1969 г. Июнь *Том 98, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.035

ИНФРАКРАСНОЕ НЕБО *)

Дж. Нейгебауэр, Р. Лейтон

Телескоп с 62-дюймовым зеркалом из пластмассы дал возможность получить первый подробный обзор ночного неба в инфракрасных лучах. Обзор позволил обнаружить самые холодные из известных небесных тел.

Астрономы уже давно отдавали себе отчет в том, что для гипотетических глаз, чувствительных к инфракрасному излучению, картина небосвода заведомо отличалась бы от картины, в которой доминируют Большая Медведица, Орион, Пегас, Лебедь и другие знакомые созвездия. Однако еще два года назад никто по-настоящему не знал, каким выглядело бы небо для «инфракрасных глаз» и какого рода объекты, кроме звезд, были бы на нем видны. И хотя было мало сомнений в том, что на инфракрасном небе преобладали бы не те несколько тысяч звезд, которые видны невооруженным глазом, все же никто не мог сказать, насколько резко отличалось бы инфракрасное небо от привычного.

Чтобы выяснить это, мы и наши сотрудники из Калифорнийского технологического института использовали построенный специально для проведения детального наблюдения инфракрасных источников 62-дюймовый отражательный телескоп на Маунт Вилсон. Наблюдения охватили приблизительно 75% всего неба. Основная использованная нами длина волны приходилась на 2,2 *мкм*, что в четыре раза больше длины волны желтых лучей. Всего обзор выявил около 20 000 инфракрасных источников. Как мы и предполагали, в основном это оказались звезды. Если для обеспечения максимальной надежности учесть только источники, яркость которых не менее чем в 2,5 раза превышает минимально обнаружимую, то у нас еще останется 5500 источников инфракрасного излучения. Для сравнения заметим, что невооруженным глазом на той же широте можно насчитать 6000 звезд. Короче говоря, наши наблюдения выполняют роль инфракрасного глаза, который обнаруживает примерно столько же звезд, сколько можно видеть на ночном небе невооруженным глазом.

Является ли основная часть этих источников теми же самыми звездами, или это, как правило, другие объекты? Ответ: большинство инфракрасных источников — это незнакомые нам звезды. Общее число звезд, наблюдаемых обоими детекторами, визуальным и инфракрасным, меньше 2000. Таким образом, почти 70% из 6000 звезд, видимых невооруженным глазом, не может быть обнаружено нашим 62-дюймовым инфракрасным инструментом; одновременно 70% из 5500 наиболее ярких инфракрасных источников невидимы для невооруженного глаза. И если бы человек наблюдал ночное небо глазами, чувствительными к инфракрасным лучам, он составил бы совершенно иную картину созвездий.

*) G. Neugebauer, Robert B. Leighton, The Infrared Sky, Sci. American 219 (2), 50 (1968). Перевод Л. В. Самсоненко.

РАННИЕ ИНФРАКРАСНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Тот факт, что небо в широких масштабах изучалось в радиодиапазоне более чем за 20 лет до того, как это стало возможным в области длин волн порядка 2 *мкм*, объясняется главным образом неравномерным развитием техники. До наших работ инфракрасные исследования в основном выполнялись для отдельных объектов, например Солнца, планет и некоторых ярких звезд (см. статью Брюса Мюррея и Джеймса Вестфола «Инфракрасная астрономия», опубликованную в «Scientific American» за август 1965 г.).

Еще в 1840 г. сэр Уильям Гершель продемонстрировал, что Солнце испускает невидимое излучение за красным концом видимого спектра. Конечно, видимый спектр покрывает только незначительную часть всей области возможных длин волн, которая с теоретической точки зрения бесконечна. Длины волн видимого света лежат между 0,4 *мкм* (фиолетовый) и 0,7 *мкм* (красный). Максимум солнечной энергии приходится примерно на середину этого интервала — приблизительно на 0,5 *мкм*. Звезды, более холодные, чем Солнце, которое имеет температуру поверхности 5700° К, будут излучать бóльшую часть своей энергии в инфракрасной области, за пределами 0,7 *мкм*. Хорошо известны холодные звезды с температурой 3000° К, а незадолго до наших наблюдений было обнаружено несколько звезд с температурами ниже 2000° К.

Оценки числа звезд различных типов, приходящихся на единицу объема, без расхождений показывали, что наиболее холодные звезды — красные карлики и невидимые темные спутники более горячих звезд — составляют основную часть «звездного» вещества. Это дает основание предположить, что еще больше «звездного» вещества могло бы быть в форме «несветящих звезд», т. е. звезд, слишком холодных, чтобы излучать видимый свет. Астрономы также были уверены в том, что могут существовать и быть обнаруженными при помощи подходящих инструментов «протозвезды»—звезды в процессе формирования. Температура протозвезд могла бы составлять всего несколько сот градусов по шкале Кельвина.

Необходимость поисков таких объектов и расширения наших знаний об источниках космического инфракрасного излучения постоянно вынуждала астрономов по возможности дальше продвигать свои наблюдения в инфракрасную область спектра.

В конце 30-х годов Чарльз Хетцлер из Йеркской обсерватории искал холодные звезды, используя фотопластинки, чувствительные в ближней инфракрасной области, и 40-дюймовый рефрактор Йеркской обсерватории. Его работа не вызвала сколько-нибудь значительного интереса, возможно, потому, что он так и не закончил своего исследования. Однако он нашел некоторое число звезд с температурами в пределах от 1000 до 2000° К.

Наш интерес к проведению инфракрасного обзора неба был непосредственно вызван работой Фримена Холла из «Интернейшнл Телефон энд Телеграф Корпорейшн», который установил на 24-дюймовый рефлектор комплект инфракрасных детекторов, охлаждаемых сухим льдом. Используя этот инструмент в Сан-Фернандо Валлей, Холл в поисках холодных объектов просканировал примерно 20% северного полушария неба. По-видимому, он нашел некоторое число источников, не показанных на звездных картах, но в то же время не обнаружил тех звезд, которые, как предполагалось, должны быть очень яркими в инфракрасных лучах.

СОЗДАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ТЕЛЕСКОПА

Около пяти лет назад мы решили, что имело бы смысл провести достаточно широкий (а потому не зависимый от предыдущих) обзор неба для поиска космического инфракрасного излучения с использованием чувствительных детекторов в сочетании с наибольшим из возможных телескопов. Было очевидно, что существующие крупные астрономические телескопы непригодны для такой работы как вследствие большого количества времени, которое потребовалось бы для ее выполнения, так и из-за относительно малого поля зрения этих телескопов. Поэтому мы решили построить телескоп, специально приспособленный для решения нашей задачи.

Хорошо известно, что свободная поверхность жидкости, равномерно вращающейся вокруг вертикальной оси, приобретает форму параболоида, т. е. как раз той поверхности, которая необходима для того, чтобы после отражения параллельные лучи собрались в фокусе. Используя этот факт, мы налили медленно затвердевающую эпоксидную смолу на вращающийся алюминиевый диск, которому на токарном станке была предварительно придана приблизительно нужная нам форма. В течение трех дней, за которые затвердевала смола, скорость вращения поддерживалась постоянной. Ценой значительных усилий и нескольких попыток этот метод обеспечил нам получение вполне пригодного для работы зеркала диаметром 62 дюйма с фокусным расстоянием 64 дюйма. Хотя зеркало немного отступает от идеальной формы, его алюминированная поверхность оказалась вполне удовлетворительной для тех больших длин волн и малочувствительных детекторов, которые используются в инфракрасной астрономии. С помощью студентов был смонтирован телескоп и построено небольшое помещение для него на Маунт Вилсон (рис. 1).

