

Космохимия

Раскрывая секреты звездного света

Н.Н. ЧУГАЙ,
доктор физико-математических наук
Л.И. МАШОНКИНА,
доктор физико-математических наук
Ю.В. ПАХОМОВ,
кандидат физико-математических наук
Т.А. РЯБЧИКОВА,
доктор физико-математических наук
Институт астрономии РАН



В предлагаемой статье дается представление о современном уровне спектральных исследований в астрофизике на примере последних научных

результатов, полученных в Институте астрономии РАН. Популярно излагаются современные методы и результаты спектральных исследований обычных

звезд солнечного типа, магнитных звезд с аномалиями химического состава, активных красных гигантов и сверхновых звезд.

Два века назад, в 1817 г., немецкий оптик Йозеф Фраунгофер опубликовал статью, в которой описал темные дискретные линии солнечного спектра, — известные теперь каждому астрофизику фраунгоферовы линии. Позднее он обнаружил такие же линии в спектре Сириуса. Так родился спектральный анализ — мощный инструмент изучения окружающего мира, благодаря которому мы теперь знаем, что такое звезды и как устроена Вселенная.

Видимый свет составляет относительно узкий интервал длин волн широкого спектра электромагнитного излучения — от радио- до рентгеновского и гамма-диапазона. Но не будет преувеличением сказать, что подавляющий объем знаний о Вселенной получен именно на основе оптических спектров небесных тел. Расшифровка “послания”, записанного в свете звезды, начинается с получения спектра. Для этого поток света, “собранного” телескопом, “посылают” на спектрограф, задача которого состоит в том, чтобы разложить свет на колоссальное множество “цветов” — современные спектрографы способны различить до полумиллиона цветовых оттенков. Число таких оттенков называют спектральным разрешением. Полученный спектр попадает на

ПЗС-матрицу, с помощью которой он записывается в цифровом виде и после этого становится доступным для исследования.

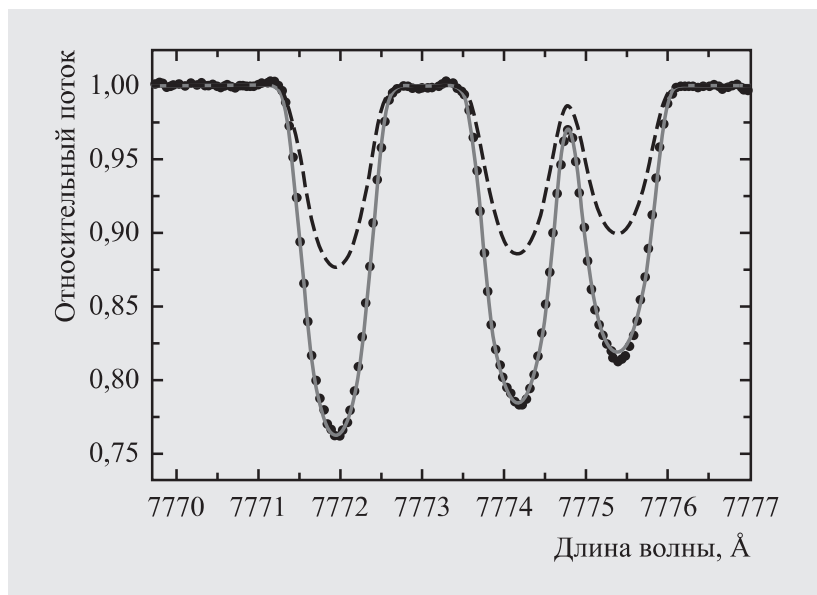
Спектр несет в себе сведения о температуре и ускорении силы тяжести на поверхности звезды, о скоростях движения звезд и газа в звездной атмосфере, о вращении звезды и, конечно, о химическом составе звездного вещества. Эта информация “записана” в линиях поглощения — многочисленных дискретных “провалах” в гладком распределении энергии по длинам волн. Впрочем, некоторые звезды показывают не только линии поглощения, но и линии излучения; в этом случае на месте ожидаемых линий наблюдаются избытки излучения. Главное свойство спектральных линий — их однозначная принадлежность данному химическому элементу — нейтральному атому либо его иону. Будем называть для удобства ионами и нейтральные атомы. Глубина линии поглощения тем больше, чем больше данного иона в атмосфере звезды. Это и дает возможность определять состав атмосферы звезды по ее спектру. Используя утонченные методы, можно извлечь из спектральных линий и другую важную информацию: в частности, о неоднородной структуре поверхности звезды, о пульсациях звезд

и о магнитном поле на поверхности звезд. Ниже рассказывается о некоторых любопытных результатах исследования звезд, полученных в последние годы в ИНАСАН с использованием спектрального анализа.

КАК ИЗУЧАЮТ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД

Свет звезды излучается фотосферой, над которой находится тонкий слой атмосферы. Ее масса ничтожна — в миллиарды раз меньше массы звезды. Проходя через атмосферу, свет частично поглощается в спектральных линиях. Каждый ион имеет свой, присущий только ему набор спектральных линий. В звездных спектрах наблюдаются линии почти 80 элементов — от водорода до урана. Сравнение наблюдаемых линий поглощения с теоретическими позволяет определить химический состав звездного вещества. Исследуя спектры звезд, удалось установить, что химический состав подавляющего большинства звезд Галактики и других галактик такой же, как у Солнца, а отклонения от этого правила всегда являются ключом к пониманию новых интересных процессов, отвечающих за такие отклонения.

