

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

621.396.95

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ С БОЛЬШИМИ БАЗАМИ *)

Б. Бэрк

Для обеспечения очень высокого углового разрешения сейчас работают пары радиотелескопов, расстояния между которыми составляют много тысяч километров. Такие системы могут применяться для исследований квазаров и областей эмиссии радиолиний гидроксила, для геодезических целей и для проверки общей теории относительности.

В прошлом столетии революция в технологии увеличила на несколько порядков величины наши возможности контролировать линейные размеры физических объектов. Быстрое развитие электроники в XX веке дало возможность с небывалой точностью регистрировать наступление событий во времени. Линейные размеры в настоящее время измеряются с точностью порядка 10^{-8} , временную последовательность событий мы можем создавать и регистрировать с точностью порядка 10^{-14} . Современный «радиоэквивалент» звездного интерферометра Майкельсона представляет собой интересный пример использования прежних механических принципов в новых электронных формах.

Основная цель создания радиоинтерферометров такова же, что была и у Майкельсона: угловое разрешение источников электромагнитного излучения. Принципиальное различие заключается в ограничениях, определяемых используемыми техническими средствами. Угловое разрешение звезд в видимой области электромагнитного спектра ограничивается примерно одной угловой секундой из-за нерегулярного изменения преломляющих свойств земной атмосферы; дифракционный предел разрешения в несколько угловых минут для обычных радиотелескопов, в сущности, определяется размером национального бюджета.

В настоящее время используются радиоинтерферометры с базами в несколько тысяч километров (что составляет много миллионов длин волн). Например, 43-метровый радиотелескоп в Грин-Бэнк (шт. Западная Вирджиния) в паре с радиотелескопом в Швеции образует радиоинтерферометр с базой в 110 миллионов длин волн.

Угловое разрешение подобных систем составляет тысячные доли угловой секунды, так что радиоастрономия обеспечивает разрешение, достаточное для детального исследования квазаров и областей излучения радиолинии гидроксила λ 18 см. В более близких к нам областях эти интерферометры могут быть использованы в геодезических целях (точное измерение межконтинентальных расстояний) и для создания охватывающей весь

*) Bernard F. Burke, Long-Baseline Interferometry, Phys. Today 22 (7), 54 (1969). Перевод Л. В. Самсоенко.

Бернард Ф. Бэрк — профессор физики Массачусетского технологического института (США).

земной шар системы синхронизации эталонных часов. Возможна также проверка общей теории относительности, поскольку современный радиоинтерферометр позволяет обнаружить угловое отклонение излучения квазара вблизи Солнца.

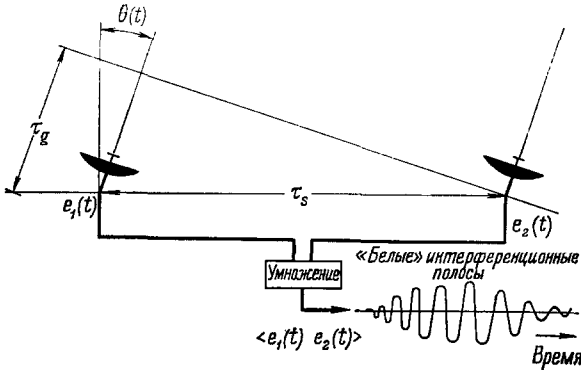


Рис. 1. Схема двухэлементного интерферометра. Две антенны принимают напряжения $e_1(t)$ и $e_2(t)$ соответственно, которые эффективно перемножаются в приемнике. Квазисинусоидальный сигнал, типа «белых» интерференционных полос, появляется по мере того, как источник перемещается через интерференционную картину.

Картина же интерференции радиоволн обычно развертывается только благодаря движению источника через диаграмму направленности системы

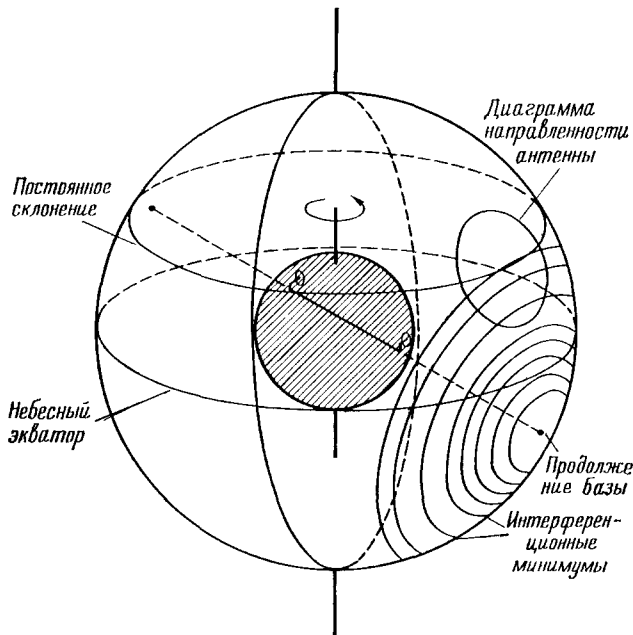


Рис. 2. Системы интерференционных полос двухэлементного интерферометра в проекции на небесную сферу.

Схема иллюстрирует связь между базой интерферометра и диаграммой направленности системы двух антенн и траектории на небесной сфере звезды с постоянным склонением.

в пространстве объекта. Два напряжения, $e_1(t)$ и $e_2(t)$, принимаемые двумя антеннами, эффективно перемножаются в приемнике, и если обе антенны направлены на источник, размеры которого малы по сравнению

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Радиоинтерферометр, схематически изображенный на рис. 1, отличается от его оптического варианта только использованием (не всегда, но как правило) единственного приемника излучения. В оптическом интерферометре вся интерференционная картина развертывается в пространстве изображения.

с шириной первичного пучка радиоволн, принимаемых одиночной антенной, сигнал на выходе приемника меняется квазисинусоидально, по мере того как источник движется через диаграмму.

Более точно геометрия показана на рис. 2, где изображены небесная сфера вокруг Земли и база интерферометра, соединяющая обе антенны; база продолжена в обе стороны до пересечения с небесной сферой.

Интерференционные полосы лежат на малых кругах с центрами на базовой прямой (и ее продолжении), и по мере вращения Земли диаграмма направленности перемещается через наблюдаемый радиоисточник. Частота полос интерференции меняется с течением суток (если только источник не находится в полюсе мира) и проходит через нуль, а затем полосы повторяются в зеркальном порядке, после того как направление на источник стало касательным к системе полос.