Не менее важной задачей, чем создание достаточно эффективного телескопа, был выбор спектральной области для исследования и подходящего детектора. Астрономы, которые собираются наблюдать инфракрасное излучение небесных тел, сталкиваются с несколькими трудностями. Первая — это отсутствие чувствительных детекторов в инфракрасной области. Это ограничение ослабло за последние годы; но инфракрасные детекторы все еще по крайней мере в 1000 раз менее чувствительны, чем хорошие детекторы для видимой области спектра. Если бы инфракрасные приемники были столь же чувствительны, как и приемники для видимой области спектра, мы могли бы выполнить наш обзор с двухдюймовым зеркалом.

Более фундаментальным ограничением является атмосфера Земли, прежде всего водяной пар в ней, поглощающий бо́льшую часть падающего инфракрасного излучения. За пределами порога видимого спектра 0,7 *мкм* атмосфера остается довольно прозрачной вплоть до 1,3 *мкм*, а дальше она полностью непрозрачна, за исключением немногих «окон прозрачности». Несколько первых «окон» приходится на следующие длины волн: 1,65; 2,2; 3,6 и 4,8 *мкм*. Затем имеется относительно широкое окно между 8 и 14 *мкм* и еще одно между 17 и 22 *мкм*. От 22 до 1000 *мкм* (т. е. 1 *мм*) атмосфера в высокой степени непрозрачна. Последнее подходящее окно для «инфраастронома» — интервал между 1 и 3 *мм* — приводит его во владения радиоастронома, с его антеннами и радиоприемниками вместо фотодетекторов, которые обычно используются в комбинации с оптическими отражательными телескопами.

Последняя проблема, стоящая перед астрономом, занимающимся инфракрасными исследованиями, состоит в том, что инфракрасное излучение испускает буквально весь мир. Непрозрачные неметаллические тела

излучают энергию, и длины волн этого излучения распределены в соответствии с законом Планка для излучения абсолютно черного тела. Спектральное распределение излучения черного тела определяется его абсолютной температурой T, причем максимум энергии (на единичный интервал длин волн) испускается на длине волны λ_{max}, определяемой законом

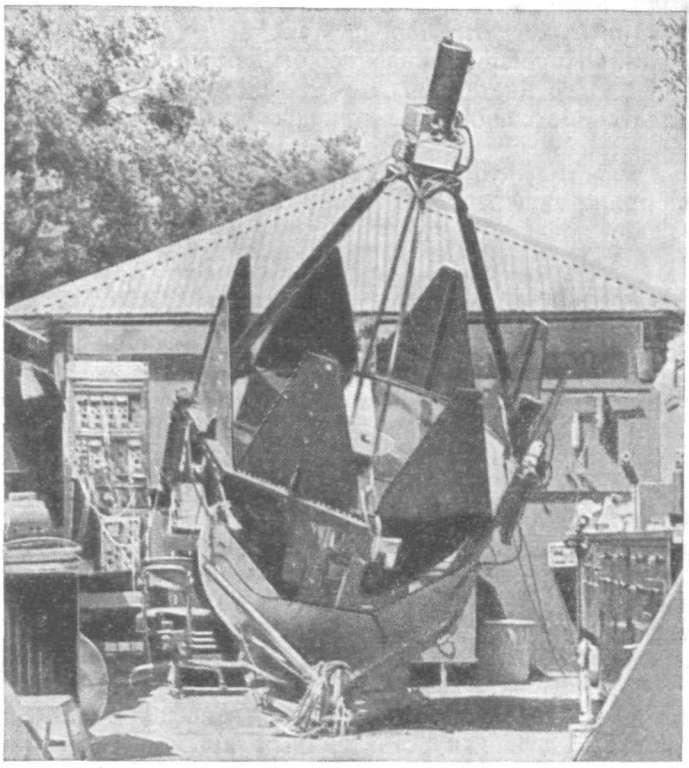

Рис. 1. Телескоп для инфракрасного обзора неба на Маунт Вилсон имеет 62-дюймовое алюминированное пластмассовое зеркало с фокусным расстоянием 64 дюйма. Параболическая форма поверхности была получена путем выливания жидкой эпоксидной смолы на алюминиевый диск, которому была приблизительно придана форма параболоида. После наливания смолы диск вращался с постоянной скоростью в течение трех дней, пока затвердевала смола. Затем поверхность отливки была алюминирована. Инфракрасные фотоприемники, охлаждаемые жидким азотом, закреплены в фокусе зеркала посредством четырех стоек. Когда телескоп не используется, зеркало защищается восемью опускающимися пластинами лепесткообразной формы. Гофрированную крышу можно продвинуть вперед, предохранив тем самым инструмент от непогоды. Телескоп и помещение для него были спроектированы и построены авторами с помощью студентов Калифорнийского технологического института.

смещения Вина ($\lambda_{max}\ T \approx 3000$, где λ_{max} выражено в *мкм*, а T — в ° К). Таким образом, максимум солнечной энергии (соответствующий его температуре 5700° К) приходится на длину волны примерно 0,5 *мкм*. В то же время объекты комнатной температуры (300° К) излучают с максимальной интенсивностью вблизи 10 *мкм*, тогда как количество испускаемой ими энергии в видимых длинах волн пренебрежимо мало. Ввиду

этого при исследовании инфракрасного неба астроном сталкивается с проблемой, аналогичной той, с какой встретился бы астроном-оптик, проводящий наблюдения в ярко освещенной башне с телескопом, выкрашенным светящейся краской.

Для наших наблюдений неба мы выбрали окно между 2 и 2,4 *мкм* (рис. 2). Причины, определившие этот выбор, были следующие: благоприятные характеристики чувствительности фотоприемника из сернистого свинца, хорошая прозрачность атмосферы в этом окне, а также тот факт, что интервал близ 2,2 *мкм* обеспечивал достаточное смещение за пределы видимой области. На этот интервал спектра приходился бы максимум энергии, излучаемой звездами с температурой 1000—1500° К. Чтобы покрыть достаточно широкую полосу неба, комплект сернистосвинцовых фотоприемников был расположен в один ряд. Кроме того, был установлен кремниевый фотоприемник для приема падающей радиации в интервале между 0,7 и 0,9 *мкм*, что давало базис для определения «цвета» исследуемых объектов. Вся процедура измерений выполнялась посредством электронного оборудования; никаких визуальных наблюдений на телескопе не велось.

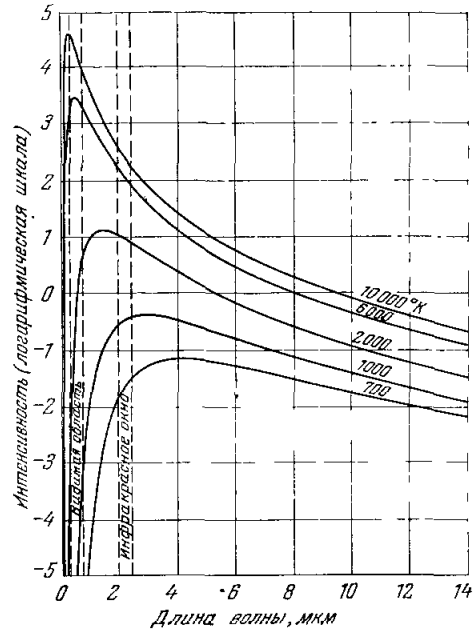

Рис. 2. Длина волны излучения, испускаемого нагретыми телами, изменяется с абсолютной температурой в соответствии с планковским законом излучения черного тела. Для обычных звезд температуры заключены в интервале от 2500 до 25 000° К. Только 1% всего излучения, испускаемого звездой с температурой 2500° К, приходится на видимую область, в то время как 10% приходится на полосу между 2 и 2,4 *мкм*, выбранную авторами для инфракрасного обзора неба.