Теоретический спектр звезды рассчитывается путем решения уравнения распространения света



Сравнение наблюдаемых профилей линий нейтрального кислорода в спектре звезды π Cet (кружки) с теоретическими профилями, рассчитанными в рамках предположения ЛТР (штриховая кривая) и при отказе от приближения ЛТР (сплошная кривая). Оба теоретических спектра рассчитаны при солнечном содержании кислорода, которое следует из анализа других линий кислорода в спектре этой звезды.

в звездной атмосфере с учетом поглощения и излучения света газом. Традиционно при расчете звездных спектров предполагается, что ионизация и возбуждение газа в любом месте атмосферы звезды однозначно определяется температурой и плотностью в этом же месте. В основе этого лежит разумное соображение, что газ в звездной атмосфере находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию с окружающей средой (так же, как и газ в земной атмосфере). Этот подход называют приближением локального термодинамического равновесия (ЛТР). Приближение ЛТР оказалось столь эффективным, что его широко используют в физике звезд до сих пор, на протяжении уже почти ста лет, хотя уже в 1930-х гг. стало ясно, что такой подход дает осечку при описании некоторых

спектральных линий. Причина кроется в том, что ионизация и возбуждение газа зависит не только от локальных процессов столкновений с другими частицами, но и от взаимодействия с излучением, которое во внешних слоях звезды может заметно отличаться от равновесного. Если это так, то состояние газа, которое в значительной степени зависит от излучения, будет также не вполне равновесным, а содержание элементов, полученное из анализа спектров, может оказаться ошибочным.

Отказ от приближения ЛТР значительно усложняет теорию формирования звездного спектра, поскольку для расчета ионизации атомов и возбуждения большого числа атомных уровней требуется теперь рассматривать колоссальное множество процессов столкновений атомов с частицами и фотонами. Для того, чтобы

рассчитать спектр с учетом отклонений от ЛТР, необходимо численно решить систему большого числа уравнений баланса частиц в разных состояниях атома совместно с уравнениями распространения излучения в атмосфере звезды. В решении таких задач астрофизики ИНАСАН являются признанными мировыми лидерами.

О том, насколько важно учитывать отклонения от ЛТР, можно судить на примере линий нейтрального кислорода и нейтрального углерода в атмосфере звезды π Cet с температурой поверхности 12800 К. При сравнении профилей, рассчитанных при приближении ЛТР и при отказе от ЛТР, с наблюдаемыми профилями мы обнаруживаем, что первая модель не объясняет наблюдаемые данные; тогда как модель (с учетом отклонений от ЛТР)

объясняет наблюдаемый спектр. Стоит заметить, что, используя методику ЛТР, невозможно согласовать теорию и наблюдения ни при какой величине содержания кислорода. Отказ от упрощающего предположения ЛТР позволяет полностью “снять проблему” и идеально воспроизвести наблюдаемые профили.

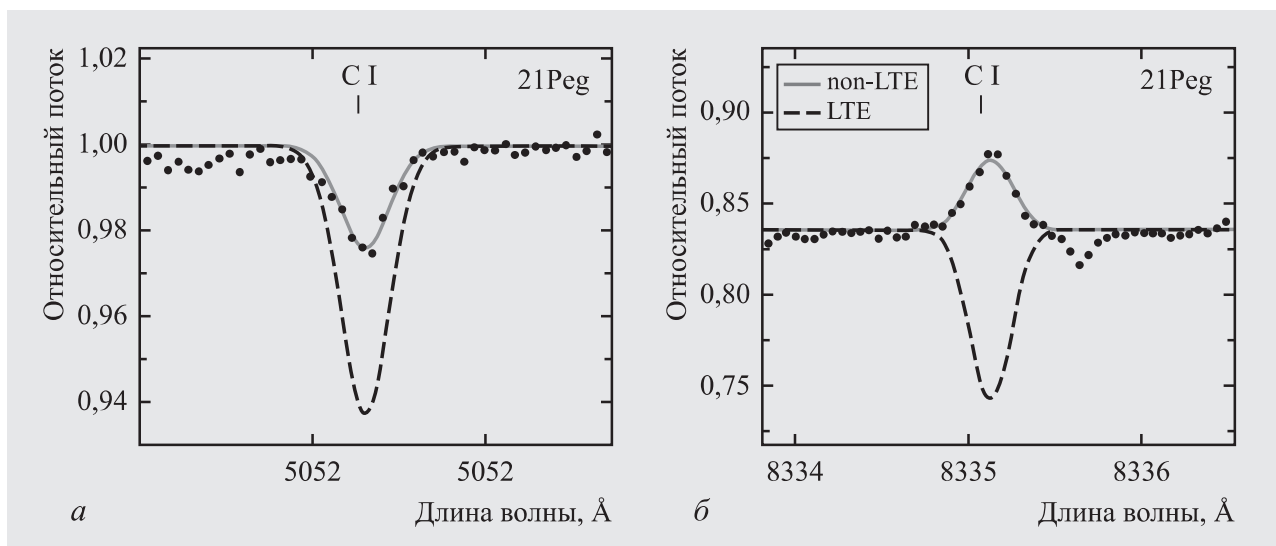
Еще более убедительный пример отклонения от ЛТР в звездах – присутствие эмиссионных линий нейтрального углерода в спектре звезды 21 Peg с температурой поверхности 10 400 К.

