

019.941 : 523.037

Interstellar Ionized Hydrogen (Y. Terzian, Ed.). W. A. Benjamin Inc., New York—Amsterdam, 1968, 774 pp.

Физика межзвездного ионизированного водорода совсем недавно считалась наиболее разработанной и практически завершенной областью теоретической астрофизики. Излучение горячей звезды ионизирует водород. Рекомбинации на возбужденные уровни и последующая цепь каскадных переходов, заканчивающихся на первом уровне, дают L_{α} , кванты бальмеровской серии и более высоких. Непрерывный спектр образуется при рекомбинациях, при свободно-свободных переходах электрона в поле иона (тормозное излучение) и при двухквантовых переходах, когда атом водорода переходит с уровня $2s$ на уровень $1s$, излучая два кванта, сумма частот которых равна частоте L_{α} . Удары электронов возбуждают низко расположенные метастабильные уровни ионов O, N, S, Ne и др. Вследствие малой плотности газа и радиации происходят запрещенные переходы с излучением квантов. Температура газа определяется балансом энергии, приносимой фотоэлектронами, и охлаждением вследствие возбуждения метастабильных уровней. Температура типичных туманностей—около $10\ 000^{\circ}\text{K}$, плотность $10\text{--}100$ атомов/см³. Эти параметры рассчитывались, исходя из измеренных относительных или абсолютных интенсивностей различных линий. Изучен процесс диффузии квантов L_{α} , по отношению к которым туманности имеют большую оптическую толщину. Эта диффузия происходит некогерентно, с изменением частоты, пока квант не переходит в крыло линии и не покидает туманности.

Другая группа вопросов, значительно менее исследованных, связана с космогонической проблемой. Было показано, что молодые горячие звезды генетически связаны с плотными туманностями, которые обычно окружают их. Вокруг области ионизированного водорода обычно расположена плотная зона нейтрального водорода, куда ионизирующие кванты не проникают, поглощаясь в туманности. Возникновение и эволюция этих объектов представлялись в следующем виде. Большое количество газа с массой $10^6\text{--}10^8$ масс Солнца скапливается, образуя плотный холодный комплекс. В центральной части комплекса, где температура особенно низка из-за концентрации пыли, поглощающей радиацию и охлаждающей газ, происходит гравитационная конденсация и образуются звезды, в том числе массивные, с высокой температурой. Эти звезды ионизируют газ, его температура и давление резко поднимаются, начинается расширение горячей зоны. В холодном неионизированном газе распространяется ударная волна, а на границе происходит ионизация новых масс газа, которые при этом оттекают в сторону звезды.

В последние годы существенно расширилась область спектра, в которой изучаются космические объекты. После радиоастрономии появились инфракрасная, рентгеновская и гамма-астрономия. Это значительно обогатило возможности исследования, позволило обнаружить ряд новых неожиданных свойств казалось бы знакомых объектов и стимулировало теоретические исследования. Такое возрождение испытала и область астрофизики, изучающая межзвездный ионизированный водород. Большое количество новых результатов и идей потребовало созыва специального симпозиума. Симпозиум был организован в декабре 1967 г. в США Национальной радиоастрономической обсерваторией и Ионосферной обсерваторией Аресибо. Целью Симпозиума было собрать вместе исследователей в радио-, инфракрасной и оптической областях спектра и теоретиков, чтобы обсудить новые результаты о межзвездной среде. Рецензируемая книга представляет собой сборник докладов и дискуссий на Симпозиуме, подготовленный к печати И. Терцианом.

В данной рецензии невозможно изложить содержание каждой из 32 работ, представленных на симпозиуме, поэтому ограничимся обзором отдельных проблем. Одной из основных проблем было обнаружение протозвезд, т. е. объектов, находящихся на ранней стадии звездообразования. Эти предполагаемые протозвезды представляют

собой объекты, максимум излучения которых приходится на инфракрасную область (3—10 $\mu\text{м}$), что соответствует температуре 700—800° К. Светимость в некоторых случаях достигает 1000 светимостей Солнца. У звезд небольшой массы видно оптическое излучение и хвост в инфракрасной области, образованный пылевой оболочкой, переизлучающей поглощенный ею свет центральной звезды. Эта оболочка может быть будущей планетной системой. Аномалии наблюдаются у таких формирующихся звезд и в ультрафиолетовой части спектра — там имеется сильный континуум.