ФУРЬЕ-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Источники радиозумов космического происхождения весьма разнообразны. Некоторые, подобно Крабовидной туманности,— это остатки вспышек сверхновых, которые можно наблюдать оптически; некоторые, например Лебедь А, представляют собой радиогалактики, которые испускают радиоволны из гораздо большего объема пространства, чем занимают оптические галактики. Некоторые, подобно пульсарам и квазарам, являются совершенно новым классом объектов, и нам хотелось бы узнать, что они собой представляют.

В дополнение к этому, по-видимому, существуют «космические мазеры», которые испускают радиоизлучение в виде отдельных линий, принадлежащих либо молекулам гидроксила (ОН), либо воды, либо тем и другим вместе.

Во всех случаях угловые размеры источников так малы, что для выявления их структуры необходимы интерференционные методы. Как правило, излучение оказывается поляризованным, так что мы должны характеризовать распределение яркости в объекте набором четырех функций $B_i(\alpha, \delta)$ ($i = 1, 2, 3, 4$), где за углы α и δ обычно выбирают прямое восхождение и склонение, хотя прямолинейные координаты с центром в источнике обычно обеспечивают достаточное приближение.

В сущности, интерференционная аппаратура представляет собой фурье-преобразователь; амплитуда и фаза интерференционной полосы при заданной ориентации определяют точку преобразования Фурье:

$$b_i(u, v) \xleftrightarrow{\quad} B_i(\alpha, \delta).$$

Переменные u и v представляют собой просто проекции базы интерферометра на плоскость, перпендикулярную лучу зрения, измеряемые в длинах волн λ наблюдаемого излучения: $u = 2\pi(x'/\lambda)$ и $v = 2\pi(y'/\lambda)$, где x' и y' — координаты проекций. Ввиду этого вращение Земли перемещает нас по определенной части плоскости фурье-преобразования, даже если антенна неподвижна относительно Земли, поскольку длина проекции базовой линии и ее ориентация со временем изменяются. Таким образом, полное фурье-преобразование может быть построено при смещении антенны вдоль узкой полосы и накопления записей преобразования при каждом положении антенны. Интересное приложение этого метода было осуществлено кавендишской группой под руководством Мартина Райла¹; эта группа опубликовала значительное количество карт источников радиоизлучения на волнах λ 21 и 75 см,² полученных при наблюдениях с

одномильным (1,6 км) интерферометром. Один из наиболее интересных исследованных ими объектов — это сверхновая Тихо Браге², показанная

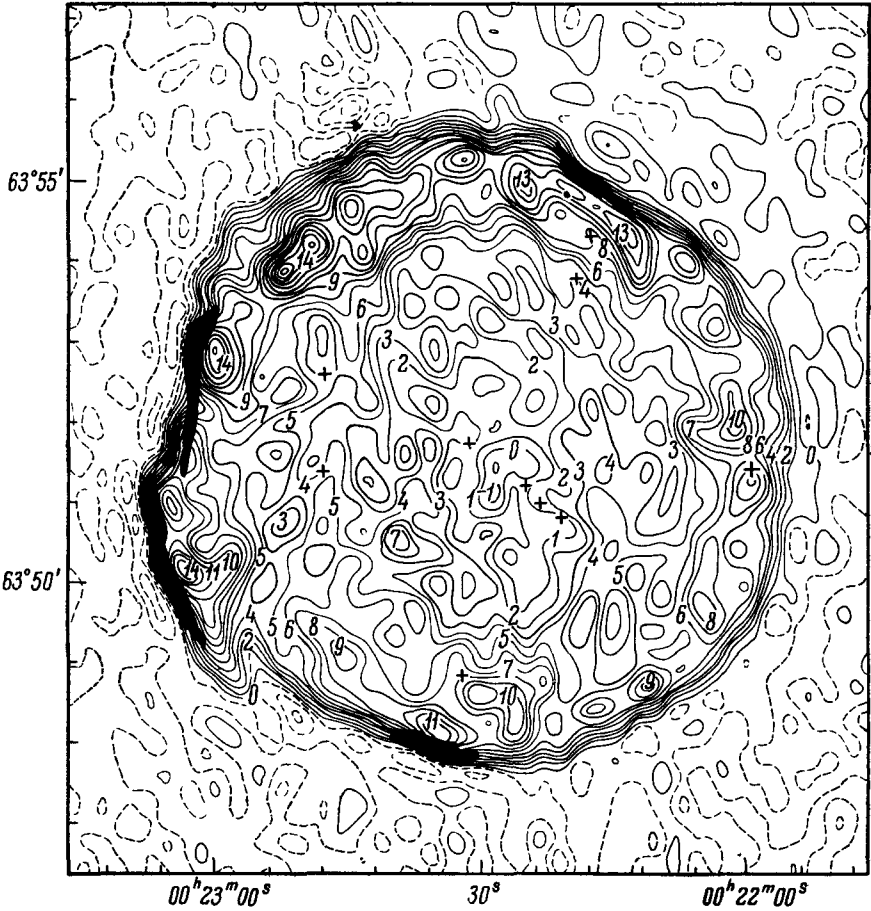


Рис. 3. Сверхновая Тихо Браге.

Остаток этой сверхновой наблюдался посредством апертурного синтеза на частоте 1407 Мгц при помощи одномильного интерферометра на Маллардской радиоастрономической обсерватории, Кембридж (по²)

на рис. 3; хорошо заметна расширяющаяся оболочка, в которой возникает радиоизлучение.

ДРУГИЕ ВОЗМОЖНЫЕ ПОДХОДЫ

Действие интерферометра обычно описывается как смена конструктивной и деструктивной интерференции двух волн, но имеются и другие пути работы системы. Например, мы можем логически совершенно эквивалентно описать возникновение интерференционной картины, опираясь только на представление, что два элемента интерферометра размещены в разных местах земной поверхности. Вращение Земли создает различные наблюдаемые доплеровские смещения на обеих антеннах, и интерференционная картина оказывается просто результатом биений между двумя принятыми сигналами.