Профили абсорбционной линии C I 5052.17 Å а – и эмиссионной линии C I 8335.15 Å; б – в спектре звезды 21 Peg (кружки) в сравнении с теоретическими профилями, рассчитанными в рамках предположения ЛТР (штриховая кривая) и при отказе от этого приближения (сплошная кривая).

Теоретические линии, рассчитанные в рамках предположения ЛТР, – это всегда линии поглощения (независимо от длины волны, химического элемента и физических параметров атмосферы). В случае же звезды 21 Peg линия углерода 8335.15 Å оказывается не линией поглощения, а линией излучения. Воспроизвести ее профиль удалось только в модели, которая учитывает все многообразие процессов взаимодействия атомов углерода с полем излучения и окружающими частицами в атмосфере. Для сравнения: линия углерода 5052.17 Å в спектре той же звезды является линией поглощения. Но даже и в этом случае ЛТР-теория не может воспроизвести наблюдение: реальная величина поглощения меньше по сравнению с рассчитанной.

Роль отклонений от ЛТР возрастает при анализе спектров звезд

с очень низким содержанием металлов. Известно, что в ранней Вселенной (до того, как возникли первые звезды) химический состав вещества был крайне примитивен: водород (75%), гелий (25%) и мизерная примесь лития. Звезды – это та космическая “плавильная печь”, которая превратила небольшую часть (около процента) водорода посредством ядерных превращений в другие химические элементы. Обогащение вещества Вселенной новыми химическими элементами было постепенным: первое поколение звезд состояло из водорода и гелия, и это были массивные звезды, которые живут только три миллиона лет. В конце жизни они взорвались, как сверхновые звезды, и выбросили в пространство газ, обогащенный новыми химическими элементами. Он перемешался с окружающим газом, и из этой смеси родилось



второе поколение звезд, которое состояло уже не только из водорода и гелия, но включало и небольшую примесь тяжелых элементов: углерода, кислорода, азота, магния. Астрофизики называют все эти элементы “металлами”. В звездах второго поколения металлов было совсем немного – в 10–100 тыс. раз меньше, чем в солнечном веществе. Первые звезды “не дожили” до настоящего времени, а звезд второго поколения крайне мало в нашей Галактике. Тем не менее, такие звезды действительно есть, и они обнаружены. Их изучение позволяет судить о том, какими были первые сверхновые звезды, обогатившие галактический газ металлами, и как формировалась наша Галактика. Для этого, однако, требуется уметь надежно определять химический состав звезд с учетом весьма экзотических условий в их атмосферах. Дело в том, что в атмосфере звезды с очень низким содержанием металлов мало свободных электронов, поставляемых ионизацией металлов. Это ведет к уменьшению скорости столкновений атомов с электронами, а также к уменьшению поглощения ультрафиолетового излучения веществом звезды. Оба эффекта вызывают значительные отклонения состояния газа в атмосфере звезды от

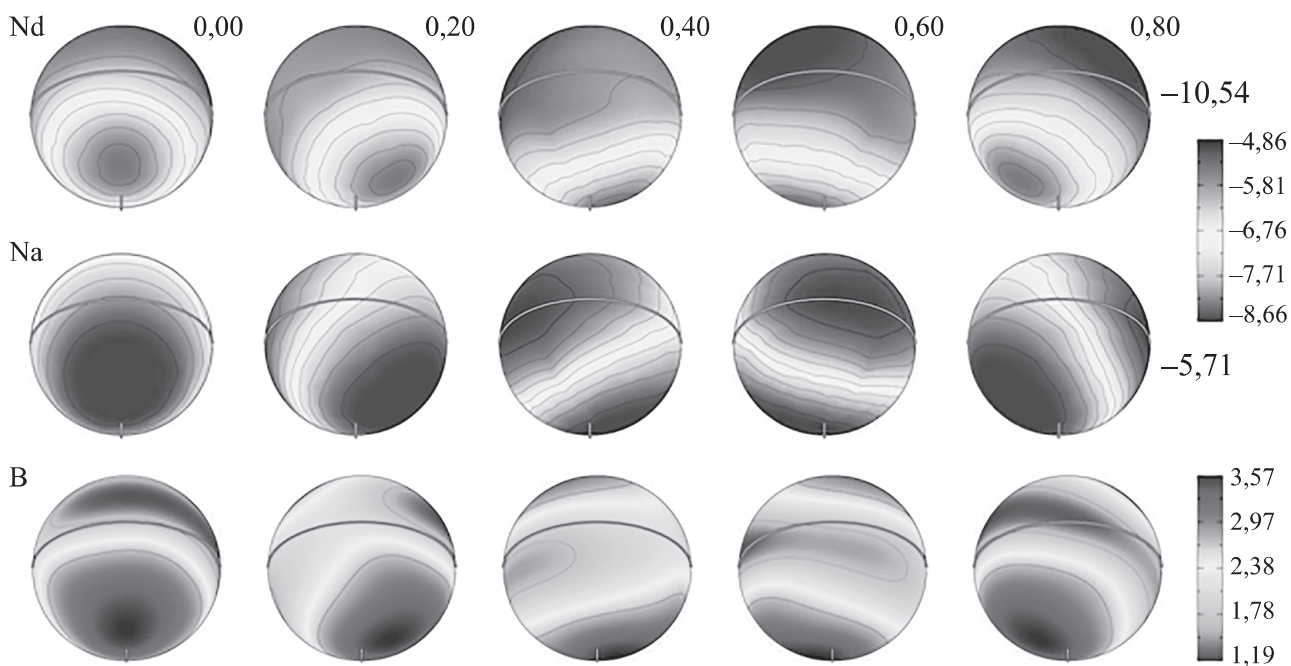
термодинамически равновесного. Моделирование спектров звезд с очень низким содержанием металлов показывает, что химический состав звездного вещества, полученный в приближении ЛТР, может значительно отличаться от того, который получается в строгой теории, учитывающей отклонения физических условий от ЛТР. Только теория (с учетом отклонений от ЛТР) может дать надежные сведения о начальных этапах химической эволюции нашей Галактики. Такие исследования интенсивно ведутся в ИНАСАН в настоящее время.

