

кости симметрии Галактики и чем ближе оно к ее плоскости симметрии. Наибольшая звездная плотность в самом центре Галактики. Здесь на каждый кубический парсек приходится несколько тысяч звезд, т. е. в центральных областях галактики звездная плотность во много тысяч раз больше, чем в окрестностях Солнца. При удалении от плоскости и оси симметрии звездная плотность убывает, причем при удалении от плоскости симметрии она убывает значительно быстрее. Поэтому если бы мы условились считать границей Галактики те места, где звездная плотность уже очень мала и составляет, например, только одну звезду на 1000 пс^3 (т. е. в 130 раз меньше, чем в окрестности Солнца), то очерченное этой границей тело было бы сильно сжатым круглым диском. Если границей считать область, где звездная плотность еще меньше и составляет одну звезду на $10\,000 \text{ пс}^3$, то снова очерченное границей тело будет диском примерно той же формы, но только больших размеров. Поэтому нельзя вполне определенно говорить о размерах Галактики. Если все-таки границами нашей звездной системы считать места, где одна звезда приходится на 1000 пс^3 пространства, то диаметр Галактики приблизительно равен $30\,000 \text{ пс}$, а ее толщина 2500 пс . Таким образом, Галактика — действительно сильно сжатая система: ее диаметр в 12 раз больше толщины. Как велики размеры Галактики, можно судить по тому, что свет, затрачивающий лишь полсутки, чтобы пройти «от края до края» всю Солнечную систему, должен путешествовать около $100\,000$ лет, чтобы пересечь Галактику по диаметру. Солнце находится почти точно в плоскости симметрии Галактики, но от оси симметрии (и, следовательно, от центра) оно отстоит далеко — на расстоянии около $10\,000 \text{ пс}$, т. е. оно ближе к краю Галактики, чем к ее центру.

Количество звезд в Галактике огромно. По современным данным оно превосходит сто миллиардов, т. е. примерно в двадцать пять раз превосходит численность жителей нашей планеты.

Газовая материя в Галактике

Существование газа в пространстве между звездами впервые было обнаружено по присутствию в спектрах звезд линий поглощения, вызываемых межзвездным кальцием и межзвездным натрием. Эти линии образуют-

ся не в атмосферах самих звезд, так как они одинаковы для всех звезд, в то время как другие линии могут быть интенсивны, слабы или вовсе отсутствовать в зависимости от температуры поверхности звезды. Кроме того, лучевая скорость, определенная по линиям межзвездного кальция и натрия, существенно отлична от лучевой скорости, согласованно получаемой по линиям спектра, принадлежащим самой звезде. Это и понятно, потому что межзвездные кальций и натрий заполняют все пространство между наблюдателем и звездой и со звездой непосредственно не связаны.

После кальция и натрия было установлено присутствие кислорода, калия, титана и других элементов, а также некоторых молекулярных соединений: циана CN, углеводорода CH и других.

Плотность межзвездного газа можно определить по интенсивности его линий. Как и следовало ожидать, она оказалась очень малой. Плотность межзвездного натрия, например, близ плоскости Галактики, т. е. там, где он наиболее плотен, соответствует одному атому на $10\,000\text{ см}^3$ пространства. Напомним для сравнения, что в обычных земных условиях в 1 см^3 воздуха содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул.

Долгое время не удавалось обнаружить межзвездный водород, хотя в звездах он самый обильный газ. Это объясняется особенностями физического строения атома водорода и характером поля излучения в Галактике.

В межзвездном пространстве не только очень мала плотность вещества, но и ввиду огромных расстояний между звездами чрезвычайно низка плотность излучения. В подавляющем большинстве мест Галактики плотность излучения такая же, какой она была бы у нас на Земле, если убрать Солнце, Луну, планеты, все земные источники света и оставить сиять одни звезды.

В таких условиях атомам межзвездного газа очень редко удается наткнуться на световой квант и поглотить его. Но время от времени это все же происходит. Если энергия кванта была велика, атом ионизируется, теряет электрон и в этом состоянии находится долго, так как плотность материи очень мала, в том числе очень мало вокруг свободных электронов, с одним из которых можно было бы вновь составить нейтральный атом.