Формирующиеся массивные звезды создают внутри газовой-пылевой комплекс небольшие плотные зоны ионизированного водорода. Такие объекты называются звездами-коконами. В оптической области спектра они не наблюдаются, но в последние годы обнаружено их радиоизлучение — в континууме и в линиях, образованных переходами между высокими уровнями атомов водорода и гелия. Диаметры таких туманностей — менее 0,5 пс , концентрация около 10^4 см^{-3} . Обычно наблюдается несколько сгустков, каждый соответствует одной зарождающейся звезде класса O. Эти сгустки внедрены в большую область HII.

Сформировавшиеся O-звезды, возраст которых меньше 10^6 лет, обычно окружены пылевой оболочкой, которая ослабляет их свет, но не мешает ионизировать водород вокруг. Это доказывает, что сечение истинного поглощения ультрафиолетовых квантов пылью не превышает сечения поглощения оптических квантов. Кроме того, такие оболочки доказывают, что пыль около горячих звезд испаряется достаточно медленно.

Интересные данные получены об эволюции звезд и областей HII. Скорость звездообразования вначале была раз в 10—20 выше, чем сейчас, но за последние $5 \cdot 10^9$ лет она существенно не менялась. Звезды малой массы в скоплениях образуются раньше, чем более массивные, — это непонятно с точки зрения теории. В скоплениях образуется около 15% всех звезд, остальные образуются в более протяженных ассоциациях. Эволюция массивных звезд вызывает соответственно эволюцию области ионизированного газа вокруг них. Эта эволюция связана с образованием структуры туманностей и на поздней стадии — с образованием расширяющейся оболочки, передающей часть энергии межзвездному газу.

Сравнение оптических данных и радиоданных наблюдений областей HII позволяет получить более точные сведения о физических условиях в этих областях, о распределении температуры и плотности, о тонкой структуре, связанной частично со звездообразованием и пограничными эффектами. Сравнение интенсивности балмеровских линий с радиоинтенсивностью, образующимся при свободно-свободных переходах, позволяет проверить расчеты заселенностей уровней и величину межзвездного поглощения. Радиоизлучение, которое не поглощается в межзвездной среде, позволило построить картину распределения областей HII в Галактике. Движения этих областей определяются как по оптическим, так и по радиолиниям, причем последние дают уже более полные результаты.

Измерение ширины и относительных интенсивностей радиолиний позволяет исследовать внутренние движения, содержание гелия, электронную температуру и относительные заселенности высоких уровней. Обнаруженная измерениями малая величина шарковского расщепления была объяснена уточненной теорией этого эффекта. Кинетическая температура оказалась значительно более низкой, чем считалось ранее, — около 5000—6000° К. Вычисленная температура равна истинной, если распределение на верхних уровнях с высокой точностью определяется формулой Больцмана. Ранее было указано, что весьма малые отклонения от равновесной заселенности, растущие с уменьшением номера уровня, должны вызвать мазер-эффект. Сравнение интенсивностей различных линий с различными Δl дало сейчас некоторое подтверждение этой гипотезе. В таком случае вычисленная температура может отличаться от истинной. Для атомов со многими электронами отклонение заселенностей от равновесных связано также с диэлектронной рекомбинацией.