СМОТРИМ НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗВЕЗД И ЗОНДИРУЕМ ИХ АТМОСФЕРУ

То, что звезды – не вполне идеальные светящиеся шары с однородной поверхностью – хорошо известно на примере нашего Солнца: на его поверхности мы видим относительно холодные темные пятна. Подобные пятна (и даже гораздо больших размеров) есть на поверхности других звезд. В отличие от Солнца непосредственно увидеть детали на поверхности далекой звезды невозможно (кроме тех редких случаев, когда звезда является красным сверхгигантом и находится близко к нам как, например, в случае Бетельгейзе). И все

же поверхность звезды можно косвенно “рассмотреть”, используя методы спектрального анализа. Для этого нужно получить в наблюдениях последовательно ряд спектров вращающейся звезды. В этом случае пятна (если они есть) проявятся в виде меняющейся со временем формы профиля линии поглощения. Изменения происходят из-за того, что половина вращающейся звезды движется “на нас” (представьте вращающийся мяч), а другая половина – “от нас”. При наличии пятен это ведет к периодическим модуляциям профиля линии из-за эффекта Доплера. С помощью детального моделирования спектра такой звезды можно будет понять, где (относительно экватора вращающейся звезды) находится пятно и каковы его размеры (то есть, фактически получить карту звездной поверхности). Но спектральный анализ позволяет сделать и нечто более фантастическое: измерить содержание химических элементов в атмосфере звезды на разных высотах – иными словами, провести высотное зондирование состава атмосферы звезды. Как увидим ниже, содержание элементов в атмосферах некоторых звезд оказывается крайне неоднородным по высоте.

Среди обычных на первый взгляд звезд с температурами поверхности



Распределение химических элементов и напряженности магнитного поля по поверхности звезды HD24712. Цифрами сверху показаны фазы ее вращения в долях периода. Пятна повышенного содержания редкоземельного элемента Nd (верхний ряд) и щелочного металла Na (средний ряд) находятся на противоположных полюсах магнитного поля. Шкала относительного содержания элементов дана в виде логарифма отношения числа атомов данного элемента к полному числу всех атомов. Темный тон соответствует наибольшему содержанию, светлый – наименьшему. Числа справа – величины содержания Nd и Na в атмосфере Солнца. Шкала напряженности магнитного поля (нижний ряд) показана в килогауссах.

элементов. Такие звезды именуют магнитными химически пекулярными звездами (Ap-звездами, от англ. слова peculiar, что означает “необычный”). У большинства таких звезд напряженность магнитного поля периодически меняется, причем эти изменения сопровождаются, как правило, изменением (с тем же периодом) интенсивности линий поглощения элементов с аномально высоким содержанием. Переменность магнитного поля и интенсивности линий объясняет модель “наклонного ротатора”. Согласно ей, ось магнитного поля наклонена под некоторым углом к оси вращения звезды, а неоднородное распределение химических элементов по поверхности определяется геометрией магнитного поля. При вращении такой звезды

наблюдатель видит разные проекции дипольного поля и “пятен” с аномальным химическим составом. Оказалось, что содержание некоторых элементов (например, редкоземельных элементов, или лантаноидов) в пятнах может на порядки превышать их содержание в атмосфере Солнца и других нормальных звезд.

