

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

184.101



## СТРОЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ \*

*П. тен-Бруггенкате, Потсдам*

Успехи, достигнутые астрономами в исследованиях строения вселенной за последние 20 лет, вызвали среди неспециалистов меньший интерес, чем мощное развитие физики, имевшее место за тот же промежуток времени, опрокинувшее наши прежние представления. Причина этого, повидимому, заключается в том, что квантовая теория и волновая механика затронули основы точных наук и повели к созданию совершенно новых методов исследования.

Совершенно иначе обстоит дело в астрономии. Здесь методы исследований в основном остались прежними, но зато стали изучаться иные объекты. Два десятилетия назад вопрос о распределении звезд в окрестностях Солнца стоял в центре внимания звездной астрономии. В настоящее же время мы сходными методами исследуем распределение в пространстве спиральных туманностей. Это грандиозное расширение поля астрономических исследований, общую картину которого я постараюсь нарисовать, лучше всего может быть иллюстрировано следующим примером. На астрономическом съезде, состоявшемся в Гамбурге в 1912 г., основоположник современной звездной астрономии Зеелигер имел возможность сказать, что не существует достаточно веских причин для того, чтобы допустить существование островных вселенных, напоминающих нашу Галактику. В настоящее время мы знаем, что спиральные туманности должны в этом смысле рассматриваться как островные вселенные. Теперь мы знаем, что на фотографической пластинке, снятой с долгой экспозицией с помощью большого рефлектора обсерватории Моунт-Вильсон на участке звездного неба величиною с лунный диск, можно насчитать до 300 таких островных вселенных.

Однако мы начнем наш обзор со строения нашей звездной системы. В звездной астрономии принято обозначать положение объекта на небе его галактическими координатами, т. е. координатами, отсчитываемыми от большого круга, положение которого на небесной сфере совпадает с положением Млечного Пути. Галактическая долгота соответствует географической долготе, а галактическая широта — географической широте. Было обнаружено, что распределение на небе

\* Phys. Z., 37, № 22/23, 780—785, 1936; перевод С. А. Шорыгина.

ярких звезд, а следовательно, в первую очередь распределение звезд, видимых невооруженным глазом, симметрично относительно Млечного Пути; точнее говоря, было установлено, что оно зависит только от галактической широты. Что касается пространственного распределения этих наиболее ярких звезд, то мы отсюда можем сделать тот вывод, что Солнце находится вблизи центра „местной“ звездной системы, более или менее симметричной относительно оси вращения этой системы. Однако после распространения работ по звездной статистике на гораздо более слабые звезды и после повторения аналогичных исследований для звезд от 12-й до 18-й зв. величины, картина среднего распределения звезд по небу значительно меняется. В таком случае пространственная плотность звезд (т. е. частота их распределения) будет зависеть уже не только от галактической широты, но и от галактической долготы. Эти слабые звезды обрисовывают звездную систему, в которой Солнце занимает сильно эксцентрическое положение. Правда, и в этом случае плос-



Рис. 1. Звездные облака в части Млечного пути, видимой в южном полушарии (по Барнарду)

кость Млечного Пути остается плоскостью симметрии; однако эта большая звездная система простирается гораздо дальше в направлении  $325^\circ$  галактической долготы (созвездие Стрельца), чем в противоположном направлении  $145^\circ$  галактической долготы (созвездие Ориона). Асимметрия галактических широт, обнаруживающаяся при переходе к слабым звездам, происходит от того, что на пространственную плотность звезд оказывают влияние звездные облака, входящие в состав Млечного Пути. Наиболее слабыми звездами из числа тех, которые образуют видимый облик Млечного Пути, являются именно звезды примерно 12-й величины. При обозрении распределение яркости отдельных участков Млечного Пути вдоль по всему его протяжению эта асимметрия тотчас же бросается в глаза. Наиболее яркие облака, образующие Млечный Путь, располагаются в созвездиях Щита, Змееносца, Стрельца и Скорпиона. Начиная отсюда, яркость Млечного Пути в обе стороны постепенно уменьшается и достигает в противоположной точке небесной сферы — в созвездии Ориона — наименьшего своего значения. Этот характерный асимметрический ход яркостей различных участков Млечного Пути отчетливо выявляется и в числах слабых звезд. Внимание того, кто впервые увидел южное полушарие звездного неба, приковывается, в первую очередь, не неизвестными яркими звездами, а структурой Млечного Пути, столь непохожей на структуру части его, видимой в северном полушарии (рис. 1). Фантазия древних греков объединила наиболее яркие звезды северного полушария в созвездия,