Если поглощенный квант имел небольшую энергию, атом не ионизируется, а возбуждается, электрон не отрывает-

ется, но переходит на другую орбиту. В возбужденном состоянии атом может оставаться лишь ничтожную долю секунды. Он возвращается в обычное, как говорят, в основное состояние, излучив квант той самой частоты, какую поглотил.

Поэтому практически все атомы межзвездного газа находятся либо в основном нейтральном, невозбужденном состоянии, либо в ионизованном состоянии. Число атомов, находящихся в какой-нибудь момент в возбужденном состоянии, совершенно ничтожно.

Атомы нейтрального водорода, чтобы перейти в возбужденное состояние, поглощают квант весьма высокой частоты. При этом образуется линия поглощения. Но эта линия лежит в далекой ультрафиолетовой части спектра, той части спектра, которая при обычных наблюдениях вовсе не получается в спектрах звезд, так как далекое ультрафиолетовое излучение полностью поглощается атмосферой Земли. Лишь в наши дни, используя спутники и высотные ракеты для внеатмосферных наблюдений, можно поставить задачу выявления линий поглощения нейтрального водорода. И это уже сделано для спектра Солнца.

Ионизованный водород вовсе не способен поглощать излучение, так как ион водорода состоит из одного протона без электронов. А возбужденных атомов нейтрального водорода в межзвездном пространстве чрезвычайно мало. Именно возбужденные атомы водорода создают линии поглощения водорода в атмосферах звезд. Чтобы перейти в еще более высокое возбужденное состояние, уже возбужденный атом водорода поглощает квант не очень высокой энергии, с частотой, соответствующей видимой области спектра, где и образуются линии поглощения. В атмосферах звезд возбужденных атомов много, так как там очень высока плотность излучения. Вот почему в атмосферах звезд водород дает четко наблюдаемые линии, а межзвездный водород оказался таким трудноуловимым.

Но все-таки его удалось обнаружить, однако не по линиям поглощения, а по светлым (эмиссионным) линиям.

Если спектрограф наведен на лишенный звезд участок неба, в поле зрения попадет только толща межзвездной материи. Находящиеся в ней ионы водорода, встречаясь со свободными электронами и объединяясь с ними, должны в момент соединения излучать такой квант све-

та, какой нужно было поглотить при ионизации. Часто в следующее после объединения мгновение атом оказывается в высоком возбужденном состоянии, после чего он не обязательно сразу переходит в основное невозбужденное состояние, а может спускаться к нему каскадом, излучая несколько квантов, в том числе и кванты в видимой части спектра. В спектре неба на темном фоне появятся эмиссионные линии водорода. Именно таким путем был непосредственно обнаружен межзвездный водород.

Измерение интенсивности его линий подтвердило, что и в пространствах между звездами водород самый обильный газ, число его атомов приблизительно в тысячу раз превосходит число атомов всех остальных элементов, вместе взятых.

Близ плоскости Галактики один атом водорода приходится на $2-3 \text{ см}^3$ пространства. Это значит, что плотность всей газовой материи около плоскости Галактики составляет $5-8 \cdot 10^{-25} \text{ г/см}^3$, масса газа других элементов ничтожно мала. О чрезвычайно малой плотности межзвездного газа можно составить представление с помощью такого подсчета: обыкновенный выдох, совершаемый человеком, способен создать в кубе с ребром в 400 км плотность газа, равную плотности межзвездного газа.

Распределен межзвездный газ неравномерно, местами образуя облака с плотностью в десятки раз выше средней, а местами создавая разрежения. При удалении от плоскости Галактики средняя плотность межзвездного газа быстро падает. Общая его масса в Галактике составляет 0,01—0,02 общей массы всех звезд.

Звезды — горячие гиганты, излучающие большое количество ультрафиолетовых квантов, ионизуют весь межзвездный водород в значительной области вокруг себя. Размер зоны ионизации в очень большой степени зависит от температуры и светимости звезды. Расчет показывает, что при плотностях межзвездного водорода $2-0,5$ атома на 1 см^3 около звезды спектрального класса O весь водород ионизован внутри сферы с радиусом 30—100 пс. Около звезды B1 радиус зоны ионизации составляет 10—30 пс, около звезды B2 — 4—12 пс и т. д. Радиус зоны ионизации очень быстро уменьшается по мере перехода к более поздним спектральным классам и уже для звезд A0 он составляет малую долю парсека. Вне зон ионизации почти весь водород находится в нейтральном состоянии.