Основной причиной аномалий химического состава является диффузионное разделение элементов в атмосферах, которое возникает при совместном воздействии на ионы светового давления и гравитации: свет “выталкивает” элементы вверх, гравитация – “тянет” вниз. Свободному движению частиц под действием этих сил, конечно, мешают столкновения с другими частицами, в результате чего

7000–12 000 К выделяются звезды с сильными магнитными полями и аномально высоким содержанием некоторых

скорости дрейфа оказываются низкими, около одного сантиметра в год. По этой причине диффузионное разделение элементов наиболее эффективно в звездах со спокойными атмосферами: любые движения (конвекция или меридиональная циркуляция) “перемешивают” вещество, разрушая неоднородности химического состава, вызванные диффузионным разделением элементов. В звездах с температурами поверхности ниже 7000 К атмосферы конвективные (одно лишь излучение не успевает эффективно выносить тепло на поверхность), поэтому диффузионное разделение элементов неэффективно. В звездах с температурой поверхности 7000–12 000 К конвекции нет, но они, как правило, быстро вращаются. Это приводит к меридиональной циркуляции вещества звезды, что также разрушает диффузионное разделение элементов. Кроме того, спектральный анализ показывает, что в атмосферах этих звезд все же присутствуют турбулентные движения газа со скоростями 1–3 км/с. Это дополнительно препятствует диффузионному разделению элементов. Ар-звезды, наоборот, вращаются медленно, а детальный анализ их спектров свидетельствует об отсутствии турбулентных движений, которые невозможны из-за

сильного магнитного поля. Эти условия благоприятствуют высокой эффективности диффузионного разделения элементов, приводящего к аномалиям распределения химического состава как по глубине, так и по поверхности. Подчеркнем, что все аномалии образуются лишь в атмосфере и не отражают химического состава звезды в целом.

Высокая точность современных спектральных и спектрополяриметрических наблюдений в сочетании с вычислительной техникой позволяют восстанавливать распределение магнитного поля и химического состава на поверхности Ар-звезд – фактически получать карту поверхности звезды. Пионерские работы в этом направлении, названном доплер-зеemannовским картированием, были начаты астрофизиками ИНАСАН В.Л. Хохловой и Н.Е. Пискуновым (в сотрудничестве с математиками МГУ) и в дальнейшем развиты в работах Н.Е. Пискунова. Доплер-зеemannовское картирование поверхности звезд основано на уже упомянутом ранее изменении вида спектральных линий “пятнистой” вращающейся звезды. Оно выполнено для ряда Ар-звезд. Одним из наиболее изученных объектов является Ар-звезда HD24712. Картирование поверхности этой звезды осуществлено в

сотрудничестве с астрофизиками Упсальского университета (Швеция) на основе прецизионных спектро-поляриметрических наблюдений, полученных со спектрографом HARPS3.6-метрового телескопа Европейской Южной Обсерватории. Найденные распределения магнитного поля и ряда химических элементов имеют дипольную структуру. Это иллюстрируют карты распределения редкоземельного элемента Nd, щелочного металла Na и магнитного поля по поверхности HD24712.

Диффузионное разделение элементов в Ар-звездах создает слоистую структуру содержания элементов по высоте. Анализируя спектры этих звезд, удастся измерить содержание химических элементов на разных высотах в атмосфере, то есть провести высотное зондирование атмосферы. Такое исследование проведено, в частности, для той же звезды HD24712. Показанные на рисунке “срезы” атмосферы – результат детального моделирования спектров, выполненного совместно астрофизиками ИНАСАН и Упсальского университета. Содержание каждого из исследованных элементов значительно изменяется с высотой, причем по-разному: во внешних слоях вещество довольно обеднено кремнием (Si), кальцием