Чтобы исключить излучение неба и фоновое излучение от объектов комнатной температуры, зеркало слегка покачивалось 20 раз в секунду; при этом сам телескоп и детекторы оставались неподвижными. Излучение фона не меняется в пределах значительной части фокальной плоскости и возбуждает не меняющийся (постоянный) ток в фотоприемнике. С другой стороны, источник малых размеров, излучение которого концентрируется в фокусе, попеременно смещаясь то в одну, то в другую сторону, создает переменный ток. Последующее усиление сигнала проводилось таким образом, чтобы исключить постоянную компоненту и усилить переменную. Эта схема действует столь успешно, что на длине волны 2 *мкм* возможно регистрировать звезды днем почти так же успешно, как и ночью. (Рэлеевское рассеяние солнечного света, создающее голубой цвет неба, на волне 2 *мкм* почти в 100 раз слабее, чем при 0,5 *мкм*.) Однако днем радиация фона в интервале 0,7—0,9 *мкм* оказывается слишком сильной для того, чтобы иметь возможность успешно проводить измерения в дневное время.

Весь телескоп запрограммирован для автоматического построчного сканирования всего небосвода. Телескоп поворачивается с востока на запад на 15° со скоростью, в 20 раз превышающей суточное вращение

неба, и затем смещается на 15′ к северу; потом следует поворот на 15° в противоположную сторону; затем инструмент снова смещается на 15′ к северу и т. д. Таким путем за час наблюдений исследуется полоса неба в 3° с севера на юг и 15° с востока на запад. В течение года инструмент может обозреть все небо, за исключением 25% областей, близких к горизонту или находящихся ниже горизонта. В настоящее время инструмент используется для вторичного обзора всего северного полушария неба.

АНАЛИЗ ИНФРАКРАСНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НЕБА

Как мы уже упоминали, с нашим 62-дюймовым инфракрасным телескопом было обнаружено около 20 000 источников инфракрасного излучения. Только 5500 из них, наиболее ярких, будут включены в каталог инфракрасных звезд. Те же источники, яркость которых меньше чем в 2,5 раза превышает порог обнаружения, будут исключены, поскольку весьма существенно, особенно для статистических целей, иметь уверенность в полноте обзора. Относительно небольшая часть из этих 5500 источников (менее 30%) излучает достаточное количество видимого света, чтобы их можно было видеть невооруженным глазом в ясную ночь. Приблизительно третья часть имеет визуальные звездные величины слабее 10,5; это означает, что они примерно в 100 раз слабее предела видимости невооруженным глазом.

Будет ли данная звезда из 6000, которые могут быть замечены визуально, включена в наш обзор, зависит от ее температуры, по крайней мере от ее кажущейся температуры. Пределы температур для типичных звезд заключены между 2500 и 25 000° К. Для звезды с температурой 25 000° К приблизительно 2% полной энергии испускается в видимой области и меньше 0,05% — в инфракрасной полосе, использованной в нашем обзоре. В противоположность этому, только 1% энергии, испускаемой звездой с температурой 2500° К, приходится на видимую область, а 10% падает на инфракрасный участок спектра близ 2 *мкм*. В результате звезда, которая в нашем обзоре находится на пределе обнаружения, легко наблюдалась бы в видимой области как звезда 2-й или 3-й величины, если ее температура примерно равна солнечной; но если ее температура 1000° К, то она была бы недоступна для визуального наблюдения даже в 200-дюймовый телескоп.

Это станет понятнее, если мы нанесем на график кажущуюся температуру звезд в нашем инфракрасном обзоре и кажущуюся температуру звезд, видимых невооруженным глазом (рис. 3). Тогда станет ясным, что звезды, яркие в инфракрасной области, холоднее звезд, которые ярки для визуального наблюдателя. Однако эти температуры не всегда могут быть интерпретированы как реальные температуры в смысле кинетической теории.

Очень красные и потому кажущиеся холодными звезды не обязательно будут действительно иметь невысокую температуру. Хорошо известно, что межзвездная пыль рассеивает синий свет, так что звезда кажется более красной и более холодной, чем она есть на самом деле. Этот эффект выявляет еще одну причину важности исследования неба в инфракрасных лучах: ослабление света звезд в инфракрасных лучах гораздо меньше, чем в видимых. В самом деле, в направлении на центр нашей Галактики излучение с длиной волны 2 *мкм* ослабевает примерно в 10 раз, тогда как, по нашим оценкам, видимое излучение ослабевает не меньше чем в 10 миллиардов раз! Звезды могут не только краснеть из-за межзвездной пыли; распределение энергии в их спектрах также может отклоняться от описываемого планковским законом излучения черного тела.

Тем не менее общий характер температурных изменений спектров сохраняется.

Рис. 4 и рис. 5 показывает распределение по небу наиболее ярких звезд, наблюдаемых визуально, и самых ярких звезд, наблюдаемых на длине волны 2,2 *мкм*; представлено около 300 звезд каждого типа. Хотя знакомые созвездия в инфракрасных лучах уже не выделяются, оба распределения кажутся более или менее случайными и с качественной стороны одинаковыми. Некоторое число хорошо известных красноватых звезд, таких, как Бетельгейзе, присутствует на обеих картах, но, как

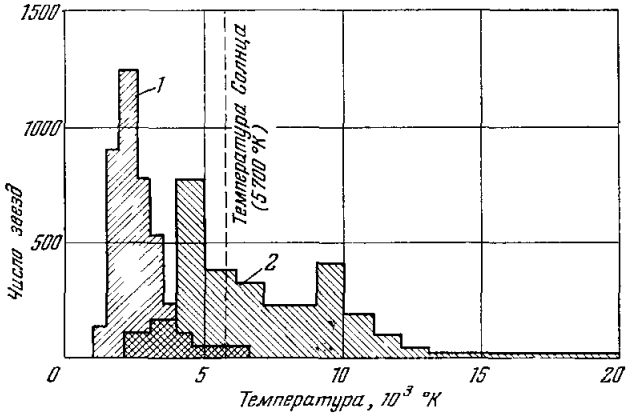

Рис. 3. Область кажущихся температур 5500 ярчайших звезд из инфракрасного обзора авторов (*1*). Если судить только по красному оттенку этих звезд, то большинство их попадает в интервал между 1500 и 3500° К. Показаны также пределы температур тех примерно 6000 звезд, которые видны невооруженным глазом (*2*). Значения температур слегка перекрываются в области между 2000 и 6500° К.

и следовало ожидать, более горячие белые звезды совсем не выделяются при наблюдении в инфракрасных лучах.

Распределение 300 слабейших звезд, видимых невооруженным глазом, и 300 слабейших звезд, выявленных в инфракрасных лучах, показано на рис. 6. Только три звезды оказались общими для обоих обзоров. Хотя распределения в общем снова подобны, случайность уже отступает, и начинает бросаться в глаза Млечный Путь — центральная плоскость нашей звездной системы. Возможно, в инфракрасных лучах он выделяется даже немного больше, чем в визуальных. Млечный Путь оказывается самой заметной деталью, если построить распределение звезд, отобранных по степени покраснения (рис. 7). Из этой иллюстрации становится очевидным, что инфракрасные наблюдения могут оказаться мощным орудием исследования структуры нашей Галактики.