Возможен и еще один подход. В самом деле, промежуток времени, нужный для прохождения света между двумя приемными станциями, создает

естественную систему единиц для описания работы радиоинтерферометра. Относительный сдвиг фаз ϕ может быть выражен через принятую частоту ω и геометрическую временную задержку τ_g , которая в свою очередь может быть выражена через угол θ (t) и время прохождения света между станциями τ_s :

$$\text{Принятая мощность} = 2P_0 e^{i\theta} = 2P_0 e^{i\omega\tau_g} = 2P_0 e^{i\omega\tau_s \sin \theta(t)}.$$

Однако приемник, как правило, осуществляет прием в полосе частот конечной ширины, так что сигнал на выходе приемника определится выражением

$$P(\tau_s \sin \theta) = 2P_0 \int_{-\infty}^{+\infty} G(\omega) e^{i\omega\tau_s \sin \theta} d\omega.$$

Таким образом, огибающая системы интерференционных полос представляет собой фурье-преобразование полосы пропускания приемника. Чем она шире, тем меньше пределы τ_g , в которых картина интерференции образует то, что известно в оптике под наименованием «белых интерференционных полос», показанных на рис. 1. Таким образом, интерферометр может быть использован для измерения относительного запаздывания по времени между двумя сигналами, и чем шире полоса пропускания приемника, тем более точным окажется измерение временной задержки.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С БОЛЬШИМИ БАЗАМИ

Действие радиоинтерферометра самым решающим образом зависит от стабильности фаз, которая для большинства целей должна поддерживаться с точностью в несколько градусов по круговой частоте. Это требование создает значительные трудности по мере роста расстояния между антеннами. Однако создание и усовершенствование исключительно стабильных атомных стандартов частоты привели к подлинной революции в интерферометрии; принципиально новая схема установки приведена на рис. 4.

После усиления сигнала каждой антенной напряжение (не интенсивность!) принятого сигнала записывается на каждой станции: контроль времени осуществляется по атомному стандарту частоты. Принятый сигнал посредством супергетеродинного приемника преобразуется в видео-частоту, с фазовой синхронизацией местного гетеродина по атомному стандарту частоты.

Связывающие антенны и приемник кабели теперь уже не нужны, ибо записанные сигналы могут быть перемножены позже, после их объединения. В результате отпадают все ограничения на величину разделения антенн, и продолжительность наблюдений отныне ограничивается только стабильностью атомного стандарта частоты.

Разработку принципиально новых способов записи начали две группы — одна из Национальной радиообсерватории США и Корнелльского университета и другая из Национального исследовательского совета Канады. Американская группа создала двоичную систему, в которой входящий сигнал ограничивается по максимуму и из него производятся выборки, которые записываются прямо на магнитную ленту для последующего ввода в цифровую машину. Канадская группа предпочла способ аналоговой записи сигнала непосредственно на магнитную ленту для видеозаписи, при помощи специально приспособленного видеоманитофона, причем скорость протяжки ленты контролируется атомным стандартом частоты. Записи затем перемножаются с помощью аналоговой схемы. Обе группы в основном заняты измерением радиоразмеров квазаров.

В то же время группа из Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института включилась в работу по изучению посредством обычной техники интерферометрии радиоисточников в линии 18 см, обязанной излучению молекул гидроксила^{3,4}. Эти эмиссионные источники имеют явно выраженную пекулярность: излучаемые

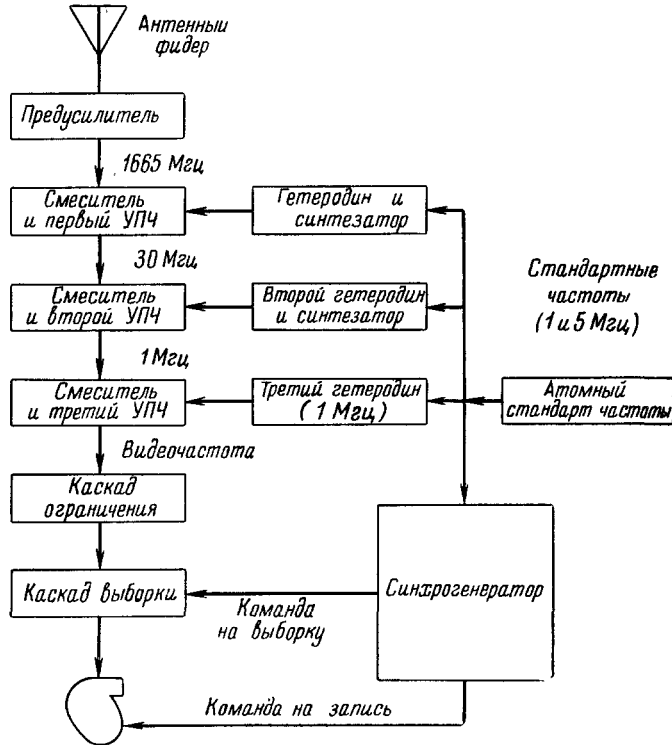


Рис. 4. Система с большой базой.

Эта блок-диаграмма показывает систему, используемую при наблюдениях линий гидроксила. Разработка стабильных атомных стандартов частоты сделала возможным создание широко разнесенных интерферометрических пар.

линии сильно поляризованы (обычно по кругу), линии исключительно узки (1—2 кГц), поразительно сильны и характеризуются необычными отношениями интенсивностей сверхтонких компонент.

Эта эмиссия, как правило, обнаруживается близ областей ионизованного водорода H II, где, как считалось, присутствует сильно разреженный ионизованный газ. Пример подобной области показан на рис. 5. Радиоастрономам эта область H II известна как W 3, а оптический астроном — как туманность IC 1795. Эмиссия OH исходит из малого района, отмеченного на рисунке. Тонкая структура одного сверхтонкого компонента, линии $F = 1 \rightarrow 1$ с частотой 1665 МГц, приведена на рис. 6. Картина заметно различается при правой и левой круговой поляризации. Очевидно, источник состоит из большого числа излучающих областей, имеющих слегка различные скорости, как показано на шкале частот, которая преобразована к эквивалентным доплеровским скоростям.

В начале 1967 г. наша группа из Линкольновской лаборатории увеличила базу используемого интерферометра до 10 км, или 74 400 длин волн⁵ (интерференционные полосы разделялись на 3"). Между 37-метровой

антенной Линкольновской лаборатории и 18,5-метровым радиотелескопом обсерватории Гарвардского колледжа осуществлялась связь по радио.

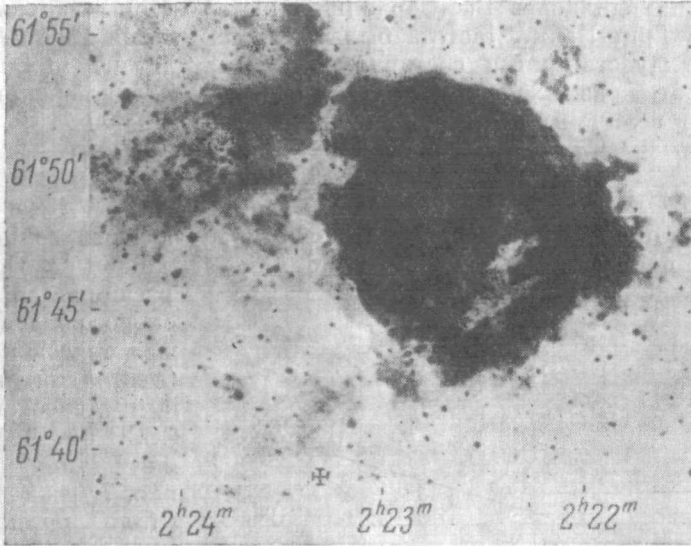


Рис. 5. Оптическая эмиссия от области H II, известной радиоастрономам как W3, а оптическим астрономам как IC 1795.