Вопрос о температуре областей HII был темой отдельного заседания. Эту температуру можно определять по ширине спектральных линий (оптических и радио), по распределению энергий в балмеровском континууме, по отношению интенсивностей запрещенных линий, по интенсивности радиоизлучения на низких частотах, где оптическая толща уже не мала. Оказалось, что температуры, определенные разными методами, не согласуются. Причина этого — неоднородность температуры, причем разные методы чувствительны либо к низким, либо к высоким температурам, или же они отражают свойства самых ярких областей. Различия температур в разных частях туманности связано отчасти с нетепловыми источниками нагрева, как диссипация турбулентности или прохождение ударных волн, но, главное, с различной ионизацией элементов, излучение которых охлаждает газ. Кроме того, горячими являются области относительно высокой плотности, где удары второго рода уменьшают излучение. Температура отдельных туманностей и частей этих туманностей в большинстве случаев заключена между 4000 и 7000° К.

Области НII очень сильно концентрируются к плоскости Галактики — бóльшая часть их отстоит от экватора меньше чем на $0,5^\circ$. Исследовалось распределение областей в плоскости Галактики. Они сконцентрированы на расстоянии 4—6 *кпс* от центра, затем их число уменьшается и снова увеличивается на расстоянии 8 *кпс*. Распределение нейтрального водорода представляет собой широкое кольцо от 8 до 12 *кпс* от центра, так что его максимум дальше от центра, чем максимумы областей НII.

Последнее заседание Симпозиума было посвящено проблеме молекул ОН, наблюдаемых в радиолиниях около $\lambda = 18$ см. Верхний и нижний уровни этого перехода имеют сверхтонкую структуру, и наблюдаются четыре компоненты. При распределении Больцмана относительные интенсивности их должны быть 1 : 9 : 5 : 1 в прозрачном слое, а с увеличением оптической толщи интенсивности должны выравниваться. В действительности наблюдаются различные аномалии. Плотные пылевые облака дают иногда наблюдаемое тепловое излучение линий ОН с нормальными относительными интенсивностями. Однако большинство источников, причем значительно более ярких, имеет совершенно необычный спектр. Чаще всего наблюдаются слабые компоненты (одна или обе), в то время как главных компонент нет. В больших областях НII наблюдаются очень компактные мощные источники ОН с совершенно необычным спектром: главные линии в эмиссии, сателлиты в эмиссии или в поглощении. Каждая линия состоит из нескольких очень тонких составляющих, образованных разными сгустками с разными доплеровскими смещениями. Эти сгустки имеют различное отношение линий и размеры меньше $0'',006$. Излучение сгустков поляризовано чаще всего циркулярно и реже — линейно, причем степень поляризации высокая. В некоторых случаях излучение отдельных сгустков заметно меняется во времени на протяжении нескольких дней или месяцев, причем в разных линиях эти изменения независимы. Однако характер поляризации при этом обычно сохраняется.

Аномалии в компактных источниках ОН качественно объясняются отклонениями от локального термодинамического равновесия, переселенностью некоторых уровней, что приводит к вынужденному излучению и мазер-эффекту. Это объясняет высокую температуру излучения в отдельных компонентах, малую ширину линий и при определенных условиях поляризацию. Механизм накачки до сих пор не выяснен. Это может быть радиоизлучение или столкновения. Радиоизлучение зоны НII имеет преимущественное направление, и его интенсивность меняется внутри сгустка из-за поглощения молекулами ОН. Однако здесь имеются количественные трудности. Такие же трудности возникают при объяснении инверсии заселенностей возбуждением пучками нетепловых ионов. Рассматривались возможности накачки ультрафиолетовым излучением, инфракрасным излучением, влиянием химических реакций. Была предложена также гипотеза, основанная не на мазерном действии, а на влиянии коэффициента преломления, сильно зависящего от частоты. Если такая среда вращается, она может действовать как линза, и это может объяснить некоторые особенности. Однако проблема аномального излучения ОН не может считаться решенной. В то же время имеются серьезные основания полагать, что источниками этого излучения являются прото-звезды, находящиеся в процессе гравитационной конденсации.

В целом рецензируемая книга представляет собой высококачественный обзор современного состояния знаний об областях, где формируются горячие звезды.

С. Б. Пикельнер