воплотившие фигуры героев их мифов; обитатели же острова Явы в ярких облаках и темных промежутках южной части Млечного Пути (в созвездиях Змееносца и Скорпиона) усмотрели фигуру великана Бимы, являющегося центральной фигурой яванских религиозных сказаний.

Имеет ли такая структура Млечного Пути своей причиной чередование в пространстве областей, чрезвычайно богатых звездами, с областями почти беззвездными или же эта структура в значительной своей части обязана своим происхождением имеющимся в мировом пространстве облакам космической пыли, вызывающим поглощение света? Сегодня мы решительно склоняемся ко второму взгляду. Не следует, однако, умалчивать о том, что для окончательного разрешения этого вопроса необходимо будет произвести еще целый ряд исследований, касающихся отдельных деталей. А если бы справедливым оказалось первое предположение, то пространственное распределение слабых звезд должно было бы значительно отклоняться от равномерного.

Обратимся к методам, позволившим судить о среднем распределении звезд в пространстве. Прямой и в известном смысле наиболее точный метод определения пространственного распределения звезд бесспорно должен был бы состоять в измерении расстояний возможно большего числа отдельных звезд. В самом деле, метод непосредственных измерений звездных расстояний, состоящий в измерении так называемых тригонометрических параллаксов, обеспечил нам прочную основу наших знаний о строении вселенной. Поэтому будет уместно сказать о нем несколько слов. Крошечный эллипс, описываемый на небе каждой звездой вследствие обращения Земли вокруг Солнца, — вот что пытается измерить астроном. Звезда, находящаяся на полюсе эклиптики, описывает путь, по своей форме являющийся точным отображением земной орбиты; это движение по эллипсу у звезды, находящейся на эклиптике, вырождается в колебательное движение, совершающееся по прямой линии. Однако это параллактическое движение уже для расстояний, являющихся незначительными по сравнению с размерами вселенной, очень быстро становится неизмеримо малым; а потому этот первый непосредственный метод исследования пространственного распределения звезд не приводит к цели. Правда, современная степень точности измерений могла бы оказаться достаточной для того, чтобы произвести такого рода промеры в пределах шара радиусом в 150 световых лет, в центре которого находится Солнце. Но расстояние, которое свет успевает пролететь за 150 лет по астрономическим масштабам, настолько мало, что пользы от этого было бы мало.

По этой причине были сделаны попытки составить представление о пространственном распределении звезд статистическим путем. Проблема ставится при этом следующим образом. Мы определяем (путем подсчета) число звезд определенной яркости, находящихся в некоторой области неба, выбираемой нами произвольно. Можем ли мы отсюда сделать вывод относительно пространственного распределения этих звезд, проектирующихся на выбранную нами

область неба? Если бы светимости (яркости) всех звезд были между собой равны, то поставленная задача решалась бы легко. Тогда (в случае если бы поглощения света в пространстве не происходило) видимая яркость звезд являлась бы мерой их расстояния. В таком случае мы могли бы утверждать с полной уверенностью, что звезды 7-й величины находятся от нас дальше, чем звезды 5-й величины и т. д. Однако сделанная предпосылка о равенстве светимостей всех звезд в действительности отнюдь не оправдывается. Нам известны звезды, посылающие в пространство в 10 000 раз больше света, чем Солнце, а также и звезды, излучающие едва 0,0001 света Солнца. Поэтому мы совершенно не можем решить на первый взгляд, почему нам одна звезда представляется ярче другой: по той ли причине, что она находится к нам ближе, или по той причине, что она обладает большей абсолютной яркостью. Число звезд определенной видимой яркости, находящихся в определенной области неба, зависит, следовательно, не только от пространственного распределения звезд, но и от сравнительной частоты встречаемости звезд, обладающих большими и малыми абсолютными яркостями.