Эмиссия гидроксила, обнаруживаемая посредством радиоинтерферометров, приходит от района, отмеченного маленьким крестиком при $2^h23^m20^s$. (Фотография из Атласа неба обсерватории Маунт Вилсон-Паломар.)

В то время какие-либо положительные результаты от других начинаний совершенно отсутствовали, и нам казалось, что эксперимент с линиями ОН удастся осуществить без труда, так как ввиду ширины линии всего в 1 кГц требование к начальной ошибке во времени не превышало 1 мсек. Мы объединили свои усилия с группой из Национальной радиообсерватории и Корнелльского университета, и, как часто бывает в науке, все наши эксперименты за удивительно короткий срок дали положительные результаты.

В конце апреля 1967 г. канадская группа сообщила об успешном опыте работы на частоте 410 МГц, при расстоянии между станциями 183 км⁶. За ним быстро последовал эксперимент через всю Канаду: использовались 46-метровая параболическая антенна в Алгонвик-Парк и 26-метровая параболическая антенна в Пентикстоне, удаленные на 3074 км друг от друга, или на 4,6 миллиона длин волн ($0^{\circ}, 044$)⁷. В начале мая группа из Национальной радиообсерватории успешно испытала новую систему на короткой базе, между уже упоминавшимся телескопом в Грин-Бэнк и 25-метровым телескопом в шт. Мэриленд;

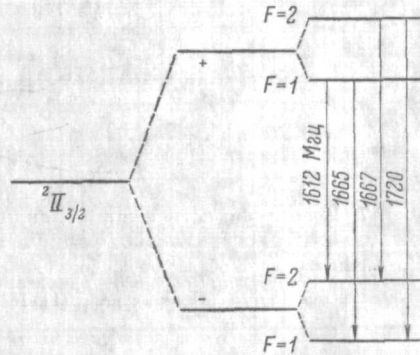


Рис. 6. Основное состояние сверхтонкой структуры молекулы ОН. Четыре перехода определяются тонкой структурой одиночного сверхтонкого компонента.

наблюдаемая частота составляла 610 Мгц , а разделение 226 км^8 . В конце мая 1967 г. Национальная радиообсерватория и Линкольновская лаборатория осуществили запись станций, одна из которых, с 37-метровой антенной, находилась в Вестфорде (шт. Массачусетс), а вторая, с 43-метровой, — в Грин-Бэнк. Частота была выбрана равной 1665 Мгц , а расстояние между станциями составляло 845 км , или $4,7$ миллиона длин волн⁹. На этот раз мы были вторыми в состязании, но перекрыли мировой рекорд величины базы (в длинах волн) на $100\,000 \lambda$.

ВСЕМИРНАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ

Сеть станций ныне охватывает значительную часть земного шара; на рис. 7 показано расположение станций-участников¹⁰. Система все

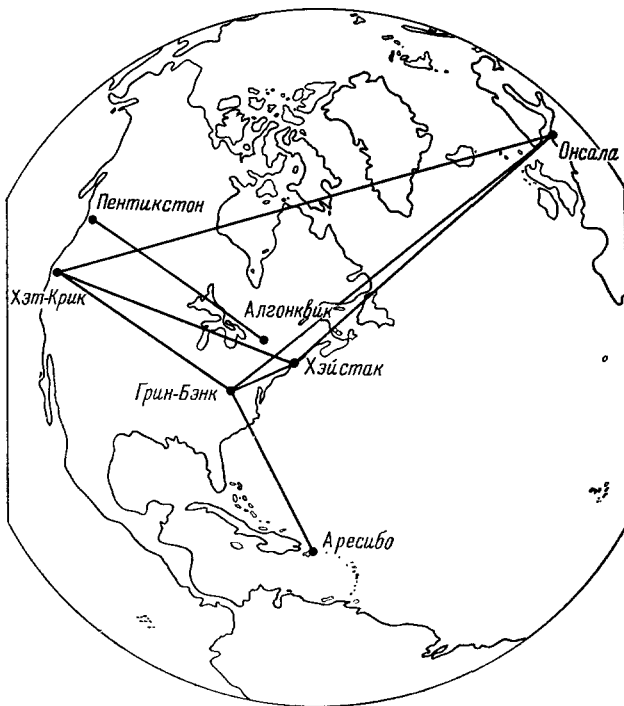


Рис. 7. Всемирная сеть станций, являющихся участниками экспериментов с длинными базами.

Хэт-Крик и Онсала образуют наиболее длинную базу (7719 км), Онсала и Грин Бэнк образуют наиболее протяженную базу, выраженную в длинах волн ($11 \cdot 10^7$ длин волн).

расширяется, и в нее скоро войдет 64-метровый телескоп в Парксе (Австралия) и 22-метровый телескоп ФИАН СССР им. Лебедева. Самая длинная база на рис. 7 между Хэт-Крик (Калифорния, США) и Онсала (Швеция) составляет в километрах 7719 км , а в длинах волн при наблюдении на волне 18 см — 43 миллиона, что дает угловое разрешение $0,0015$.

Самая большая база в длинах волн образована станциями в Онсале и Грин-Бэнке; они разделены на 110 миллионов длин волн, что соответствует угловому расстоянию между интерференционными максимумами в $0,0006$.

В настоящее время имеются три активно работающие группы: канадская группа и группа из Национальной радиообсерватории, которые занимаются источниками, дающими непрерывное излучение, и группа из Линкольновской лаборатории, которая сконцентрировала свои усилия на источниках линий ОН. Чалмерский университет, Калифорнийский университет и Калифорнийский технологический институт являются основными участниками многих экспериментов.

Существующая ныне сеть станций пока слишком фрагментарна для синтеза полной апертуры размером в целый земной шар, но и органические отрезки в плоскости фурье-преобразований, которыми мы располагаем, уже дают нам возможность проверять различные теоретические предположения о квазарах и межзвездных лазерах. Простейшим фурье-

преобразованием из всех, вероятно, является дельта-функция, фурье-образ которой — совершенно плоский спектр от нуля до бесконечности. Соответственно, если размеры источника очень малы по сравнению с разрешением системы, то амплитуды интерференционных полос окажутся одинаковыми для всех положений интерферометра.