Таким образом, все пространство Галактики можно разделить на зоны, где водород не ионизован (эти зоны принято называть зонами Н I), и зоны ионизованного водорода (зоны Н II). Как показал теоретически датский астроном Стремгрен, границы между зонами Н I и Н II всегда резкие, постепенного перехода от области, где водород практически весь ионизован, к области, где он весь нейтрален, нет.

В тех случаях, когда звезды — горячие гиганты расположены сравнительно близко друг к другу, зоны Н II около этих звезд сливаются в одну общую зону ионизованного водорода.

Зоны Н II излучают, как мы поясняли выше, эмиссионные линии водорода, образующиеся при переходах атома после соединения иона со свободным электроном из высоких возбужденных состояний в более низкие. Наиболее интенсивной из наблюдаемых линий при этом оказывается линия H_{α} с длиной волны 6563 \AA , возникающая при переходе атома из второго возбужденного состояния в первое возбужденное состояние. Эта линия расположена в красной части спектра. Поэтому для выявления областей ионизованного водорода фотографируют участки неба с помощью фильтров, пропускающих излучение только в узкой части спектра около области 6563 \AA , т. е. вблизи места нахождения линии H_{α} . На таких фотографиях относительная яркость зоны Н II, интенсивно излучающей линию H_{α} , в сравнении с другими объектами значительно повышается и ее можно выделить.

Общий объем областей Н II в Галактике приблизительно в 10 раз меньше объема областей нейтрального водорода.

Около трех десятков лет назад было сделано еще одно крупное открытие, связанное с межзвездным газом. Оказалось, что нейтральный водород излучает эмиссионную линию с длиной волны 21 см. Это низкочастотное излучение, находящееся в диапазоне радиоволн, вызывается тем, что невозбужденный нейтральный водород может находиться в двух энергетически близких состояниях, отличающихся друг от друга совпадением или несовпадением ориентаций магнитных полей протона и электрона, образующих ядро атома водорода. Переходы с более высокого из этих уровней (когда магнитные моменты антипараллельны) на другой (когда магнитные моменты

параллельны), время от времени происходящие то с одним атомом, то с другим, сопровождаются излучением квантов с длиной волны 21 см. Хотя каждый атом излучает такой квант очень редко, большое число нейтральных атомов водорода, всегда находящихся на луче зрения (особенно большое при наблюдении в направлениях, близких к галактическому экватору), обеспечивает достаточную интенсивность линии, чтобы можно было ее наблюдать с радиотелескопами умеренных размеров.

Вращение Галактики

Так как простирающиеся вдоль луча зрения массы нейтрального водорода находятся в различных местах Галактики и имеют различную лучевую скорость, их излучения вследствие эффекта Доплера различным образом смещены относительно длины волны 21 см. Эмиссионная линия расширяется и для каждого направления принимает особую форму, отражающую все лучевые движения нейтрального водорода, которые происходят в этом направлении.

В настоящее время разработан метод определения закона вращения всей массы нейтрального водорода Галактики по совокупности профилей его эмиссионной линии 21 см для различных направлений. Можно полагать, что нейтральный водород в Галактике вращается так же или почти так же, как вращается сама Галактика. Тогда становится известным и закон вращения Галактики. Этот метод в настоящее время дает наиболее надежные данные о законе вращения нашей звездной системы, т. е. данные о том, как изменяется угловая скорость вращения системы по мере удаления от центра Галактики к ее окраинным областям.

Результаты такого определения, выполненного И. В. Петровской, Б. И. Фесенко и автором этой книги по профилям линий, полученным голландскими и австралийскими астрономами, приведены на рис. 9. Для центральных областей Галактики угловую скорость вращения пока определить не удастся. Как видно, угловая скорость вращения Галактики убывает по мере удаления от ее центра сначала быстро, затем медленнее. На расстоянии 8 кпс от центра угловая скорость равна $0",0061$ в год. Это соответствует периоду обращения 212 млн. лет. В районе Солнца (10 кпс от центра Галак-