Эта растущая роль Млечного Пути на картах распределения слабейших звезд объясняется достаточно просто. В среднем яркие звезды относительно ближе к нам, и мы, грубо говоря, видим одинаковое количество их в любых направлениях, поскольку в пределах, охватываемых наблюдениями, Галактика приблизительно однородна. Однако слабые звезды в общем так удалены от нас, что, когда мы смотрим под прямым углом к плоскости Галактики, мы видим звезды, находящиеся далеко за пределами галактического диска. С другой стороны, плотность звезд остается высокой во всем пространстве, которое может охватить телескоп, когда мы направляем его вдоль галактической плоскости. В итоге отчетливо

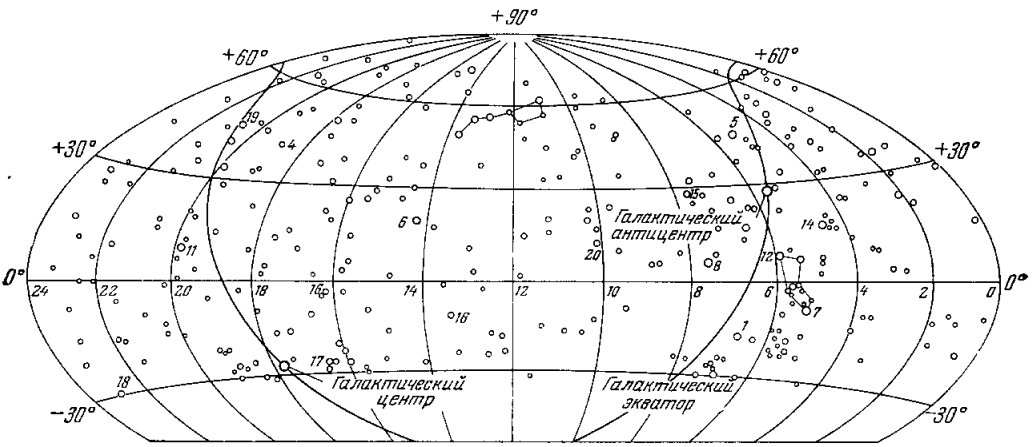

Рис. 4. Наиболее яркие из звезд, видимых невооруженным глазом, распределены более или менее случайным образом. Цифрами обозначены 15 из 20 ярчайших звезд, названия которых приведены ниже. Пять звезд, отмеченных знаком* в списке, не показаны на карте, потому что они постоянно находятся ниже горизонта. На этой и последующих картах число нанесенных звезд примерно равно 300. Числа на горизонтальной оси отмечают часы прямого восхождения. *1* — Сириус; *2* — Канопус *; *3* — Альфа Центавра *; *4* — Вега; *5* — Капелла; *6* — Арктур; *7* — Ригель; *8* — Процион; *9* — Ахернар *; *10* — Бета Центавра *; *11* — Альтаир; *12* — Бетельгейзе; *13* — Альфа Южного Креста *; *14* — Альдебаран; *15* — Поллукс; *16* — Спика; *17* — Антарес; *18* — Фомальгаут; *19* — Денеб; *20* — Регул.

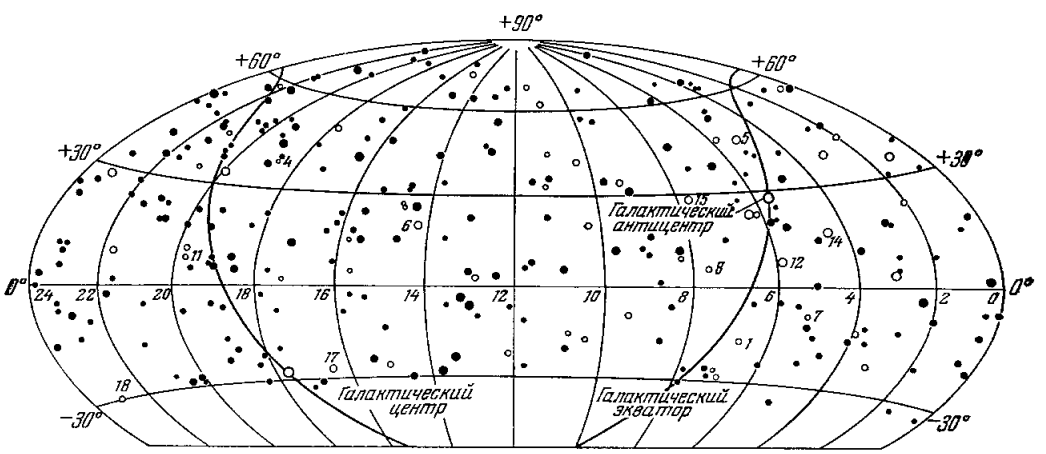

Рис. 5. Самые яркие инфракрасные звезды, попавшие в обзор неба на длинах волн между 2 и 2,4 *мкм*, также распределены более или менее случайно, но только 20% из них (светлые кружочки) попадают в число наиболее ярких звезд, видимых невооруженным глазом. Однако некоторые из них были бы видны невооруженным глазом как слабые звезды. Звезда может казаться красной, потому что она действительно холодная или потому что ее свет проходит через межзвездную пыль, которая преимущественно рассеивает и ослабляет синюю компоненту исходного излучения.

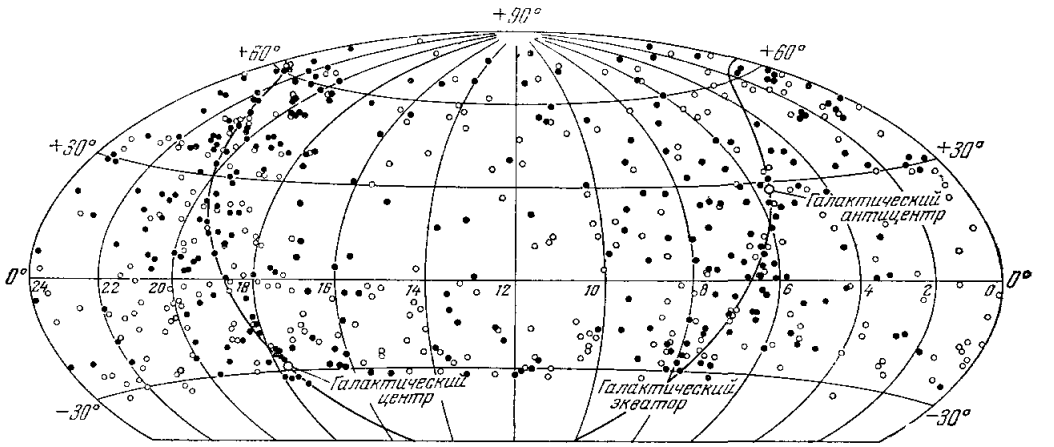

Рис. 6. Самые слабые звезды, как видимые невооруженным глазом (светлые кружки), так и инфракрасные (темные), имеют тенденцию к скоплению вблизи галактического экватора. По этой простой причине мы действительно должны увидеть больше звезд, когда мы смотрим вдоль галактической плоскости, чем тогда, когда наш взгляд направлен под прямым углом к ней. Только три из 300 слабейших инфракрасных звезд обзора попадают в число 300 слабейших звезд, видимых глазом. Среди 5500 наиболее ярких инфракрасных звезд обзора примерно 30% оказывается среди тех 6000 звезд, которые видны невооруженным глазом на той же широте.