С другой стороны, если источник — приблизительно однородный диск, то его фурье-образ убывает по амплитуде, когда расстояние между интерференционными полосами окажется того же порядка величины, что и угловые размеры диска.

Точная форма будет зависеть от истинного распределения яркости по диску, но, вообще говоря, все подходящие модели (равномерно яркий диск, гауссово распределение яркости, параболическое распределение яркости) дают похожие в основном фурье-образы, различающиеся лишь масштабным множителем, как правило, меньшим 1.

Самая ценная информация о точной форме заключена в осцилляциях на «хвосте» распределения, а они часто теряются в шумах; тем не менее оценка размера даже в пределах множителя 2 оказывается полезной. (Кое-что можно сделать путем подборки подходящей гауссовой модели, характерный размер которой — ширина по половине яркости — меньше, чем размер эквивалентного однородного диска.)

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗАРОВ

Данные для наиболее известного квазара, 3С 273, суммированы на рис. 8, включая основные результаты, полученные группой Национальной радиообсерватории и Корнелльского университета на волне $\lambda 18 \text{ см}^{10}$. Общая структура 3С 273, показанная на рис. 9, была впервые измерена путем использования Луны в качестве затмевающего экрана. Оптический

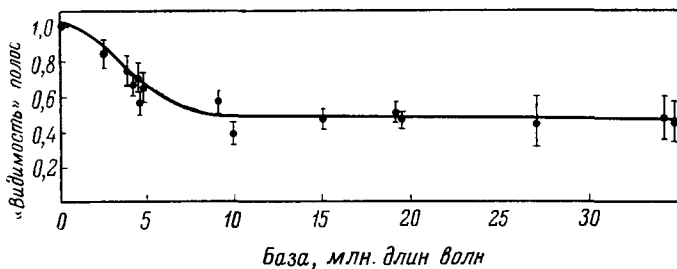


Рис. 8. Относительная амплитуда интерференционных полос, выраженная в виде «видимости» полос, от квазара 3С 273 для различных величин базы.

Изменения разрешения с длиной базы показывают сигнал от 0", 02 гало и неразрешенного ядра.

объект состоит из собственно квазара и тонкого выброса, протянувшегося на $20''$ от квазара. Каждой части объекта соответствует своя радиосоставляющая: вытянутая тонкая радиоболочка вокруг выброса (она обозначается 3С 273 А) и компактный радиоисточник, совпадающий с квазаром (3С 273 В). Источник В не был разрешен при наблюдениях покрытий Луной, но его общую структуру можно легко усмотреть из рис. 8 при мысленном фурье-преобразовании амплитуды интерференционных полос. Амплитуда полос уменьшается наполовину по квазигауссову закону на протяжении первых пяти миллионов длин волн и затем остается постоянной по меньшей мере до 35 миллионов длин волн. Поэтому источник, связанный с собственно квазаром, должен состоять по меньшей мере

из двух компонентов, показанных на врезке на рис. 9. Имеется компактное ядро с угловыми размерами много меньше $(3,5 \cdot 10^7)^{-1}$ рад, или $0'',005$, окруженное гало протяженностью около $0'',04$. Последние наблюдения на волне 6 см показывают тонкую субструктуру размерами порядка $0'',001$ или меньше.

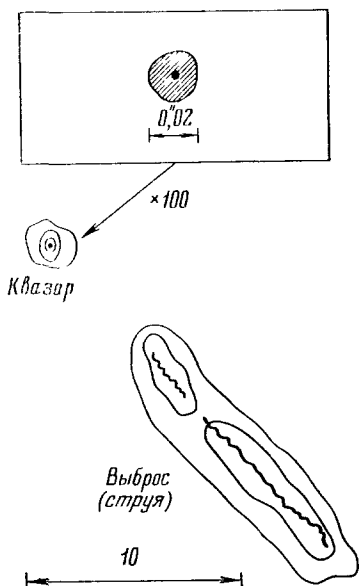


Рис. 9. Общая структура квазара 3С 273 впервые определена путем использования Луны в качестве затмевающего экрана.

Как радио-, так и оптические наблюдения показывают, что длинный тонкий выброс тянется из собственно квазара.

ных оболочек и компактных областей, а это в свою очередь позволяет выдвинуть предположение о каких-то постоянно происходящих взрывах в каждом из этих объектов.

ИСТОЧНИКИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГИДРОКСИЛА

В противоположность испускаемой чудовищной энергии и бурной природе квазаров, которые увлекают нас гигантскими масштабами явлений, источники излучения радиолиний молекул гидроксила λ 18 см дают нам пример неожиданного порядка, по-видимому, существующего в разных областях Вселенной. Обычно считают, что источником излучения разреженных облаков газа между звездами являются чисто тепловые квазиравновесные процессы, но беглый обзор свойств эмиссии молекул гидроксила показывает, что дело обстоит не обязательно так.

Структура основного состояния ОН показана на рис. 6. Основное расщепление уровней, Λ -удвоение, появляется ввиду того, что в основном состоянии $^2\Pi_{3/2}$ полный электронный угловой момент вдоль оси молекулы ($3/2$) на самом деле соответствует двум вырожденным состояниям—симметричной и антисимметричной комбинациям двух возможных ориентаций (+ и -) электронного углового момента. Вырождение снимается из-за взаимодействия с соседними электронными состояниями, и, кроме того, имеется дополнительное взаимодействие между протоном и электронными магнитными моментами, что в итоге дает четыре состояния. Четыре разре-

Что же можно сказать о размерах радиосоставляющих квазара? Здесь следует упомянуть об одном, хотя и небольшом, затруднении. Дело в том, что почти все (за исключением Ф. Хойла и Д. Бербриджа) согласны с тем, что в силу больших красных смещений большинства квазаров они должны иметь космологические расстояния. Если это действительно так (а «адвокаты дьявола» из Кембриджа и Калифорнии будут посрамлены), тогда 3С 273 находится на расстоянии около $1,5 \cdot 10^8$ световых лет. Компактная часть радиоизлучения приходит от области меньше 10 световых лет в поперечнике, а радиогало имеет протяженность до 300 световых лет. Но все же пока недостаточно данных ни для разрешения узловой проблемы — что же представляет собой квазар, ни для того, чтобы найти источник энергии, необходимый для обеспечения колоссального выхода энергии. Однако уже первые детальные сведения о 3С 273 и других квазарах свидетельствуют, что непрерывное радиоизлучение часто приходит к нам от комбинации протяжен-

и переходы показаны на рис. 6; сильнейшие переходы соответствуют частотам 1665 и 1667 $M\mu$.