Астроном в данном случае стоит перед задачей, которая — с математической точки зрения — в точности может быть уподоблена задаче, которую приходится разрешать физика, когда он желает вывести энергетическую кривую какого-нибудь источника света из наблюдаемой спектроболограммы ее. Если бы физик имел в своем распоряжении спектральный прибор, обладающий неограниченной разрешающей силой, то решение поставленной задачи не представляло бы никаких затруднений. Однако в действительности физика приходится считаться с ограниченной разрешающей силой своего спектрального прибора; сначала он получает экспериментальным путем спектроболограмму, а потом уже из нее он должен вывести энергетическую кривую. Для астронома роль этой спектроболограммы, которую приходится определять предварительно, играет функция распределения абсолютных яркостей звезд; лишь установив ее, он может расшифровать истинные числа, характеризующие пространственное распределение звезд. Но, к сожалению, функция распределения абсолютных яркостей соответствует спектральному прибору весьма небольшой разрешающей силы. Того физика, который захотел бы с помощью такого прибора определить энергетическую кривую источника света, мы назвали бы неосторожным. Равным образом и звездная статистика дает нам лишь весьма грубую картину среднего пространственного распределения звезд. Что касается местной звездной системы Зеелигера и Каптейна, определяемой положениями более ярких звезд, мы можем вкратце охарактеризовать ее следующим образом (рис. 2): плоскость Млечного Пути является плоскостью симметрии сильно сплюсненной системы. В этой плоскости пространственная плотность звезд на расстоянии, примерно в 30 000 световых лет, падает до одной сотой доли частоты встречаемости их в окрестностях Солнца; в направлении же, перпендикулярном к плоскости симметрии, столь малая пространственная плотность

звезд достигается гораздо раньше, а именно: уже на расстоянии примерно в 6 000 световых лет. К этой системе принадлежат все звезды, кажущиеся нам ярче 11-й величины, а Солнце находится довольно близко от центра этой системы. Протяженность ее в плоскости Млечного Пути, как это нам теперь известно, повидимому, несколько меньше вследствие необходимости учитывать поглоще-

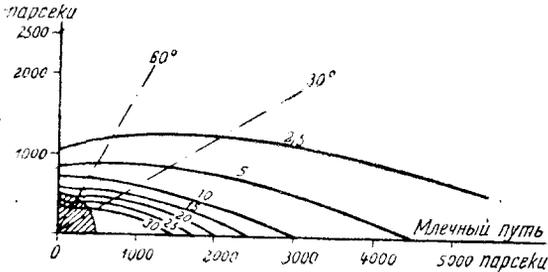


Рис. 2. Разрез местной звездной системы; ход кривых одинаковой частоты встречаемости звезд по Зеелигеру

ние света. При попытке распространения этих исследований на слабые и слабейшие звезды методы звездной статистики оказываются недостаточными для определения размеров этой системы больших размеров. Что же касается исследований Сирса о распределении

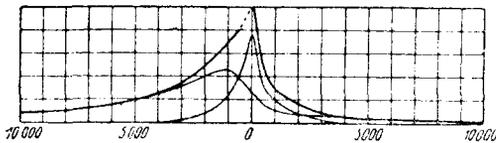


Рис. 3. Распределение пространственных плотностей звезд в большой Галактике по Сирсу. Медленное падение частот в направлении  $\lambda$  325°, быстрое падение в противоположном направлении. Была произведена попытка разложения наблюдаемого распределения (верхняя кривая) на симметричное местное распределение и на асимметричное распределение (две нижних кривых)

звезд от 12-й до 18-й величины, то они совершенно надежно позволяют сделать следующие два вывода (рис. 3): 1) большая звездная система является резко асимметричной по галактическим долготам и 2) „местная“ звездная система Зеелигера и Каптейна должна рассматриваться в качестве более или менее ясно выраженного местного звездного облака, находящегося на периферии этой большой системы.

