелескопа УТР-2 каталога дискретных источников, оказалось возможным на самых низких частотах попытаться исследовать космологическую эволюцию различных космических объектов, в частности радиогалактик и квазаров [21 - 24]. Это удалось осуществить с помощью анализа статистической связи числа наблюдаемых источников в зависимости от плотности потока излучения. Чем дальше от нас расположен космический источник, тем более слабый поток в среднем принимается от него. Вместе с тем излучение от более далеких космических объектов, учитывая

конечную скорость распространения электромагнитных волн, возникло в более ранней стадии их эволюции – с момента возникновения Вселенной. Согласно астрофизическим оценкам время возникновения квазаров и радиогалактик оценивается более $10^8 - 10^9$ лет. Если эти данные справедливы, то при подсчете числа объектов в зависимости от принятых радиосигналов можно было бы обнаружить, что, начиная с какого-то уровня сигналов (т.е. расстояний) сигналы от них должны исчезать, так как это излучение соответствовало бы эпохе до возникновения этих объектов. Радиогалактики, обладающие по сравнению с квазарами большими угловыми размерами и соответственно меньшей поверхностной яркостью, наблюдаются на значительно меньших удалениях, чем квазары, поэтому указанный эффект следовало искать по излучению квазаров. Получить такие данные по измерениям на сантиметровых, дециметровых и метровых волнах не удалось и только на декаметровых радиоволнах впервые был обнаружен этот эффект исчезновения сигналов от квазаров на расстоянии в несколько тысяч мегапарсек, которое соответствовало эпохе формирования этих объектов.

Угловая структура внегалактических радиисточников

Приведенные данные о частотных спектрах дискретных источников позволяют сделать несколько важных выводов. Обращает на себя внимание, например, такой факт, что у большинства космических радиисточников частотные спектры в логарифмическом масштабе линейны. Вместе с тем из наблюдений на высоких радиочастотах известно, что у подавляющего большинства космических радиисточников есть детали, обладающие малыми угловыми размерами. В таких деталях должно наблюдаться явление самопоглощения излучения (реабсорбция) в самой излучающей релятивистской плазме, находящейся в космических магнитных полях. При реабсорбции частотные спектры источников должны быть нелинейны, с отрицательной кривизной, однако такие спектры наблюдаются сравнительно редко. Одно из возможных объяснений этого может быть связано с тем, что декаметровые и более короткие радиоволны излучаются разными областями источника: сантиметровые волны излучаются внутренними, компактными областями, а декаметровые волны – внешней их оболочкой. При такой гипотезе угловые и линейные размеры одного и того же источника на разных частотах должны отличаться: на более

коротких волнах они должны быть меньше, чем на длинных. Для проверки этого необходимы независимые измерения угловых размеров дискретных источников на декаметровых волнах, так как до последнего времени практически все данные о детальной угловой структуре источников были получены на дециметровых и сантиметровых радиоволнах. С этой целью ведутся наблюдения на системе декаметровых радиоинтерферометров УРАН. Пока изучено около десяти радиогалактик и квазаров. Наряду с декаметровыми данными при этом естественно использовались результаты наблюдений этих же объектов на более высоких частотах (до 5000 - 8000 МГц). Исследуемые источники имели как однокомпонентную структуру, так и более сложную, состоящую из нескольких компонент. Приведем результаты некоторых наблюдений, которые характерны для ряда идентичных объектов. Например, одна из наиболее удаленных радиогалактик ЗС123 в диапазоне частот от 16,7 до 8000 МГц оказалось имеет угловую структуру, состоящую из одной протяженной компоненты с размерами около $25 - 30''$ дуги, т.е. на всех частотах основная доля излучения обусловлена одной и той же областью источника [25]. Такие же измерения были проведены с неотожествленным метагалактическим радиисточником ЗС134 – типичным двухкомпонентным объектом. Измерения в том же интервале частот показали, что и в этом источнике угловые размеры отдельных компонент, их взаимное расположение и размеры всего источника в целом не изменяются заметно с частотой [26]. Аналогичная ситуация наблюдалась и для нескольких других протяженных объектов. Вместе с тем в ряде случаев имеет место иная картина, когда наблюдается существенное изменение с частотой угловой структуры и размеров в таких, например, объектах, как квазары [27 - 29]. Рассмотрим в качестве примера квазар ЗС196. На частотах от 5000 до 408 МГц он состоит в основном из двух компонент – более яркой юго-западной и северо-восточной. Обе имеют размеры около двух секунд и разнесены друг от друга на $5,4''$ при позиционном угле около 26° . На более низких частотах структура квазара начинает изменяться. Вначале с понижением частоты у обоих компонент наблюдается максимум излучения и затем его быстрое падение, по-видимому, связанное с реабсорбцией. Для северо-восточной компоненты это происходит на частотах ниже 200 МГц с максимумом на 160 МГц, а для юго-западной – на частотах ниже 50 МГц с максимумом на 30 МГц. Таким