Ожидаемое излучение межзвездной среды обнаружено не было, однако в Гарварде и Беркли открыли, что эти линии появляются близ ассоциаций очень молодых звезд, по-видимому, связанных с ионизованным газом — областями H II, окружающими самые молодые и самые горячие звезды.

Излучение было на несколько порядков сильнее, чем предсказывалось, и относительная сила линий сверхтонких компонент иногда отличалась раз в сто от предвычисленных величин, которые благодушно выводились

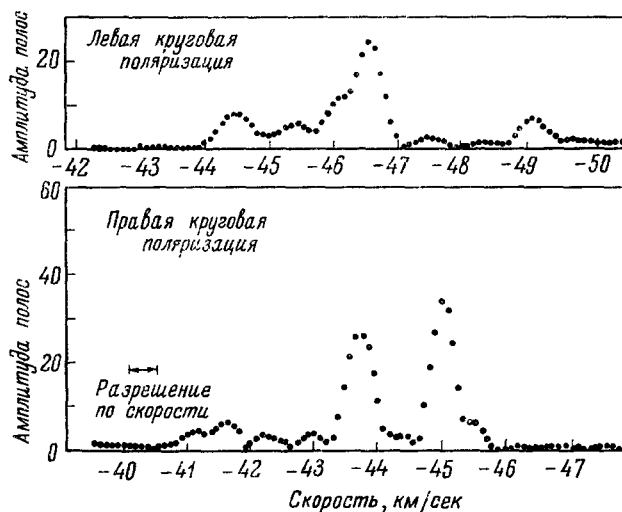


Рис. 10. Субструктура по скорости на частоте 1665 $M\mu$ линии гидроксила, излучаемой источником, показанным на рис. 5 и связанным с областью H II, обозначаемой W3.

из обычных матричных элементов углового момента. Одновременно выявились и другие аномалии. Линии имели сильную поляризацию, обычно круговую; они были необычно узки, что давало тепловое уширение, характерное для очень холодного газа ($10\text{--}20^\circ\text{K}$); с другой стороны, они давали такую большую поверхностную яркость, что газ должен был бы иметь температуру в $10^{12}\text{--}10^{13}\text{ }^\circ\text{K}$, если механизм эмиссии был тепловым.

Наблюдения в основном были выполнены объединенными усилиями Линкольновской лаборатории МТИ, Чалмерского университета и Беркли. Для построения моделей из ограниченной информации от фурье-преобразований использовались приемы, сходные с описанными выше выводами из наблюдений квазаров. Обработка наблюдений дополнительно усложнялась тем, что амплитуды полос интерференции и их фазы теперь должны были описываться также и в функции частоты. Обычно каждая сверхтонкая компонента расщепляется на много отдельных линий; типичный пример показан на рис. 10 для обоих направлений поляризации.

Частота как координата была заменена для этих линий эквивалентным доплеровским смещением в км/сек ; эти линии несомненно возникают от различных газовых агрегатов, движущихся со своими собственными пекулярными скоростями. (Можно было бы предположить, что эта структура объясняется зееман-эффектом, однако все такие попытки не удалась.)

Область Н II, обозначаемая W3 и известная астрономам как IC 1795, показана на рис. 5. Излучение в линиях, показанных на рис. 10, приходит из очень малого района, отмеченного крестиком ⁴. Путем наблюдений вариаций интерференционных полос при разных базах, а также использования дополнительной информации о частотах оказалось возможным построить карту объекта (рис. 11), из которой можно увидеть, что каждая

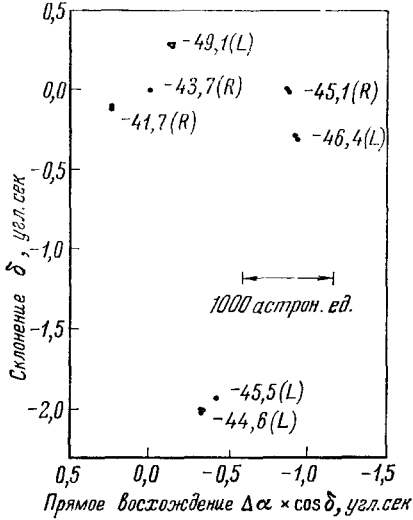


Рис. 11. Индивидуальные источники гидроксильной эмиссии в WD.

Каждая линия на рис. 10 приходит от отдельного пятна (часто состоящего из кратных компонент) отмечена значением скорости (км/сек) и обозначениями L и R для левой и правой круговой поляризации ¹².

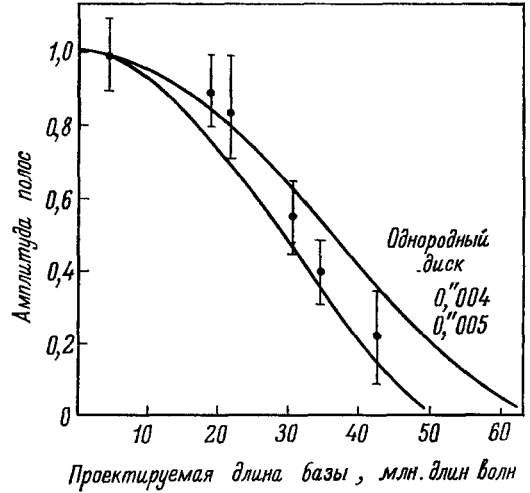


Рис. 12. Наименьшая деталь на рис. 11.

Для сравнения показана модель однородного диска. Угловой размер этой детали лежит между $0'',004$ (верхняя кривая) и $0'',005$ (нижняя кривая), что соответствует линейному размеру в 6 астрономических единиц ¹¹.

Все источники эмиссии локализованы в пределах окружности в $2''$ — области, не намного большей, чем предел разрешения крупнейших оптических телескопов.

НЕБЕСНЫЙ МАЗЕР?

Описанное явление, без сомнения, должно быть связано с какой-то формой мазерного эффекта, однако детальная разработка механизма действия космического мазера пока еще не выполнена.