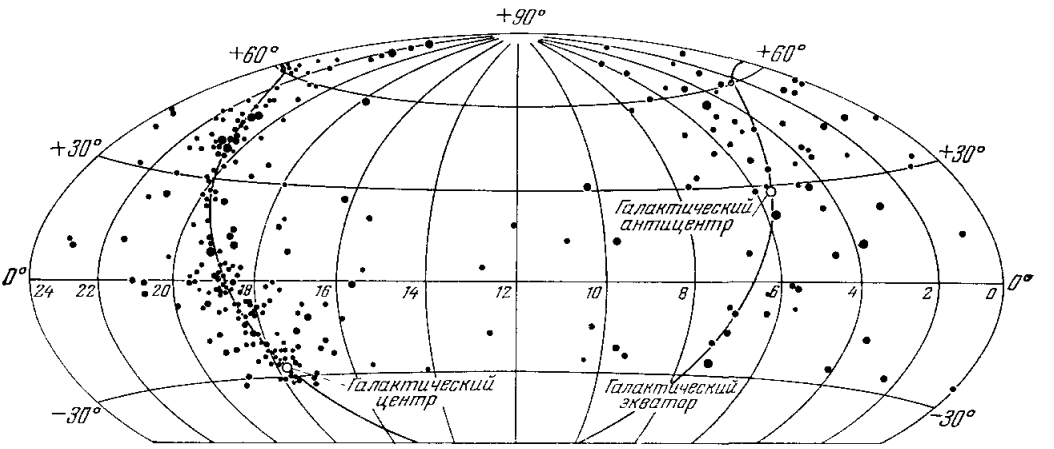

Рис. 7. У наиболее красных из инфракрасных звезд нашего обзора безошибочно выявляется концентрация к галактическому экватору, и особенно в направлении на галактический центр. Согласно оценкам, межзвездная пыль ослабляет видимый свет звезд, находящихся близ центра Галактики, примерно в 10 миллиардов раз. Однако инфракрасное излучение на длине волны ~ 2 *мкм* ослабляется лишь в 10 раз. Кажущаяся температура всех нанесенных здесь звезд ниже 1700° К. Было обнаружено, что многие из них — долгопериодные переменные.

выявляются постепенное увеличение плотности звезд в направлении галактического центра и уменьшение ее в противоположном направлении.

Приведенные выше данные наблюдений в инфракрасных лучах можно использовать для нахождения определенных характеристик нашей Галактики. Например, попавшие в обзор холодные звезды дают нам возможность оценить, что толщина галактического диска составляет приблизительно 400 *пс* (1 *пс* равен 3,26 светового года); это примерно совпадает с оценкой, полученной по горячим звездам. Другой интересный результат: в плоскости Галактики наш телескоп может обнаруживать очень красные звезды-гиганты на непредвиденно больших расстояниях — примерно 2000 *пс*. Мы нашли, что в пределах области, охватываемой наблюдениями, звезды Галактики становятся более редкими с увеличением расстояния от галактического центра: вблизи Солнца, которое находится на расстоянии 10 000 *пс* от центра, плотность звезд убывает в 2,5 раза на каждые 1000 *пс*. Конечно, эти простые выводы искажены межзвездным покраснением, и мы должны сделать определенные предположения о том, как оно влияет на наши данные. Хотя эффект покраснения и вопрос о собственном красном цвете объекта не могут быть однозначно отделены друг от друга, инфракрасные данные оказываются искаженными межзвездным покраснением значительно меньше, чем аналогичные оптические данные.

Инфракрасные подсчеты звезд могут также быть полезны для изучения строения Галактики. Известно, что на нашем расстоянии от галактического центра Галактика делает полный оборот примерно за 200 млн. лет. На этом основании с учетом формы и размеров Галактики можно вычислить, какова должна быть ее масса. При этом получается, что наблюдаемым звездам, газу и пыли может быть сопоставлено меньше половины массы, получаемой в результате указанного выше подхода. Одно из возможных объяснений состоит в том, что могут существовать многочисленные невидимые звезды (быть может, инфракрасные) и что именно они составляют существенную часть полной массы Галактики. Отсутствие в нашем обзоре большого количества слабых, но случайным образом распределенных звезд показывает, что подобные объекты либо вообще отсутствуют, либо лежат ниже предела обнаружения посредством нашего инструмента. Самые слабые звезды, которые мы регистрировали, являются истинно яркими, но далекими звездами и потому создают лишь очень малую долю полной массы. Таким образом, отсутствующая масса остается необъясненной.

САМЫЕ ХОЛОДНЫЕ ИЗ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Хотя статистические результаты, которые следуют из нашего обзора, достаточно значительны, мы больше всего интересовались отдельными обнаруженными очень красными объектами. Сначала мы предполагали, что бо́льшая часть этих объектов принадлежит к семейству холодных переменных звезд с периодами от нескольких месяцев до нескольких лет. (Одной из причин, по которой наш обзор проводился в два различных года, была попытка оценить, сколько звезд исчезнет из первого обзора ввиду того, что они окажутся в нижней точке своей кривой блеска; другая состоит в том, чтобы получить статистически долю звезд, попавших в обзор и оказавшихся переменными.) Мы думали, что в случае удачи нам удалось бы обнаружить и протозвезды. По-видимому, эти объекты могут иметь форму протяженных шарообразных сгущений пыли и газа при температуре только в несколько сот градусов Кельвина и представлять собой турбулентные массы вещества, объединенные собственным

тяготением, непосредственно перед образованием из них одной или нескольких звезд. Наблюдения были рассчитаны на обнаружение достаточно плотных объектов с температурой не ниже 400° К; другими словами, мы надеялись обнаружить звездоподобные объекты, температуры которых лишь немного превышают точку кипения воды (373° К), если такие тела действительно существуют и находятся достаточно близко к нам.

Среди 5500 наблюдавшихся инфракрасных звезд 450 настолько красны, что по меньшей мере 47% полного выхода их энергии лежит

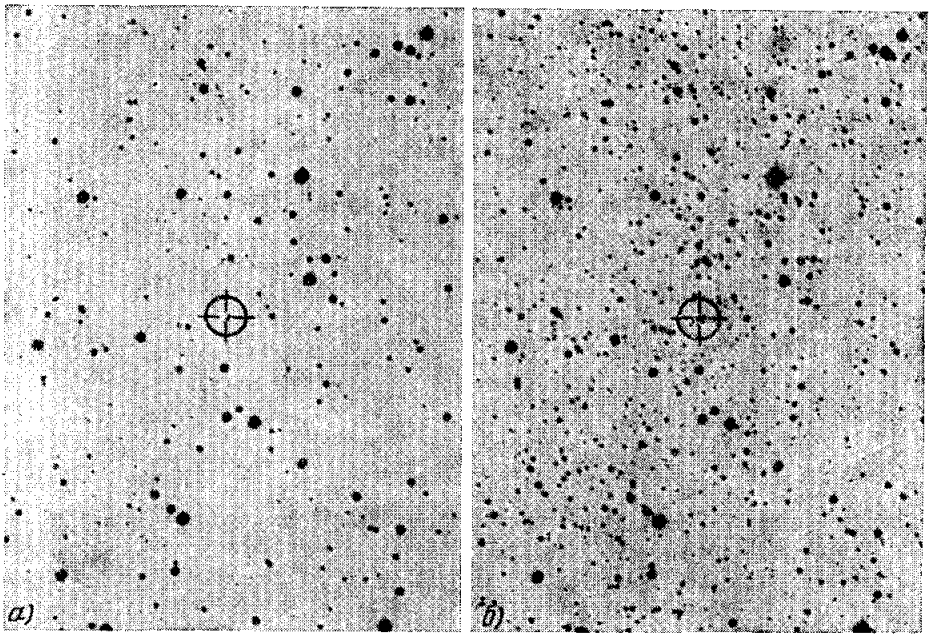

Рис. 8. Инфракрасный источник в Лебеде излучает на волне ~2 *мкм* столь же сильно, как и Вега — четвертая по яркости звезда неба. Объект не виден на чувствительных к синим лучам пластинках (*а*), полученных на паломарском 48-дюймовом телескопе Шмидта. Однако он отчетливо выделяется на пластинках, чувствительных к красным лучам (*б*). На волне 20 *мкм* источник в Лебеде превышает по яркости все известные звезды, исключая Солнце.

