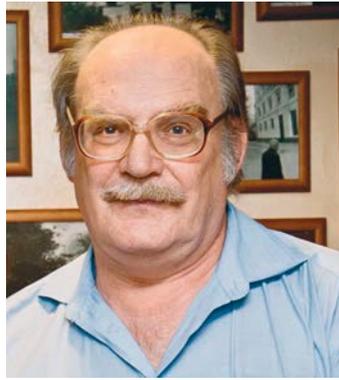


## Звезды типа Т Тельца

С.А. ЛАМЗИН,  
доктор физико-математических наук  
ГАИШ МГУ

---



**В статье рассказано об объектах, изучение которых позволяет понять, как происходило формирование звезд, подобных Солнцу, и их планетных систем.**

### ОТ ПРОТОЗВЕЗДНОГО ОБЛАКА К ЗВЕЗДЕ

Астрономические наблюдения показывают, что звезды рождаются, главным образом, группами из межзвездного вещества внутри молекулярных облаков, масса которых в нашей Галактике варьируется от нескольких десятков до нескольких миллионов солнечных масс ( $M_{\odot}$ ). С течением времени внутри молекулярных облаков образуются уплотнения, которые затем распадаются на

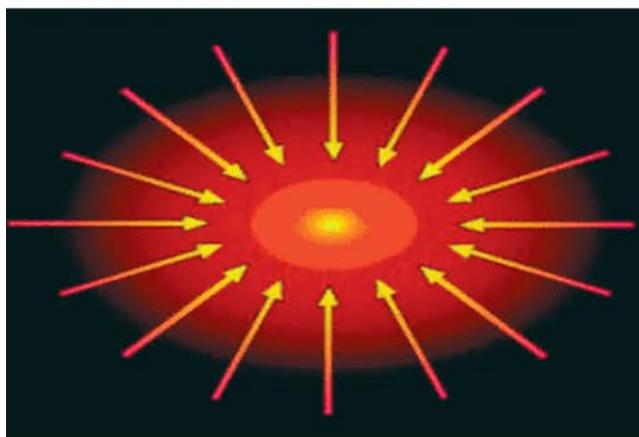
отдельные протозвездные облака-сгустки с массой порядка нескольких  $M_{\odot}$ . По тем или иным причинам в них нарушается механическое (гидростатическое) равновесие между силами тяготения, сжимающими облако, и давлением газа, которое, наоборот, стремится его расширить. Если тяготение побеждает – облако начинает стремительно сжиматься, причем его центральные области уплотняются и нагреваются гораздо быстрее, чем внешние. В какой-то

момент в центральной части облака восстанавливается механическое равновесие и образуется гидростатически равновесное ядро, содержащее примерно 1% массы облака. С течением времени масса этого ядра увеличивается за счет падающего на него (аккрецируемого) вещества внешних частей облака. Такой объект принято называть протозвездой. Исследовать протозвезды можно только в инфракрасном и радиодиапазонах, поскольку для более коротковолнового

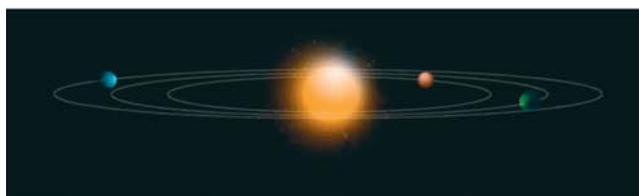
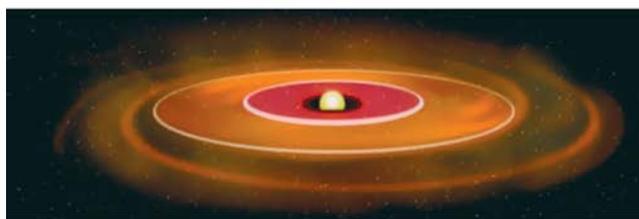
Схематическое изображение процесса образования звезды солнечного типа с планетной системой. Сверху вниз: протозвездное облако (глобула V68), сжимающаяся протозвезда, молодая звезда с протопланетным диском, звезда Главной последовательности с планетной системой. Размеры областей, которые показаны на расположенных друг под другом фрагментах рисунка, отличаются примерно в 30 раз.



излучения внешние слои облака непрозрачны, и протозвездное облако выглядит как “дыра в небе”, поглощая свет находящихся за ним звезд. Но в какой-то момент масса и непрозрачность аккрецируемой оболочки уменьшаются настолько, что ядро становится видимым и в оптическом диапазоне: протозвезда превращается в молодую звезду.



Из теории и наблюдений следует, что протозвездные облака медленно вращаются вокруг своей оси, то есть имеют ненулевой момент импульса. В процессе сжатия, в соответствии с законом сохранения момента импульса, угловая скорость вращения облака увеличивается. Вследствие этого нарастает центробежная сила, которая растягивает облако в направлении, перпендикулярном оси вращения, в результате



чего оно, по мере сжатия, становится все более и более сплюснутым, эллипсоидальным. Если протозвездное

облако вращалось не слишком быстро, то в итоге оно превратится в одиночную молодую звезду, окруженную

газопылевым диском. Масса диска много меньше массы звезды, но именно в нем оказывается сосредоточенным почти весь момент импульса протозвездного облака. Из вещества этих дисков впоследствии формируются планетные системы, поэтому диски вокруг молодых звезд называют протопланетными. Напомним, что свыше 90% всего момента импульса Солнечной системы заключено в орбитальном движении Юпитера и Сатурна.