Если удастся найти подходящий механизм накачки для обращения заселенностей уровней, то высокая удельная интенсивность, малая ширина линий и поляризация вполне соответствовали бы хорошо известным явлениям в мазере, созданном руками человека. В принципе вполне возможна ультрафиолетовая накачка от соседних ярких звезд, но здесь имеются трудности с энергией. Поскольку для каждого радиофотона нужен один ультрафиолетовый фотон, накачка ультрафиолетом относительно неэффективна. Были высказаны предположения о возможности инфракрасной

накачки¹², но подробное исследование этой идеи не привело к желаемым результатам.

Но даже если принять принцип мазера в качестве объяснения физического механизма излучения, остается неизвестной геометрия мазера. При этом, хотя видимые размеры радиоисточника малы, истинная протяженность космического мазера может быть велика. Если очень далекие источники с малыми угловыми размерами из непрерывно распределенного «фона» усиливаются посредством мазерного механизма, то падающая на район мазера плоская волна будет переизлучаться также в виде плоской волны, и «изображение» может не содержать никакой информации о действительном размере мазера. С другой стороны, если мазер имеет малые угловые размеры и служит для усиления космического фонового радиоизлучения, то видимые размеры объекта являются истинными размерами мазера.

Видимые размеры этих источников вполне сравнимы с размерами солнечной системы, и очень велик соблазн отождествить эти мазеры со звездами на первой стадии их формирования. Можно думать, что такие звезды должны сильно излучать в инфракрасных лучах, поскольку они были бы «закутаны» в межзвездную пыль, находимую в местах формирования звезд, а эти условия как раз благоприятны для образования больших количеств пыли.

Так как наблюдаемые компоненты радиоисточника (рис. 11) имеют свою субструктуру, по размерам сравнимую с орбитой Юпитера или Сатурна, заметные изменения этих объектов должны были бы происходить за время порядка года. Наблюдение этих изменений уже планируется.

ИНТЕРФЕРОМЕТР КАК ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ

Интерферометры используются для многих целей, помимо обеспечения высокого углового разрешения, и неудивительно, что радиоинтерферометры тоже имеют не менее широкую область применения.

Если положение радиоисточников известно, то интерференционная картина может быть полезна для нахождения расстояния между антеннами. Для этого необходимо лишь сосчитать число интерференционных полос.

Предельная точность, которая может быть достигнута таким способом, оказывается порядка длины волны, и наблюдения на волне 18 см в принципе дают возможность определять расстояния на поверхности Земли с точностью в несколько сантиметров.

Подобные возможности измерений могут иметь самые широкие приложения в геодезии, и И. Шапиро¹³, а также Т. Голд и Г. Макдональд¹⁴ предложили использовать новый измерительный инструмент для прямых поисков дрейфа континентов, для изучения перемещения оси вращения Земли и наблюдения флуктуаций скорости вращения Земли (оба связаны с движениями в земной мантии и земном ядре) и для изучения сезонных изменений океанских течений и циркуляции земной атмосферы.

Однако приложения для геодезических целей требуют для своей реализации решения ряда практических проблем. Положения квазаров с нужной точностью нам заранее не известны; каждая антенна поднимается и опускается на много сантиметров дважды в сутки вследствие «твердых» приливов в теле Земли; земная атмосфера и ионосфера добавляют в систему дополнительные, и притом не известные заранее, временные задержки. Прямой подсчет интерференционных полос, хотя и возможный в принципе, вряд ли приемлем на практике, так как даже высокая стабильность водородного мазера в качестве стандарта частоты оказывается не вполне

достаточной. (На волне λ 18 см стандарт частоты с гарантированной стабильностью $2 : 10^{14}$ дает уход фазы на 2π за 12 часов.)

В настоящее время Массачусетский институт и Линкольновская лаборатория работают над объединенной программой с целью уменьшить жесткие требования к стабильности стандартов частоты. Группа объединяет Шапиро, Хинтеррегера, Найта, Уитни и автора (Массачусетский институт) и Картера, Роджерса и Морана (Линкольновская лаборатория).

В принципе разрабатываемый метод использует подход к сравнению времен посредством интерферометра, который описан на стр. 540. Чем шире принимаемая полоса частот, тем короче время корреляции двух сигналов, принятых на две антенны, и в предельном случае бесконечно широкой полосы временной задержки τ_g может быть определен точно. Регистрируемая полоса частот двоичной (цифровой) системы, используемая сотрудничающими группами исследователей, составляет, однако, всего 360 кГц, и даже аналоговая система канадской группы имеет ширину полосы лишь 4 МГц.

Возможность непосредственного сравнения временных задержек при приемлемом отношении сигнала к шуму с точностью порядка микросекунды соответствовала бы определению расстояний с точностью в несколько десятков метров. Эта точность сравнима с лучшими геодезическими измерениями, и она может быть достигнута посредством лишь небольшой модификации приемной системы.

Вместо наблюдений на постоянной частоте гетеродин переключается на серию отделенных друг от друга частот, которая охватывает гораздо более широкую полосу частот. Первый каскад усилителя автоматически перестраивается на соответствующую частоту. Таким путем электронно синтезируется гораздо более широкая полоса частот. Недавний эксперимент на волне 3 см между 37-метровой антенной Национальной радиообсерватории и 43-метровым инструментом Линкольновской лаборатории показал полную пригодность этого метода.

Первоначальный эксперимент охватил полосу частот шириной приблизительно 120 МГц; при этом возможно сравнение времени с точностью лучше 1 нсек, что соответствует точности измерения расстояний в 30 см и менее.

НОВАЯ АСТРОМЕТРИЯ

Использование этого нового физического инструмента будет невозможным до тех пор, пока не будет разрешен весь комплекс проблем: положения радиоисточников, геодезическое местоположение и атмосферный фазовый сдвиг. Измеренная временная задержка для данного источника в течение суток меняется по закону

$$\tau_g = A + B \cos(\omega t + \varphi).$$

Таким образом, из наблюдений могут быть определены лишь три параметра A , B и φ . В свою очередь они являются функциями ориентации базы интерферометра (два неизвестных угла), неизвестной длины базы и неизвестной разницы в показаниях атомных часов на каждой станции. Поскольку имеется шесть неизвестных и только три наблюдаемых величины, наблюдений одного источника, очевидно, недостаточно. При наблюдении трех источников мы имеем девять наблюдаемых величин и десять неизвестных; поскольку мы свободны в выборе начала координат, можно задать прямое восхождение одного источника. Это уменьшит число неизвестных до девяти, и система может быть разрешена. Конечно, следует выбрать большее число источников, чтобы система была переопределенной,

и сейчас предпринимаются усилия в этом направлении, что занимает значительную долю рабочего времени машин.

В итоге реконструируется вся классическая меридианная астрометрия, и мы ожидаем увеличения точности на порядки величины по сравнению с результатами, получаемыми традиционными оптическими методами.