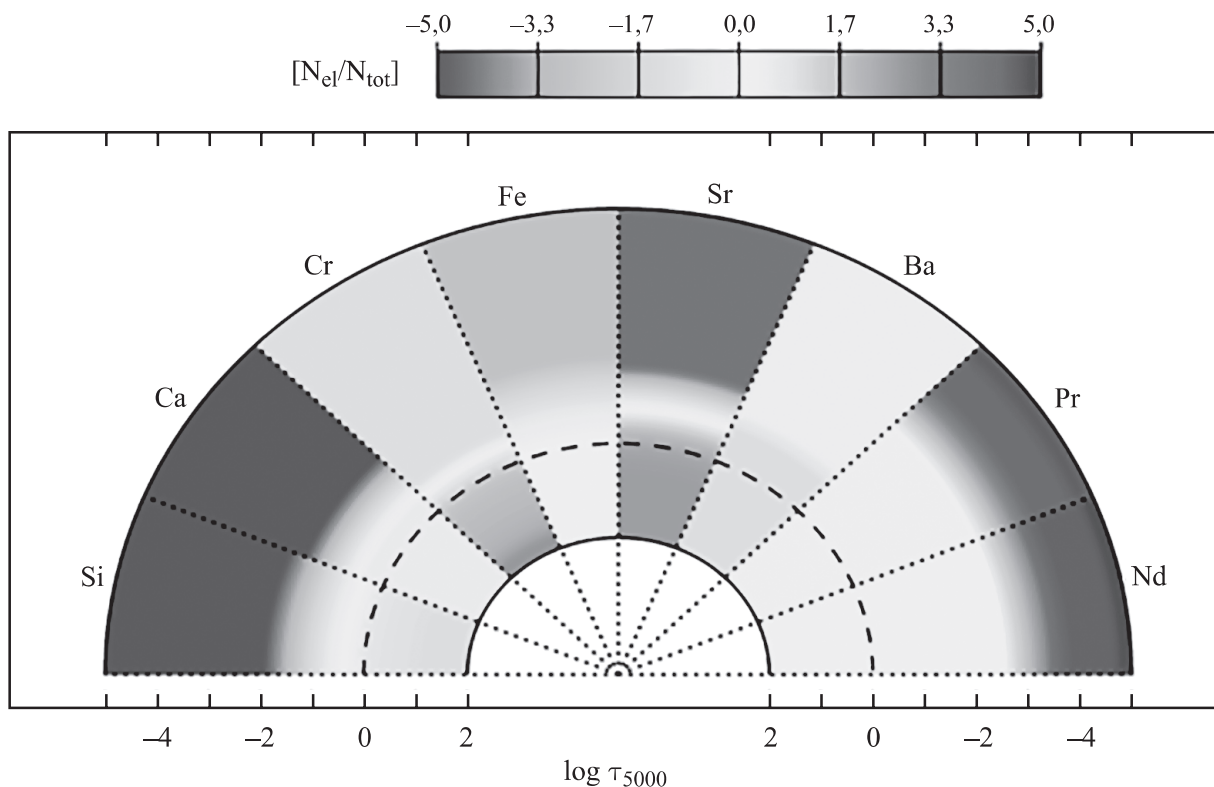


Диаграмма распределения химических элементов по глубине в атмосфере HD24712. Разными оттенками серого показано содержание элементов на логарифмической шкале относительно их содержания в атмосфере Солнца. В случае Pr и Nd темный цвет соответствует минимальному содержанию этих элементов, а в остальных случаях – максимальному. Штриховой линией показан уровень фотосферы.

Fe и Sr “тонут” в атмосфере звезды, тогда как Pr и Nd демонстрируют ярко выраженную способность к левитации. Разная способность элементов к образованию слоистого распределения их содержания по высоте определяется различной способностью атомов и ионов поглощать свет: ионы празеодима и неодима хорошо поглощают свет и поэтому более эффективно “выталкиваются” вверх.

КРИЗИС ИДЕНТИЧНОСТИ PZ ЕДИНОРОГА

Переменная звезда PZ Моп (созвездие Единорога) с небольшой амплитудой вариаций блеска (всего 0,05^m, то есть около 5% потока) более полувека считалась красным

карликом типа UV Cet на расстоянии около 20 пк. Поскольку звезда ничем особым не выделялась, то она наблюдалась крайне редко. В начале 1990-х гг. сотрудник Крымской астрофизической обсерватории Н.И. Бондарь собрала данные фотографических наблюдений PZ Моп за 100 лет и показала, что звезда медленно меняет блеск, с амплитудой около 1^m (поток меняется в 2,5 раза) с периодом около 50 лет. Колебания блеска с амплитудой 0,05^m оказались регулярными, с периодом 34 дня; эти вариации обусловлены вращением “пятнистой” звезды.

Неожиданное обстоятельство выявилось после измерения параллакса PZ Моп космической обсерваторией

(Ca), хромом (Cr), железом (Fe) и стронцием (Sr), и, наоборот, – содержание празеодима (Pr) и неодима (Nd) во внешнем слое на много порядков превышает солнечное (при том, что содержание этих элементов в глубине является нормальным). Иными словами, Si, Ca, Cr,

“Hipparcos”): оказалось, что звезда в действительности находится на расстоянии в интервале 400–1800 пк – гораздо дальше, чем предполагалось ранее, и, следовательно, она должна быть скорее гигантом, нежели карликом. Для того, чтобы внести ясность в вопрос о природе PZ Mon, астрофизиками ИНАСАН были получены спектры на 6-м телескопе БТА (САО РАН). Анализ спектров показал, что PZ Mon действительно является гигантом с массой около 1,5 солнечной, температурой поверхности 4700 К и скоростью вращения на экваторе 10,5 км/с. С учетом найденных характеристик гиганта удалось показать, что PZ Mon находится на расстоянии от нас около 250 пк. Данные о потоках излучения в разных диапазонах спектра и найденное расстояние позволили определить радиус PZ Mon, который оказался в 7,7 раз больше радиуса Солнца. Характеристики PZ Mon указывают на то, что ось вращения гиганта наклонена на 70° по отношению к лучу зрения: мы смотрим на эту звезду почти в экваториальной плоскости.

В спектре PZ Mon обнаружено излучение в линии водорода H_{α} и поглощение в линии гелия 5876 Å, – обе эти особенности характерны для звезд с высоким уровнем хромосферной активности. Этот факт согласуется

с данными ультрафиолетовых наблюдений на спутнике “IUE”, а также со значительным потоком рентгеновского излучения, зарегистрированного орбитальной рентгеновской обсерваторией “Einstein”. То и другое также являются признаками сильной хромосферной активности звезды. Звезды с данным типом активности имеют пятна наподобие солнечных, но занимающих гораздо большую долю поверхности. В случае PZ Mon-пятна покрывают около 20–30% поверхности (судя по полувековой вариации блеска с амплитудой 1^m). Переменность таких активных гигантов вызывается вращением пятнистой звезды и изменением уровня активности, то есть числа и площади пятен. Вращение звезды при максимальной разнице площади пятен на видимой и невидимой стороне звезды в 4% объясняет переменность блеска PZ Mon с периодом 34,13 сут и амплитудой 0,05^m, а медленное изменение уровня активности, аналогичное 11-летнему солнечному циклу, “отвечает” за полувековые изменения блеска на одну звездную величину.