Весьма счастливым обстоятельством является то, что мы располагаем более глубокими познаниями о строении галактической системы. Эти познания опираются на исследования пространственного распределения звездных скоплений. Нам известно два вида звездных скоплений: открытые (рассеянные) или галактические звездные скопления (например, Плеяды) и шарообразные звездные кучи (например, Мессье 13 в созвездии Геркулеса; рис. 4). Уже распределение объектов обоих этих видов на небесной сфере обнаруживает характерные различия. Все без исключения откры-

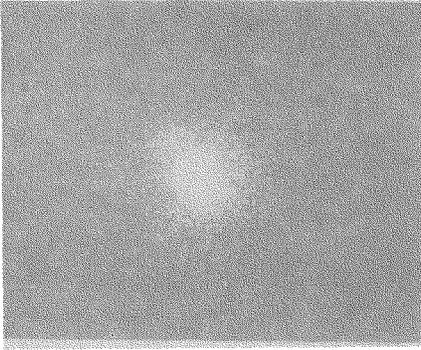


Рис. 4. Шарообразная звездная куча Мессье 13

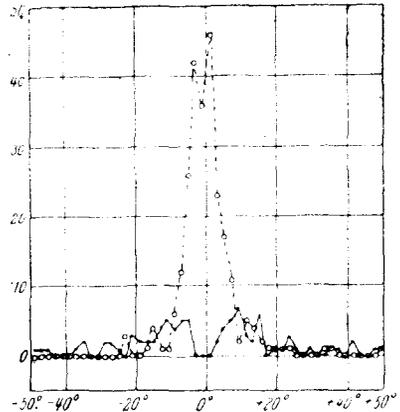


Рис. 5. Распределение рассеянных (белые кружочки) и шарообразных (черные точки) звездных скоплений по галактическим широтам

тые звездные скопления встречаются или в самом Млечном Пути или, во всяком случае, в непосредственной близости от него. Шарообразные же звездные кучи, наоборот, обнаруживают довольно равномерное распределение по галактическим долготам. Но распределение звездных скоплений оказывается неодинаковым и по галактическим долготам. В то время как открытые звездные скопления обнаруживают равномерное распределение по галактическим долготам, шарообразные звездные кучи резко выраженным образом предпочитают галактические долготы в окрестностях  $325^\circ$  (рис. 5 и 6). Уже на основании этого возможно провести глубокие параллели с распределением ярких и слабых звезд. Мы можем сказать, что открытые звездные скопления образуют скелет „местной“ звездной системы, в то время как шарообразные звездные кучи намечают контуры системы гораздо больших размеров. Эта большая система отчетливо выявляется в числах, выражающих пространственную плотность слабых звезд. Местную звездную систему мы должны себе мыслить как звездное облако, расположенное на периферии этой большой системы. Что касается звездных скоплений, общее число которых ограничено, — число откры-

тых звездных скоплений меньше 500, а число шарообразных звездных куч меньше 100, — то нам удается для каждого отдельного скопления надежным образом вывести его расстояние. Благодаря этому мы получаем возможность построить в правильном масштабе пространственные модели систем рассеянных звездных скоплений и шарообразных звездных куч. Построив такие модели, мы убедимся в том, что система рассеянных звездных скоплений имеет форму круглого диска, причем плоскость этого диска почти в точности совпадает с плоскостью Млечного Пути. Диск этот имеет в диаметре около 30 000 световых лет, а Солнце находится вблизи центра этой системы. Иначе обстоит дело с системой, определяемой расположением шарообразных звездных куч. Эта система сжата гораздо слабее. Плоскость ее симметрии совпадает с плоскостью, определяемой расположением звездных облаков, входящих в состав Млечного Пути. В этой плоскости рассматриваемая система обладает протяженностью примерно в 160 000 световых лет, а в направлении перпендикулярном к этой плоскости — протяженностью примерно в 120 000 световых лет. Солнце расположено в системе шарообразных звездных куч резко эксцентрично, от центра которой его отделяет расстояние несколько меньшее