в инфракрасной области длиннее 1 *мкм*, что соответствует температуре черного тела ниже 1700° К. Как мы и предполагали, почти все эти звезды являются долгопериодными переменными. В течение трех лет наблюдений блеск некоторых звезд на волне 2,2 *мкм* изменился примерно в 10 раз. Это само по себе очень интересное открытие, потому что самые холодные из ранее наблюдавшихся переменных (типа Миры Кита) весьма мало меняют свой блеск в инфракрасных лучах.

Однако некоторые из очень красных звезд не являются долгопериодными переменными. В самом деле, одна из уже обнаруженных самых красных (и самых холодных) звезд не меняет блеска. Эта—звезда, расположенная вблизи созвездия Лебедя, столь же ярка в инфракрасных лучах на 2 *мкм*, как и Вега — четвертая по яркости звезда неба (рис. 8). Фрэнк Лоу из Университета штата Аризона обнаружил, что на 20 *мкм* источник в Лебеде ярче, чем любой другой звездный объект на небе, кроме Солнца. Распределение энергии в спектре этого объекта как будто похоже на распределение для звезды с температурой около

1000° К. Фред Форбс из того же университета нашел, что ее излучение в ближних инфракрасных лучах поляризовано приблизительно на 5%.

Что же представляет собой этот холодный объект? Об этом мы пока ничего не знаем, за исключением того, что он является уникальным по комбинации исключительной яркости, сильнейшего покраснения и отсутствия переменности. Гарольд Л. Джонсон и В. Реддиш (Университет штата Аризона) пришли к выводу, что это может быть исключительно яркая звезда-сверхгигант, которая покраснела вследствие влияния либо межзвездной пыли, либо окружающей звезду оболочки. Если это действительно так, то этот объект оказался бы сверхгигантом не наблюдавшегося до сих пор типа. Другие исследователи, а именно М. У. Пенстон (Королевская Гринвичская обсерватория), предположили, что звезды в процессе формирования могут быть окружены оболочками из холодной пыли. Следовательно, источник в Лебеде может оказаться примером протозвезды, хотя он и не окружен другими молодыми звездами, как можно было бы ожидать.

Почти все другие яркие и очень красные объекты, которые были изучены более подробно после их обнаружения при обзоре, оказались либо переменными по блеску, либо звездами, очень сильно покраснев-шими вследствие действия межзвездной пыли. Таким образом, один важный, хотя и существенно отрицательный результат обзора состоит в установлении того факта, что те крайне красные объекты, которые могут быть связаны с формирующимися звездами и очень ярки в излучении 2 *мкм*, встречаются не часто.

ДОПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ?

Именно наше желание полностью исключить влияние отбора заранее намеченных областей неба или определенных категорий объектов, признанных «интересными», привело нас к проведению обзора всего неба. Наша цель состояла в выявлении того, что существует на самом деле. Более удобные телескопы, снабженные инфракрасными фотоприемниками, несомненно будут гораздо чувствительнее, чем наша несложная установка. С подобными инструментами уже сделано несколько интересных открытий при более подробном изучении ряда специфических объектов.

Один из таких объектов — это звезда R Единорога, которая расположена в голове кометообразной туманности, называемой «переменной туманностью Хаббла» (рис. 9). В течение многих лет R Единорога относилась на основании ее оптического спектра к звездам типа T Тельца (см. статью Дж. Хербига «Самые молодые звезды» в «Scientific American» за август 1967 г.). В 1966 г. Эугенио Мендоза (обсерватория Тонанцинтла, Мексика) нашел, что спектр R Единорога имеет второй максимум в инфракрасной области, который включает бóльшую часть полной энергии, излучаемой объектом. Максимум этой инфракрасной компоненты лежит около 4 *мкм*; общее распределение энергии примерно соответствует излучению черного тела с температурой 750° К, за исключением примечательного избытка при 22 *мкм*. Лоу, который выполнил основную часть астрономических наблюдений на длине волны 10 *мкм*, и Брюс Дж. Смит предположили, что это распределение энергии может быть создано облаком пыли, окружающим звезду, которое поглощает коротковолновую радиацию и переизлучает энергию в более длинноволновом инфракрасном участке спектра. В дальнейшем Лоу и Смит предположили, что этот объект может быть примером протопланетной системы. Примечательно, что T Тельца относится к числу наиболее молодых звезд нашей Галактики.

Весьма похожий объект найден в Большой туманности Ориона, которая, как полагают, является «инкубатором» для новых звезд (рис. 10). Этот объект был обнаружен одним из наших сотрудников, Эриком Э. Беклином, который использовал 60-дюймовый телескоп обсерватории Маунт Вилсон. В фотографических длинах волн этот объект невидим даже в 200-дюймовый телескоп, но в инфракрасных лучах он находится почти на пределе обна-

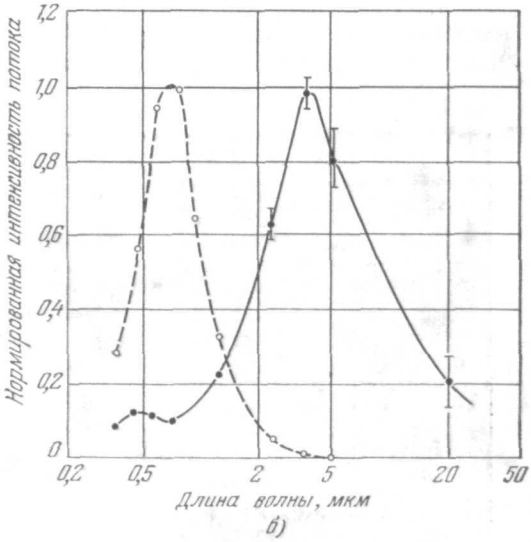

Рис. 9. Возможно, что с объектом в голове переменной туманности Хаббла (*а*) связана протопланетная система. На этой фотографии, полученной на Ликской обсерватории, инфракрасный объект, обозначаемый как R Единорога, похож на голову ныряющей птицы. Этот объект классифицировался как звезда типа T Тельца, пока Эугенио Мендоза из обсерватории Тонанцинтла (Мексика) не нашел, что спектр R Единорога (сплошная кривая на рисунке *б*) имеет высокий максимум вблизи 4 *мкм*. Пунктиром показан спектр Солнца.

ружения в нашем обзоре. Хотя источник представляется точечным, он окружен протяженной областью «размазанной» радиации, центр которой приходится на источник.

Излучение точечного источника было измерено на различных длинах волн в инфракрасном диапазоне вплоть до 13,5 *мкм*. Эти измерения позволили построить кривую интенсивности излучения, которая близко совпадает с кривой излучения черного тела с температурой 650° К. И здесь нам снова нужно рассмотреть, действительно ли этот объект имеет такую температуру или это нормальная звезда, видимая составляющая излучения которой поглощается и рассеивается пылью. Можно вычислить, что если этот объект — красный сверхгигант, то для создания наблюдаемой картины он должен «прикрываться» таким количеством пыли, которое ослабляет его излучение в 100 триллионов раз. Такое объяснение представляется нам совершенно неудовлетворительным. Мы уверены, что интересующий нас объект является звездой с крайне низкой температурой поверхности, вполне возможно,— протозвездой. Если сделать разумные предположения о ее массе и размерах, то обнаружится, что наблюдаемые изменения могут происходить за время много меньше 1000 лет — короткое время по астрономическим масштабам.