образом, в декаметровом диапазоне излучает только одна из компактных компонент (юго-западная). Основное излучение квазара в декаметровом диапазоне обеспечивается впервые обнаруженной при наблюдениях на радиointерферометрах УРАН протяженной компонентой с угловыми размерами около $26''$. Ее интенсивность излучения, как оказалось, очень быстро убывает с ростом частоты, поэтому на частотах выше 50 - 100 МГц протяженная компонента не наблюдалась. Однако на самых низких частотах (ниже 16,7 МГц) следует ожидать, что практически все излучение квазара будет определяться только этой компонентой. По предварительным данным появление в структуре радиисточника в декаметровом диапазоне протяженной компоненты с угловыми размерами в несколько десятков секунд характерно и для других квазаров. Возможно, что эти интенсивно излучающие в декаметровом диапазоне протяженные компоненты связаны с туманностями, которые были недавно обнаружены в оптическом диапазоне у нескольких даже очень удаленных квазаров.

Юпитер

На радиотелескопе УТР-2 проводятся наблюдения декаметрового излучения Юпитера [30]. Детально исследованы вопросы, связанные с спорадическим излучением этой планеты декаметровых радиоволн. Основное внимание было уделено так называемым S-бурям. Впервые были получены широкополосные динамические спектры, анализ которых показал, что S-компонента излучается в тонкой конической поверхности. Оказалось, что S-бури генерируются почти исключительно в южной полярной области Юпитера. Анализ групповых частотных S-бурь показал, что в зависимости от координат спутника Юпитера Ио имеет место корреляция мощности S-бурь с дрейфом и угловой скоростью основания трубки Ио. Наряду с экспериментальными исследованиями декаметрового излучения Юпитера, подробно описанными в [30], была разработана теория такого излучения [31 - 32], которая объясняет ряд наблюдаемых в эксперименте эффектов: механизм генерации, частотный спектр, структуру S-бурь и др. Согласно теории механизм излучения S-бурь связан с пучками электронов, возникающих в трубке Ио-Юпитер вблизи магнитных полюсов планеты. Двигаясь по трубке в сторону Ио, пучки электронов вследствие черенковской неустойчивости генерируют плазменные волны аномальной дисперсии на локальной частоте верхнегибридного резонанса

и плазменные волны на локальной частоте нижнегибридного резонанса. Одним из принципиальных положений такого механизма является использование линейной трансформации плазменных волн в электромагнитные. Такое преобразование эффективно лишь тогда, когда масштаб пространственной неоднородности сравним с длиной волны электромагнитного излучения. В условиях Юпитера генерация S-бурь происходит внутри трубки Ио, которую естественно рассматривать как шнур плазмы с повышенной по сравнению с ионосферой плотностью заряженных частиц, обеспечиваемой существующим в трубке Ио электрическим полем. При этом из-за сильной замагниченности плазмы в поперечном направлении трубка Ио обладает резким градиентом концентрации заряженных частиц на границе. Это обстоятельство и обеспечивает эффективность механизма линейной трансформации волн и селективность его по отношению к верхнегибридному излучению. Существенен для данного механизма и учет низкочастотных гидродинамических колебаний трубки Ио. Эти колебания, искривляя ее поверхность, создают периодические модуляции ее параметров по длине и управляют процессом образования диаграммы направленности электромагнитного излучения и динамических спектров. Указанная теория позволяет непротиворечивым образом объяснять экспериментальные данные, полученные при наблюдениях радиоизлучения Юпитера.