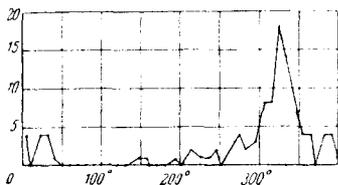


Рис. 6. Распределение шарообразных звездных куч по галактическим долготам

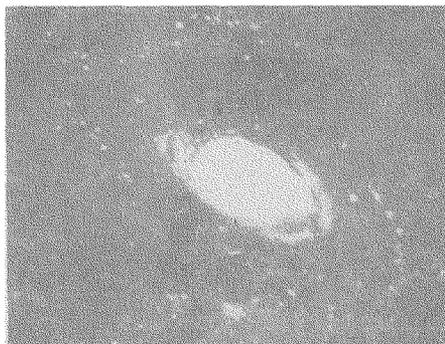


Рис. 7. Спиральная туманность, ветви которой частично кажутся расплавленными на звезды

35 000 световых лет. Центр этой системы располагается от Солнца в направлении к большому звездному облаку в созвездии Стрельца.

На основании определенных невязок, получившихся при определении расстояний рассеянных звездных скоплений, Трюмплер сделал заключение о том, что по крайней мере в непосредственной близости от плоскости Млечного Пути происходит заметное поглощение света. Влияние этого поглощения света в вышеприведенных числах, выражающих размеры звездных систем, уже учтено.

Что же касается шарообразных звездных куч, то Шапли удалось с помощью звезд типа  $\delta$  Цефея, встречающихся в этих кучах, получить весьма надежные значения расстояний этих куч. (Звезды

типа  $\delta$  Цефея образуют определенный класс переменных звезд, у которых обнаруживается связь между светимостью их, с одной стороны, и периодом изменений блеска, с другой). В 1926 г. Хаббл удалось доказать наличие звезд типа  $\delta$  Цефея во внешних частях большой спиральной туманности Мессье 33, что впервые дало возможность определения расстояний спиральных туманностей (рис. 7), не прибегая для этого к каким-либо гипотезам. Это позволило решить старый вопрос о том, принадлежат ли эти объекты к нашей Галактике, или же эти туманности образуют самостоятельные островные вселенные. Правильным было признано второе решение. В течение последних лет Хаббл при помощи 100-дюймового и 60-дюймового рефлекторов обсерватории Моунт-Вильсон провел систематическое обозрение неба в поисках внегалактических туманностей. Наши современные познания о распределении этих объектов на небе базируются на подсчетах числа

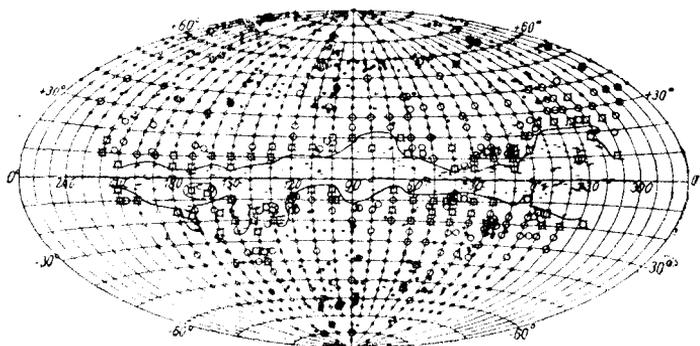


Рис. 8. Распределение на небе внегалактических туманностей

туманностей (44 000 объектов), сфотографированных на 1283 пластинках. Охваченные этими фотографиями участки звездного неба распределены по галактическим широтам и долготам в общем и целом равномерно по всей небесной сфере. На рис. 8 изображено распределение туманностей на небе. Этот рисунок может служить наглядным доказательством существования светопоглощающей материи, группирующейся в плоскости Млечного Пути. У полюсов Галактики, вследствие незначительного протяжения слоя этой материи в направлении, перпендикулярном к плоскости Галактики, поглощение света становится едва заметным. Там мы наблюдаем участки с нормальными количествами внегалактических туманностей. Но уже на галактических широтах  $\pm 40^\circ$  располагаются участки с гораздо меньшими количествами внегалактических туманностей, а в поясе Млечного Пути шириной примерно в  $20^\circ$  почти не встречается таких участков, на которых были бы найдены внегалактические туманности. Это происходит потому, что в плоскости Млечного Пути поглощение света настолько сильно, что