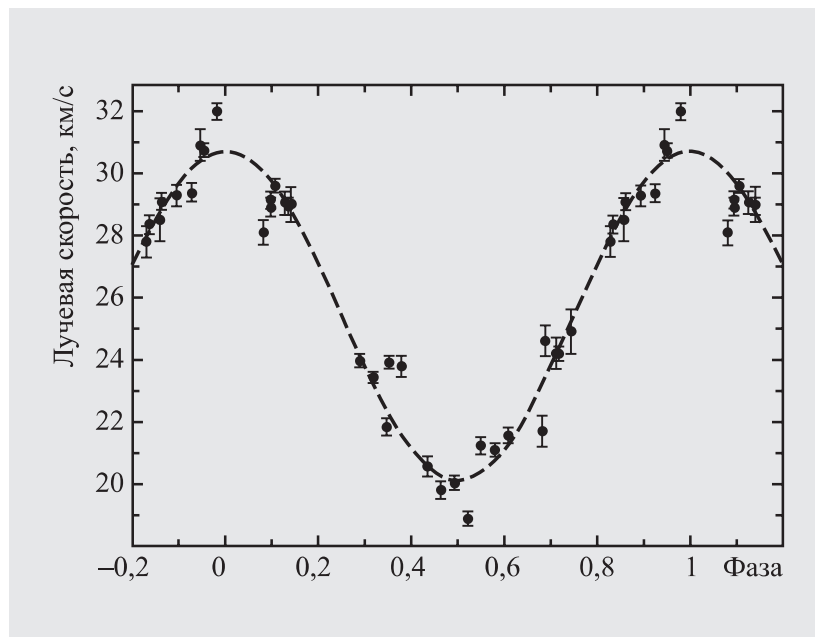
Звезды с хромосферной активностью и пятнистой поверхностью могут принадлежать к одной из двух разновидностей переменных звезд: BY Dra либо RS CVn. Во втором

случае звезда должна быть двойной. Для ответа на вопрос, не является ли PZ Mon двойной системой, была выполнена большая серия измерений лучевой скорости на 1-м телескопе (Симеиз, Крым). Если второй компонент существует, то это должно проявиться в переменности доплеровского смещения линий гиганта из-за орбитального движения. Такие изменения с амплитудой в 5,4 км/с и периодом 34,15 сут действительно были обнаружены. Это стало решающим аргументом в пользу того, что PZ Mon – двойная звезда типа RS CVn. Анализ лучевых скоростей свидетельствует о том, что второй компонент имеет небольшую массу: в 10 раз меньше, чем масса главного компонента. Любопытно, что отношение масс вторичного и главного компонентов системы PZ Mon является наименьшим среди всех известных звезд типа RS CVn: обычно в двойных системах этого класса компоненты имеют соизмеримые массы.

ПАРАДОКС СКОРОСТЕЙ НЕОБЫЧНЫХ СВЕРХНОВЫХ

Вспышка сверхновой сопровождается взрывом звезды с разлетом вещества со скоростями порядка 10 тыс. км/с и последующим мощным свечением длительностью от месяца до нескольких лет.

Наблюдаемые изменения лучевой скорости PZ Моп с периодом 34,15 дней (кружки). Штриховая линия показывает модель, дающую наилучшее согласие с наблюдениями. На горизонтальной оси указаны доли периода.



Скорости расширения оболочки определяют по ширине спектральных линий на основе эффекта Доплера. Подавляющее число сверхновых относится к одному из двух типов: сверхновые, порождаемые термоядерным взрывом углеродно-кислородного белого карлика (термоядерные сверхновые) и сверхновые, порождаемые гравитационным коллапсом ядер массивных звезд (гравитационные сверхновые). В нашей Галактике сверхновые не наблюдались, начиная с 1604 г.: все сверхновые, которые мы сейчас видим, находятся за пределами нашей Галактики. Благодаря использованию телескопов-роботов, темп обнаружения сверхновых за последние 20 лет вырос более, чем в 30 раз и сейчас составляет около 1000 сверхновых в год. По этой причине среди множества открываемых сверхновых все чаще сталкиваются с редкими, крайне необычными случаями.

Одна из таких необычных сверхновых — SN2011ht (запись означает, что сверхновая открыта в 2011 г., а “ht” указывает на порядковый номер события в том же году). Она светила как самые яркие гравитационные сверхновые, а оболочка (судя по линиям поглощения) расширялась с необычно низкой скоростью — около 600 км/с (против 3–10 тыс. км/с у обычных гравитационных сверхновых). Но самое интересное — что крылья спектральных линий излучения водорода одновременно указывают на высокие скорости расширения, достигающие 5000 км/с.