Теоретические исследования

Эти работы охватывают широкий круг вопросов – от изучения физических процессов, происходящих в дискретных источниках, проблем активности ядер, моделей слияний галактик, образования квазаров, функции их светимостей до явлений в солнечной короне [34 - 38]. Установлена общая причина образования степенных спектров, характерных для турбулентности колмогоровского типа. Выяснен ряд свойств степенных спектров в слаботурбулентных системах волн и частиц. Изучена связь между равновесными и степенными спектрами. Получены распределения в сильном магнитном поле. Изучены нелинейные спектры, формируемые за счет синхротронных или комптоновских потерь при жесткой инжекции, когда источник релятивистских частиц локализован в области больших энергий; физические процессы, связанные со слиянием богатых газом спиральных галактик. Рассмотрены точные решения (при независимости от масс и моментов вероятности слияния галактик), которые соот-

ветствуют действующему источнику, эволюции начального распределения. Решены задачи, связанные с физикой плазмы солнечной короны, что приводит к стабилизации электронных пучков, которые наблюдаются при всплесках III типа.

Заключение

В статье кратко изложены основные результаты радиоастрономических исследований, которые ведутся в течение ряда лет в декаметровом диапазоне радиоволн на Украине в Радиоастрономическом институте Национальной Академии наук. Наблюдения в этом диапазоне на высоконаправленных инструментах проводились и за рубежом – в Австралии, Англии, Канаде и Соединенных Штатах. В отличие от наших радиотелескопов обычно там сооружались узкополосные инструменты, работающие практически на одной частоте. Для упрощения конструкции ограничивались также управлением лучом по одной угловой координате в плоскости меридиана (меридианные радиотелескопы). Все это существенно сужало круг исследований, которые проводились на этих инструментах, и ограничивало объем получаемой информации. В настоящее время за границей имеется также ряд небольших декаметровых радиотелескопов, на которых ведутся наблюдения радиоизлучения Солнца и Юпитера.

Авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность сотрудникам декаметрового отделения Радиоастрономического Института НАН Украины: Абраменкову Е.А., Абранину Э.П., Базеляну Л.Л., Боеву А.Г., Бруку Ю.М., Коноваленко А.А., Крымкину В.В., Рашковскому С.Л., Рябову Б.П., Сидорчуку М.А., Соколову К.П., которые представили авторам материалы о проведенных исследованиях.