наш взгляд не проникает за пределы нашей галактической системы. Наиболее сильное поглощение света наблюдается на галактической долготе  $325^\circ$ , в направлении, в котором находится центр „большой Галактики“. На участках неба, на которых поглощения света не происходит, среднее число туманностей, приходящихся на один квадратный градус, составляет 460; это число получается при фотографировании неба в ньютоновском фокусе 100-дюймового рефлектора с экспозицией в 1 час при наилучших условиях видимости. Предельная звездная величина объектов, выходящих на таких снимках, приблизительно равна  $20^m,0$ . Число 460 туманностей, приходящихся на 1 квадратный градус, соответствует на-круг 100 туманностям, приходящимся на площадь, равновеликую лунному диску. Хэббл оценил число туманностей, выходящих на photographиях, сделанных с помощью 100-дюймового рефлектора при многочасовых экспозициях, числами, доходящими до 1780 на квадратный градус. По мере уменьшения яркостей фотографируемых объектов число туманностей возрастает настолько быстро, что по достижении 21-й зв. величины на пластинке выходит столько же туманностей, сколько и звезд. Но в конечном счете нас интересует распределение туманностей в пространстве. Первый шаг, который необходимо сделать для решения этого гораздо более трудного вопроса, состоит в надежном определении видимых яркостей туманностей. Однако здесь мы с самого же начала встречаемся с серьезным затруднением, состоящим в необходимости увязки фотографической фотометрии точек (изображения звезд) и фотографической фотометрии площадей (изображения туманностей). В настоящее время мы стоим лишь на пороге установления безупречной фотометрической системы яркостей туманностей, вследствие чего оценки яркостей ниже 19,5 зв. величины сейчас должны рассматриваться как весьма приближенные.

Несмотря на это, повидимому, может быть установлена следующая важная закономерность. Ограничиваясь туманностями, видимые яркости которых не настолько малы, чтобы необходимо было учитывать влияние красного смещения или возможной кривизны пространства при выводе светимостей этих туманностей, мы убеждаемся в том, что оказывается приблизительно справедливым следующее соотношение:

$$\lg N_m = 0,6m + \text{const}, \quad (1)$$

в котором  $N_m$  — число туманностей, начиная от наиболее ярких до имеющих звездную величину  $m$ . Существенную роль в этом уравнении играет коэффициент 0,6, стоящий перед  $m$ . Из него следует необходимость существования равномерного распределения туманностей в пространстве. Тот факт, что мы в первом приближении можем считать этот вывод реальным, оказывается весьма существенным для космологических исследований относительно структуры пространства, о которых мы вкратце упомянем в заключении. Но перед этим нужно сказать о совершенно других иссле-

дованиях, которые в столь же высокой степени способствовали расширению наших представлений о строении вселенной. Речь пойдет об усовершенствовании методов фотографирования слабых туманностей с помощью огромных рефлекторов обсерватории Моунт-Вильсон. С этой целью особенно важным было, насколько возможно, увеличить светосилу камеры спектрографа. Решающий шаг в данном направлении был совершен в 1930 г., когда Рейтону удалось сконструировать объектив для этой камеры светосилой 1:0,6. Наглядной картиной успехов, которые с тех пор были достигнуты в деле определения лучевых скоростей слабых туманностей, может служить следующая цифровая сводка:

Наибольшие скорости туманностей (по годам, в км/сек)

1929 . . . . .	7 800
1930 . . . . .	11 500
1931 . . . . .	19 700
1932 . . . . .	24 000
1934 . . . . .	39 500
1935 . . . . .	42 000