В прошлом году Лоу и Дуглас Клейнман попробовали изучить инфракрасную звезду в Орионе на 20 *мкм*. Они оказались не в состоянии обнаружить измеримый сигнал от точечного источника, однако нашли примыкающий к этому, но, по-видимому, отличный от него исключительно

яркий протяженный источник. Фактически на 22 *мкм* эта инфракрасная туманность оказывается самым ярким объектом на небе, за исключением Солнца и Луны. Мы можем лишь строить предположения о ее температуре, но по относительному отсутствию энергии на других длинах волн можно оценить, что она меньше 150° К, т. е. на 120° ниже точки замерзания воды! И снова наиболее правдоподобно, что эта туманность — пример плотного облака, в котором формируются звезды.

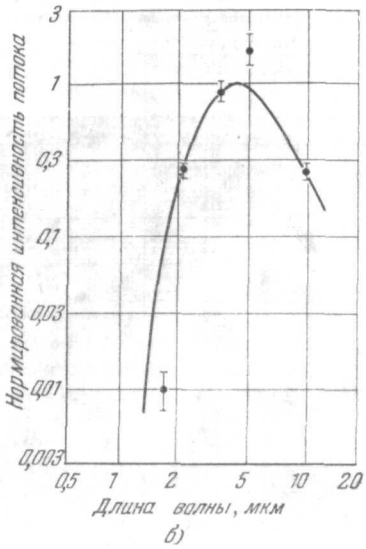

Рис. 10. Инфракрасная звезда в Орионе была открыта Эриком Беклином, который использовал обычный 60-дюймовый телескоп обсерватории Маунт Вилсон. Положение объекта показано маленьким кружком на фотографии Ликской обсерватории (*а*). В пределах этого кружка не видно ни одной звезды даже с 200-дюймовым телескопом. Инфракрасный источник представляется точечным объектом, окруженным протяженной областью, также испускающей инфракрасное излучение. Кривая интенсивности излучения для точечного источника (*б*) согласуется с кривой для черного тела с температурой 650° К.

Еще один замечательный факт был добавлен недавно, когда Эрнест Раймонд и Бальдур Элиассен из Калифорнийского технологического института, работавшие на радиотелескопе в Оуэнс Валлей (Калифорния), открыли, что инфракрасный точечный источник в Орионе испускает также радиоволны в виде линии, характерной для радикала OH (гидроксил). С учетом этого открытия известные источники излучения радиолинии OH в настоящее время исследуются в инфракрасных лучах для обнаружения подобных же объектов.

ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР В ИНФРАКРАСНЫХ ЛУЧАХ

У многих галактик при наблюдении их в видимых лучах обнаруживаются четко определенные ядра. В случае нашей собственной Галактики межзвездное ослабление света настолько велико, что никто не может заглянуть в область галактического центра, хотя несколько работ указывают на наличие центрального сгущения. Однако несколько лет назад радиоастрономы открыли источник радиоизлучения Стрелец А, положение которого очень тесно совпадает с точкой, определенной как центр Галактики по изучению звездных движений. Когда мы начинали наш обзор, мы надеялись обнаружить центр Галактики по его инфракрасному излучению.

В наш обзор действительно попал инфракрасный источник, который, как мы теперь предполагаем, является центром нашей звездной системы. Впрочем, он был так мало заметен, что мы распознали его только после того, как он был обнаружен Беклином с помощью фотоприемника на 2,2 *мкм* и 24-дюймового телескопа обсерватории Маунт Вилсон. После этого первоначального успеха были проведены измерения на 0,9; 1,65; 2,2 и 3,4 *мкм*; они выполнялись на 60-дюймовом телескопе обсерватории

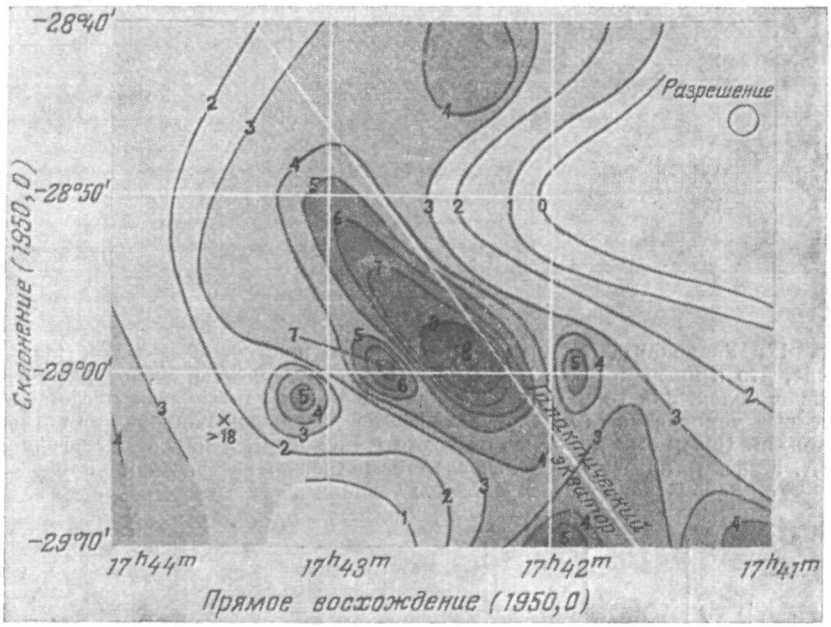

Рис. 11. Инфракрасная карта галактического центра показывает интенсивное излучение на 2,2 *мкм* немного левее галактического экватора. Еще левее имеется мощный инфракрасный источник, положение которого отмечено крестиком. Линия, отмеченная нулем, соответствует излучению фона неба. Цифры у кривых — единицы $5{,}2\cdot10^{-10}$ *вт/см²мкм·стер*.

Маунт Вилсон и 200-дюймовом паломарском рефлекторе. Эти наблюдения выявили протяженный источник инфракрасного излучения, центр которого расположен в динамическом центре Галактики или очень близок к нему. При достаточном увеличении виден также слабый фон со сложной структурой (рис. 11). В настоящее время мы считаем, что бóльшая часть этих вторичных особенностей возникает скорее от местных изменений межзвездного поглощения, чем от сложной структуры интенсивного источника излучения в галактическом центре. Общая картина в инфракрасных лучах согласуется с радиокартами этой области (рис. 12).