Литература

- Брауде С.Я., Мень А.В., Содин Л.Г. // Антенный сборник. - М.: Связь, 1978, № 26, с. 3.
- Мень А.В., Содин Л.Г., Шарыкин Н.К. и др. // Антенный сборник. - М.: Связь, 1978, № 26, с. 15.
- Бобейко А.Л., Бовкун В.П., Брауде С.Я., Мень А.В. // Антенный сборник. - М.: Связь, 1978, № 26, с. 121.
- Брауде С.Я., Мень А.В., Рашковский С.Л. и др. // Докл. АН УССР, 1989, № 10, с. 70.
- Базелян Л.Л., Брауде С.Я., Мень А.В. // Астроном. журн. 1970, т. 47, № 1, с. 188.
- Abranin E.P., Bazelyan L.L. et al. // Sol. Phys. 1979, v. 62, p. 145.
- Abranin, E.P., Bazelyan L.L. et al. // Sol. Phys. 1982, v. 78, p. 179.
- Abranin E.P., Bazelyan L.L., Tsybko I.G. // Sol. Phys. 1984, v. 92, p. 293.
- Bruck Yu.M. // Austr. Journal of Phys. 1978, v. 40, p. 861.
- Брауде С.Я., Брук Ю.М. // Письма в Астроном. журн. 1980, т. 6, с. 32.
- Шкловский И.С. Космическое радиоизлучение. - М.: 1956, с. 492.
- Коноваленко А.А., Содин Л.Г. // Nature. 1980, v. 283, p. 360.
- Коноваленко А.А., Содин Л.Г. // Nature. 1981, v. 294, p. 135.
- Коноваленко А.А. // Письма в Астроном. журн. 1984, т. 10, с. 847.
- Абраменков Е.А.: Дис. канд. физ.-мат. наук. Харьков, 1986, 30 с.
- Кабакова Т.Н., Крымкин В.В., Сидорчук М.А. // Кинематика и физика небесных тел. 1989, т. 5, с. 344.
- Абраменков Е.А., Крымкин В.В. // Астроном. журн. 1992, т. 69, № 3, с. 489.
- Megn A.V., Braude S.Ya., Rashkovsky S.L. et al. // Astrophys. Space. Sci. 1993, v. 201, p. 79.
- Braude S.Ya., Sokolov K.P., Zaharenko S.M. // Astrophys. Space Sci. 1994, v. 231, p. 1.
- Braude S.Ya., Sokolov K.P., Sharykin N.K. // Astrophys. Space Sci. 1995 in press and al. literature there.
- Соколов К.П. // Письма в Астроном. журн. 1986, т. 12, с. 254.
- Соколов К.П. // Астроном. журн. 1986, т. 63, с. 426.
- Соколов К.П. // Письма в Астроном. журн. 1988, т. 14, с. 202.
- Соколов К.П. // Астроном. журн. 1988, т. 65, с. 236.
- Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л. и др. // Письма в Астроном. журн. 1987, т. 13, с. 751.
- Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л., Шарыкин Н.К. и др. // Астроном. журн. 1985, т. 62, с. 38.
- Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 1987, т. 30, с. 474.
- Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990, т. 33, с. 523.
- Мень А.В., Брауде С.Я., Рашковский С.Л. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 1990, т. 33, с. 534.

30. Рябов Б.П., Герасимова Н.Н. Декаметровое спорадическое излучение Юпитера. – Киев: Наук. думка, 1990, с. 236.
31. Боев А.Г., Лукьянов М.Ю. // Физика плазмы, 1989, т. 15, с. 1315; // УФЖ 1989, т. 34, с. 554; // Докл. АН УССР. 1990, сер. А, № 10, с. 52; // Астроном. журн. 1991, т. 69, с. 853.
32. Боев А.Г., Лукьянов М.Ю., Цвык Н.А. // Кинематика и физика небесных тел. 1993, т. 9, № 6, с. 27, 37.
33. Цвык Н.А. // Кинематика и физика небесных тел. 1994, т.10, № 3, с. 67.
34. Кац А.В., Конторович В.М. – Харьков. Препринт РИ АН, 1990, № 48, 30 с.
35. Кац А.В., Конторович В.М. // ЖЭТФ. 1990, т. 96, с. 3.
36. Конторович В.М., Кац А.В., Кривицкий Д.С. // Письма в ЖЭТФ. 1992, № 55, с. 3.
37. Мельник В.Н. // Кинематика и физика небесных тел. 1991, № 7, с. 59.
38. Мельник В.Н. // Кинематика и физика небесных тел. 1991, № 7, с. 69.

**Radio Astronomy Researches in Ukraine
in Decameter Wave Range**

S.Ya. Braude, A.V. Men'

The Article contains a short review of the ground directions of experimental and theoretical investigations carried out by researchers of Radio Astronomy Institute, NAS of Ukraine, in the range of decameter radioastronomy. Problems of construction of decameter telescopes and interferometers used for the observations described are also considered.