Одна проблема, которая заслуживает специального упоминания, — это классическая проверка общей теории относительности путем наблюдения отклонения лучей света в гравитационном поле Солнца. Солнце проходит близко к двум наиболее интенсивным квазарам, ЗС 273 и ЗС 279. Эти два источника разделяет угловое расстояние всего в $4^{\circ},5$, так что измерения отклонения могут быть выполнены дифференциальным методом. Точность интерференционных методов с большими базами делает возможным надежно проверить общую теорию относительности, поскольку отклонение на лимбе составляет $1'',79$. В прошлую осень первые наблюдения были выполнены группой МТИ — Линкольновская лаборатория; результаты пока еще полностью не проанализированы, и эксперимент предполагается повторить в этом году.

ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Можно сделать еще одно замечание об использовании интерференционных методов с большими базами.

Так как на каждой станции записывается амплитуда падающей волны, а не ее интенсивность, то на первый взгляд представляется, что наблюдатель мог бы наблюдать приходящие фотоны на каждой антенне по отдельности, без разрушения интерференционной картины (которая в данном случае обнаруживается в вычислительной машине, а не на экране). Это далекое эхо дискуссии между Бором и Эйнштейном можно оставить в покое, хотя и по совершенно новым причинам¹⁵. Дело в том, что, прежде чем выполнить запись амплитуд, нужно между антенной и регистрирующим устройством поместить усилитель.

Простейшим в принципе из существующих усилителей является мазер, и хорошо известно, что мазер не может быть свободен от шумов, поскольку его действие основано на коэффициенте индуцированного излучения — эйнштейновском коэффициенте B . Для каждого значения эйнштейновского коэффициента B имеется значение эйнштейновского коэффициента A , ввиду чего система должна генерировать собственные шумы. Можно показать, что это имеет место как раз для предельного случая единственного фотона, и это ведет к выражению для соотношения неопределенностей

$$\Delta\varphi \approx \Delta\eta \cdot \Delta t.$$

Таким образом, интерференционная картина не разрушается, но сохраняется; природа предпочитает маскировать приход индивидуальных фотонов путем добавления шумов к системе.

БУДУЩЕЕ

Эксперименты, которые были выполнены до сих пор, убедительно продемонстрировали, что интерферометрия с большими базами может улучшить разрешение и возможность определения угловых размеров небесных объектов на порядки величины. Но независимо от того, будут ли будущие инструменты аналоговыми или цифровыми, совершенно ясно, что существующая техника записи довольно обременительна. Аналоговые системы, использующие магнитные ленты для видеозаписи, заполняют большую катушку магнитной ленты за полчаса, в то время как цифровые

системы используют пару 2400-футовых катушек машины за 3 минуты. Подходящая система накопления данных с высокой удельной плотностью окажет большую помощь будущим системам. Еще более необходима широкополосность системы записи. Возможно, уже существующие ширины полос, применяемые для видеозаписи, обеспечат потребность исследований в течение некоторого времени, но система с шириной полосы 100 *Мгц* дает возможность изучить гораздо более слабые объекты. Однако использование подобной широкополосной системы будет в сильнейшей степени зависеть от более эффективных систем накопления данных.

Водородные мазеры достаточно стабильны для большинства экспериментов, которые обсуждаются в настоящее время. Имеется возможность, так сказать, «обернуть» систему и использовать наблюдения сильных радиосточников для синхронизации часов в различных местах с очень высокой точностью. Роль атомного стандарта частоты сведется тогда к своего рода маховику, причем требования постоянной скорости колебаний окажутся гораздо существеннее, чем абсолютная точность поддержания частоты постоянной.

Принципиальный недостаток с точки зрения астронома или геофизика состоит в малом числе больших параболических антенн, пригодных для перспективных программ. Выполненные до сих пор исследования на существующих крупнейших радиотелескопах мира продолжались всего несколько часов наблюдательного времени. Но полное использование всех возможностей потребует значительно большего числа станций с радиотелескопами по крайней мере 25-метрового диаметра, разбросанных по наиболее важным местам. Подобная сеть, охватывающая весь мир, является пока лишь мечтой, но ее создание должно стоять на одном из первых мест среди самых актуальных научных проблем.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Ryle, *Nature* 194, 517 (1962).
2. J. E. Baldwin, *Radio Astronomy and the Galactic System*. IAU Symposium 313 (H. Van Weerden, Ed.), London, 1967.
3. A. H. Barrett, *Scientific American* 219 (6), 36 (1968).
4. A. E. E. Rodgers, J. M. Moran, P. C. Crowther, B. F. Burke, M. L. Meeks, J. A. Ball, G. M. Hyde, *Astrophys. J.* 148, 369L (1967).
5. J. M. Moran, A. H. Barrett, A. E. E. Rodgers, B. F. Burke, B. Zuckerman, H. Penfield, M. L. Meeks, *Astrophys. J.* 148, 69L (1967).
6. N. W. Broten, T. H. Legg, J. L. Locke, C. W. McLeish, R. S. Richards, R. M. Chisholm, H. P. Gush, J. L. Yen, J. A. Galt, *Science* 156, 1592 (1967).
7. N. W. Broten, R. W. Clarke, T. H. Legg, J. L. Locke, C. W. McLeish, R. S. Richards, J. L. Yen, R. M. Chisholm, J. A. Galt, *Nature* 216, 44 (1967).
8. C. Bare, B. G. Clark, K. I. Kellermann, M. H. Cohen, D. L. Jauncey, *Science* 157, 189 (1967).
9. J. M. Moran, P. P. Crowther, B. F. Burke, A. H. Barrett, A. E. E. Rodgers, J. A. Ball, J. C. Carter, C. C. Bare, *Science* 157, 676 (1967).
10. M. H. Cohen, D. L. Jauncey, K. I. Kellermann, B. G. Clark, *Science* 162, 88 (1968).
11. J. M. Moran, B. F. Burke, A. H. Barrett, A. E. E. Rodgers, J. A. Ball, J. C. Carter, D. D. Cudaback, *Astrophys. J.* 152, 97L (1968).
12. И. С. Шкловский, *Астрон. циркуляр АН СССР*, № 424 (1967); M. Litvak, в сб. *Interstellar Ionized Hydrogen* (Y. Terszian, Ed.), New York, 1968, стр. 713.
13. I. I. Shapiro, *Science* 157, 806 (1967).
14. T. Gold, *Science* 157, 302 (1967); G. F. K. MacDonald, там же, стр. 304.
15. B. F. Burke, *Nature* (в печати).