В этой сводке сопоставлены наибольшие измеренные скорости туманностей, заимствованные из ежегодных отчетов обсерватории Моунт-Вильсон. При этом особенно замечательно, что туманности, обнаруживающие красное смещение порядка 40 000 км/сек (т. е. около  $1/8$  скорости света), обладают настолько малыми яркостями, что в кассегрэновском фокусе 100-дюймового рефлектора они уже не могут наблюдаться визуально, в силу чего их не удастся непосредственно держать на щели спектрографа. В этом случае наблюдения производятся следующим образом: на негативе, полученном в ньютоновском фокусе, выбирается подходящий объект для ведения рефлектора и положение его относительно слабой туманности точно измеряется. Тогда система микрометрических винтов позволяет так установить крест нитей ведущей трубы в кассегрэновском фокусе по отношению к щели спектрографа, что изображение туманности падает на щель спектрографа тогда, когда выбранный для ведения объект стоит на кресте нитей. На рис. 9 воспроизведены несколько спектров туманностей в порядке увеличения красного смещения. Рядом со спектрами воспроизведены негативные изображения этих же туманностей, снятые с приблизительно одинаковыми экспозициями. Как мы видим, увеличение красного смещения протекает параллельно с убыванием диаметров и видимых яркостей туманностей. Это служит прямым доказательством наличия связи между красным смещением и расстоянием. На крохотных спектрах, длина которых не достигает 3 мм линии в интервале между  $\lambda 3900$  и  $\lambda 5000$ , различимы лишь с трудом. Поэтому при наличии больших смещений необходимо экспонировать спектры настолько долго, чтобы на пластинках появились характерные линии поглощения H и K (дублет резонансных линий  $\text{Ca}^+$ ), легко отличимые от всех остальных.

Насколько сейчас можно говорить об этом с некоторой определенностью, красное смещение возрастает линейно вместе с увеличением расстояния туманностей и притом на-круг на  $180 \text{ км/сек}$  на каждые  $10^6$  световых лет. Следовательно, световому лучу, летящему от туманностей, обладающих лучевыми скоростями порядка  $\frac{1}{8}$  скорости света, требуется около 200 млн. лет для того, чтобы долететь до нас. Однако на таких расстояниях красное смещение становится настолько значительным, что его влиянием на фотографические яркости уже нельзя пренебрегать. Это ставит перед

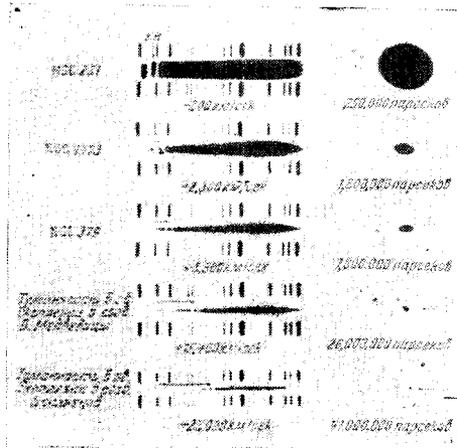


Рис. 9. Слева — спектры далеких туманностей; спектр сравнения принадлежит гелию  
Справа — негативные изображения тех же туманностей

астрономами трудную задачу потому, что кроме того необходимо для внесения поправки, соответствующей действительности, оценить количество энергии, поглощаемой в различных частях спектра во фраунгоферовых линиях. Решение последней задачи необычайно важно еще и потому, что на основании исправленных значений яркостей туманностей в конечном счете могут быть сделаны выводы о структуре пространства.

Я полагаю, что мы стоим перед решением одной из величайших проблем, а именно проблемы о строении вселенной в целом. Нам предстоит решить, является ли красное смещение следствием расширения вселенной, т. е. нестатического состояния вселенной (Леметр, Эддингтон); или же пространство является в действительности статическим, а связь между красным смещением и расстоянием или же скоростью света указывает на существование нового фундаментального физического закона (Нернст).

В первом случае влияние красного смещения на видимые яркости туманностей будет больше, чем во втором. Это имеет своей при-

чиной то обстоятельство, что в первом случае наряду с обычным эффектом Доплера должна сказываться еще и работа, которая должна быть произведена излучением при расширении пространства. Если мы примем равномерное распределение туманностей в пространстве как наиболее вероятное, то точное исследование отклонений наблюдаемых частот распределения туманностей от значений, даваемых уравнением (1), откроет нам многообещающий путь к решению вопроса о структуре пространства.