Объяснение парадокса скоростей предложено в ИНАСАН и состоит в том, что высокие доплеровские скорости в “крыльях” линий водорода не имеют никакого отношения к реальной скорости

расширения оболочки: она, действительно, низкая — 600 км/с. Присутствие широких “крыльев” связано с тем, что излучение рождается глубоко в оболочке и, прежде чем выйти на поверхность, фотоны испытывают многократные рассеяния на электронах. Средние тепловые скорости легких электронов велики — около 400 км/с — по сравнению с 10 км/с у атомов водорода. При каждом рассеянии на тепловом электроне фотон приобретает доплеровское смещение в “синюю” или “красную” сторону на величину порядка 400 км/с. После многократных рассеяний фотон может “уйти” по оси лучевых скоростей далеко от центра линии, на величину до 5000 км/с. Число рассеяний и, следовательно, смещение фотона от центра линии ограничено тем, что в процессе

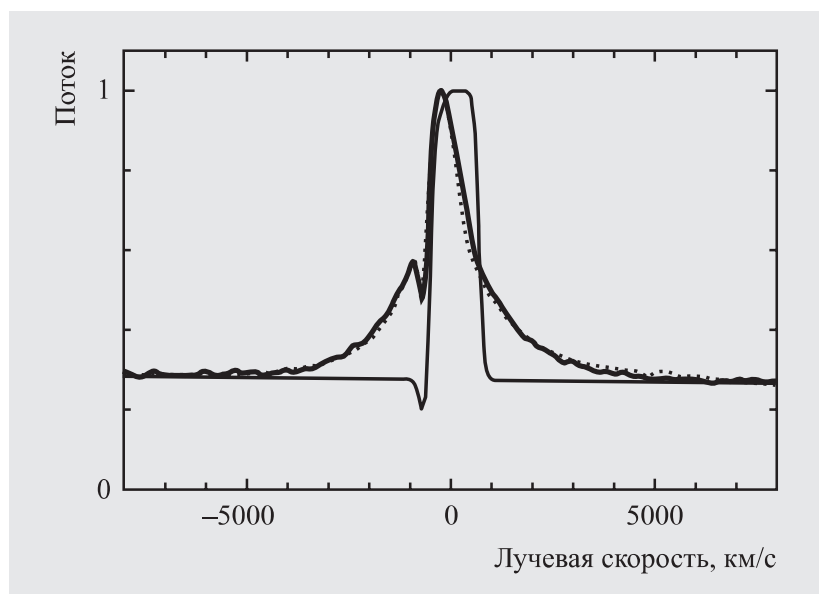


случайного блуждания фотон, перемещаясь в пространстве, подлетает к границе оболочки и, в конце концов, покидает ее. Таким образом, широкие “крылья” линии – лишь имитация высокой скорости расширения оболочки, которая на самом деле мала.

Необычность спектра, низкая скорость расширения и высокая светимость сверхновой SN2011ht связаны с тем, что в данном случае произошло столкновение оболочки

сверхновой с очень массивной околозвездной оболочкой, “сброшенной” незадолго (за год–три) до взрыва сверхновой. Энергия взрыва сверхновой была на порядок меньше, чем у обычных гравитационных сверхновых, что и объясняет низкую скорость расширения. Высокая светимость сверхновой – не результат самого взрыва, а следствие столкновения оболочки сверхновой с околозвездным веществом. Эффективность переработки

Двойная система PZ Mon, состоящая из красного гиганта и карликовой звезды. Холодные пятна на поверхности гиганта показаны темным оттенком. Круглое пятнышко справа – карликовая звезда-спутник в масштабе.



Профиль спектральной линии H_{α} в сверхновой SN2011ht на 38-й день. Спектр (пунктир) получен американскими астрофизиками (Мауэрхан и др., 2013). На горизонтальной оси отложены лучевые скорости, которые соответствуют доплеровскому смещению длины волны относительно нулевого (несмещенного) положения. Модельный профиль с учетом рассеяния фотонов на электронах (тонкая линия) сравнивается с наблюдаемым профилем (пунктир). Толстая линия – модельный профиль линии без учета рассеяния фотонов на электронах. Огромное отличие одного модельного профиля от другого подчеркивает большую роль рассеяния фотонов на электронах и одновременно указывает на то, что модель отражает физику явления.

кинетической энергии в “выходящее излучение” при этом оказывается гораздо выше, чем при взрыве обычной сверхновой. Рассмотренный случай иллюстрирует типичную ситуацию в науке, когда кажущийся парадокс (в данном случае парадокс скоростей) становится ключом к новому знанию.

Приведенные примеры показывают, сколь эффективны методы современной спектроскопии в получении новых знаний о звездах различных типов. Конечно, прогресс в этой области немалым без больших телескопов, чувствительных

детекторов света и мощных вычислительных средств. Мы, однако, не упомянули о чрезвычайно важной составляющей успеха спектроскопии – об “атомных данных”, которые получают в результате экспериментальных исследований и квантово-механических расчетов столкновений частиц и взаимодействия фотонов с ионами. Без качественных “атомных данных” возможности спектроскопии были бы крайне ограничены. Принимая это во внимание, сотрудники ИНАСАН (совместно с европейскими коллегами) создали обширную базу атомных данных

VALD, которая непрерывно пополняется и уточняется в процессе астрофизических исследований. Спектроскопическое исследование холодных звезд приводит к необходимости включить в модель не только данные об атомах и ионах, но и о молекулах. Это побудило европейских исследователей (с участием астрофизиков ИНАСАН) реализовать проект VAMDC. Он обеспечивает пользователям доступ в унифицированном формате к уже существующим базам “атомных и молекулярных данных” в архивах различных исследовательских центров.