Излучение от галактического центра может быть интерпретировано путем сравнения его с излучением от центральной области галактики в Андромеде, которая, по общему мнению, близко напоминает нашу звездную систему. В самом деле, если инфракрасные наблюдения ядра нашей Галактики нанести на график в том же масштабе, что и инфракрасные наблюдения ядра туманности Андромеды, то тесное сходство между обеими картинами бросается в глаза (рис. 13). Если это сравнение справедливо (а мы уверены в этом), то инфракрасное излучение, зарегистрированное от центра нашей Галактики, по-видимому, образуется

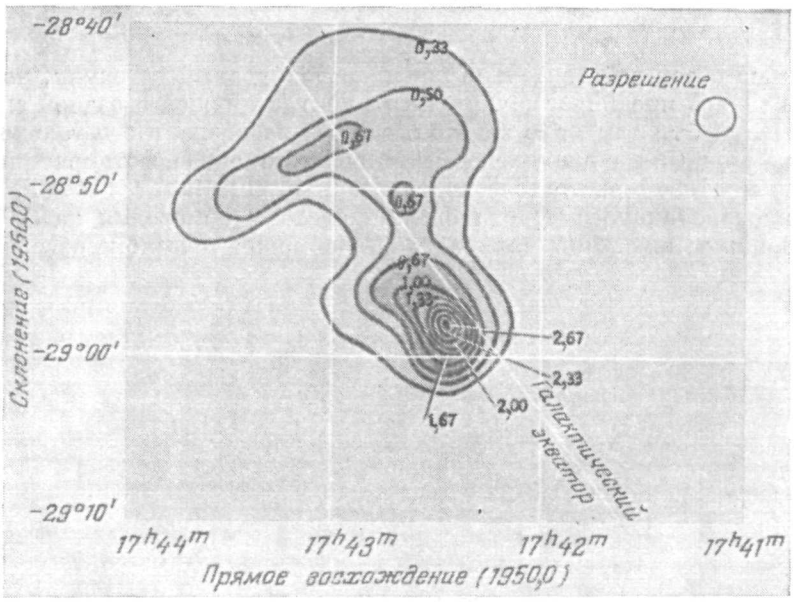

Рис. 12. Радиокарта галактического центра, построенная в том же масштабе, что и инфракрасная карта на рис. 11. Оба метода обзора дают очень близкие положения галактического центра. Числа на изофотах представляют антенные температуры (в °К). Была введена небольшая поправка на поглощение пыли. Обзор был выполнен на волне 1,9 *см* Д. Даунсом, А. Максвеллом и М. А. Миксом, которые использовали 36-метровую антенну Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института.

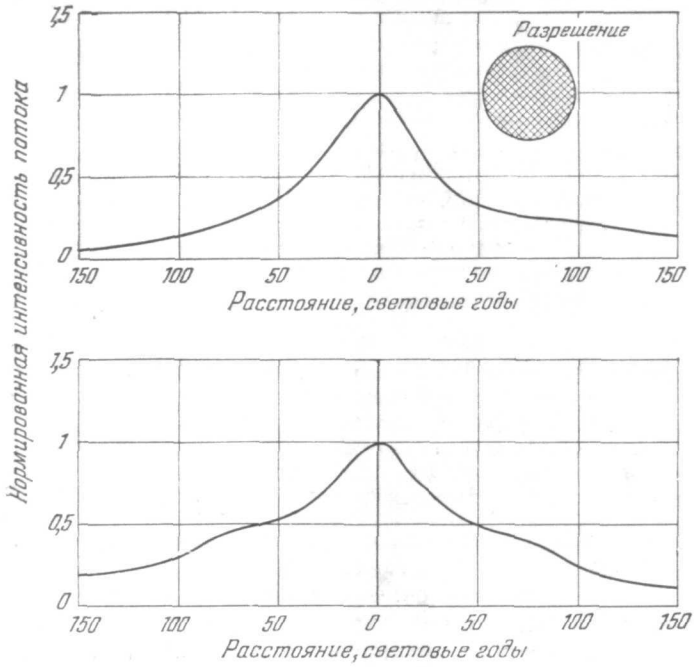

Рис. 13. Ядра галактик — туманности Андромеды (вверху) и нашей Галактики (внизу) — дают одинаковые профили при сканировании инфракрасными фотоприемниками на волне 2,2 *мкм*. Разрешение на нижнем рисунке уменьшено для приведения в соответствие с разрешением для галактики Андромеды.

миллионами обычных звезд, плотно «набитых» в области, поперечник которой составляет всего несколько парсек. Внутри центрального ядра, диаметром примерно 1 *пс*, число звезд в единице объема может примерно в 10 миллионов раз превышать значение для окрестностей Солнца. Это означает, что в ядре звезды расположены в 200 раз ближе друг к другу, чем знакомые нам звезды. И если бы мы жили там, то звезды на небе казались бы нам примерно в 40 000 раз (или на 11 звездных величин) ярче, чем те, на которые мы смотрим сейчас. Но даже в этом случае самые близкие звезды были бы в среднем в несколько тысяч раз дальше Плутона — самой далекой планеты солнечной системы.

Как мы уже упоминали, галактический центр невозможно увидеть визуально, поскольку видимое излучение от него ослабляется в 10^{10} раз. Поблизости от центра общей картины излучения имеется особенно сильный инфракрасный объект, который представляется совершенно точечным. Если этот источник действительно расположен в галактическом центре, то он должен быть меньше 0,1 *пс* в диаметре. Тогда полная энергия его излучения оценивается в 300 000 солнечных. Истинная природа этого источника пока служит предметом дискуссий, и нет ни одного удовлетворительного объяснения. Здесь мы не можем привлечь аналогии между нашей Галактикой и другими, поскольку любая из них не настолько близка к нам, чтобы различить в пределах окружающей ядро области такой крошечный объект. Если бы источник был одиночной звездой, он входил бы в число 2—3 ярчайших из известных звезд. С другой стороны, если это—скопление звезд, похожих на Солнце, то звезды в нем были бы настолько близки друг к другу, что парные столкновения происходили бы примерно каждые 10 000 лет, а это скопление имело бы время жизни порядка всего 1000 млн. лет — промежуток гораздо более короткий, чем возраст Галактики.

Описанные нами результаты были получены из наблюдений, сделанных в основном в ближней инфракрасной области. Как выглядело бы небо при использовании гораздо более длинных волн, например 20 *мкм*? Мы ничего не можем сказать об этом без дальнейших исследований, но вполне возможно, что намек на интересующую нас картину дается наблюдениями экзотических объектов, в частности квазаров.

Квазары — объекты гораздо более слабые, чем вошедшие в наш обзор,— недавно были исследованы в инфракрасных лучах Лоу (Университет штата Аризона) и Джонсоном (Калифорнийский технологический институт). Хотя опубликованы измерения в области за пределами 2 *мкм* только для самого яркого квазара 3С 273, стало ясно, что у этого объекта и нескольких аналогичных ему основная доля энергии излучается в инфракрасных лучах. Более того, Лоу и другие исследователи из Аризонского университета, изучая сейфертовские галактики — звездные системы со звездоподобными ядрами,— обнаружили, что основная доля их энергии также излучается в инфракрасной области. Лоу находит, что по крайней мере одна сейфертовская галактика обладает максимумом интенсивности при 20 *мкм*. Как возникает это излучение, пока неизвестно. Весьма вероятно, что оно имеет нетепловой характер, т. е. энергия здесь выделяется в процессе, совершенно отличном от того, который служит источником излучения обычных звезд. Такие интересные результаты дают нам уверенность в том, что инфракрасная астрономия даст нам ключи к лучшему пониманию Вселенной.

Калифорнийский
технологический институт,
США

ЛИТЕРАТУРА

1. G. Neugebauer, D. E. Martz, R. B. Leighton, Astrophys. J. **142** (1), 399 (1965).
2. Eugenio E. Mendoza, Astrophys. J. **143** (3), 1010 (1966).
3. B. T. Ulrich, G. Neugebauer, D. McCammon, R. B. Leighton, et al., Astrophys. J. **146** (1), 288 (1966).
4. E. E. Becklin, G. Neugebauer, Astrophys. J. **147** (2), 799 (1967).
5. D. E. Kleinmann, F. J. Low, Astrophys. J. **149** (1, pt. 2), L1 (1967).
6. A. G. W. Cameron, P. J. Brancazio, Infrared Astronomy, Gordon & Breach, Science Publishers Inc., 1968.