Если же исходный угловой момент протозвездного облака был достаточно большим, то в какой-то момент центробежные силы должны разорвать облако как минимум на две части, которые будут вращаться вокруг общего центра масс. В результате основная часть момента импульса окажется связанной с орбитальным движением фрагментов, что уменьшит величину центробежной силы на экваторе каждого из них и позволит им продолжить сжатие. При таком развитии событий сформируется двойная или кратная система молодых звезд, возможно, окруженная общим диском.

Звезды типа Т Тельца – это и есть молодые

звезды с возрастом 0,5–10 млн лет, массой 0,08–3  $M_{\odot}$ . Большую массу имеют молодые звезды, называемые звездами Ae/Be Хербига, а меньшую – коричневые карлики. Но мы будем говорить только о звездах типа Т Тельца, ибо “нельзя объять необъятное”. Впрочем, у всех этих молодых объектов есть общее свойство: температура в их центральных областях слишком низка для того, чтобы там достаточно интенсивно могли протекать термоядерные реакции превращения водорода в гелий; поэтому они вынуждены сжиматься. Совершаемая при этом силами тяготения работа превращается в тепловую энергию, половина которой уносится излучением с поверхности в окружающее пространство, а другая расходуется на нагрев внутренних областей<sup>1</sup>. У звезд типа Т Тельца и Ae/Be Хербига температура в центральной области в итоге оказывается достаточно высокой для того, чтобы водород начал превращаться в гелий в количествах, необходимых для поддержания светимости звезды, и молодые звезды становятся “взрослыми” звездами Главной последовательности. У коричневых карликов

термоядерное “горение” водорода никогда не сможет полностью поддерживать их светимость, и они будут сжиматься практически вечно.

Для того, чтобы достигнуть начальной Главной последовательности, молодой звезде с массой 1  $M_{\odot}$  требуется около 30 млн лет, а менее массивным – еще больше. Поэтому звезды типа Т Тельца – это самые “юные” представители молодых сжимающихся звезд в указанном диапазоне масс, и позже мы поймем, с чем это связано. Сжимаются звезды Т Тельца очень медленно – за год их радиус уменьшается менее чем на 0,001%, поэтому в каждый момент времени они, как и “взрослые” звезды (например, Солнце), находятся в состоянии гидростатического равновесия.

Изучение звезд типа Т Тельца позволяет понять, как происходило формирование нашей Солнечной системы. Кроме того, многие из этих звезд находятся от нас довольно близко (например, до звезды TW Нуа – менее 60 пк), что позволяет детально изучить, как происходит взаимодействие их магнитного поля с околос звездным веществом, что весьма важно для понимания

<sup>1</sup> Строго говоря, в недрах таких звезд тепло выделяется еще и при ядерном “горении” дейтерия и лития, однако этих элементов в межзвездной среде так мало, что на эволюцию молодых звезд этот источник энергии почти не влияет.

Область неба в созвездии Тельца размером около 7 св. лет, в центре которой расположена звезда Т Тельца – прототип одноименного класса молодых звезд. Звезда и окружающая ее туманность Хинда (NGC 1555) – остаток родительского облака, удалены от нас на расстояние около 450 св. лет и находятся на переднем крае невидимого в оптическом диапазоне гигантского молекулярного облака. Снимок сделан Б. Снайдером в Обсерватории Сьерра Реноут (США).

---



аналогичных явлений у “взрослых” звезд.

#### НЕМНОГО ИСТОРИИ

С наблюдательной точки зрения, звезды типа Т Тельца – объекты поздних спектральных классов (от F до M), расположенные либо в газопылевых комплексах, либо неподалеку от них. Сейчас обнаружено более двух тысяч звезд этого типа, хотя сколь-нибудь подробно изучена лишь пара сотен. На диаграмме Герцшпрунга–Рассела интересующие нас объекты располагаются над Главной последовательностью, между Ae/Be звездами Хербига и коричневыми карликами.

Хаотическая переменность блеска многих из них была давно известна астрономам, и они в разное время называли их то орионовыми переменными, то звездами типа RW Возничего. В частности, переменность блеска самой Т Тау была обнаружена еще 150 лет назад. Но в 1945 г. американский астроном Альфред Джой пришел к выводу, что причины изменения блеска орионовых переменных могут быть очень разными, и в данном случае классификация по характеру переменности не имеет астрофизических оснований. Из числа орионовых переменных А. Джой выделил группу звезд, которую назвал звездами типа Т Тельца, осно-

вываясь на сходстве их спектров, а не кривых блеска. В качестве критериев принадлежности к новому классу он рассматривал следующие особенности спектров звезд:

- наличие эмиссионных линий водорода и ионизованного кальция;
- большая глубина линии поглощения лития LiI ( $\lambda = 6708 \text{ \AA}$ );
- глубина линий поглощения других атомов и ионов должна быть заметно меньше, чем у звезд главной последовательности тех же спектральных классов.

А. Джой предположил, что эффект “вуалирования” абсорбционных линий обусловлен тем, что на спектр звезды “накладывается”

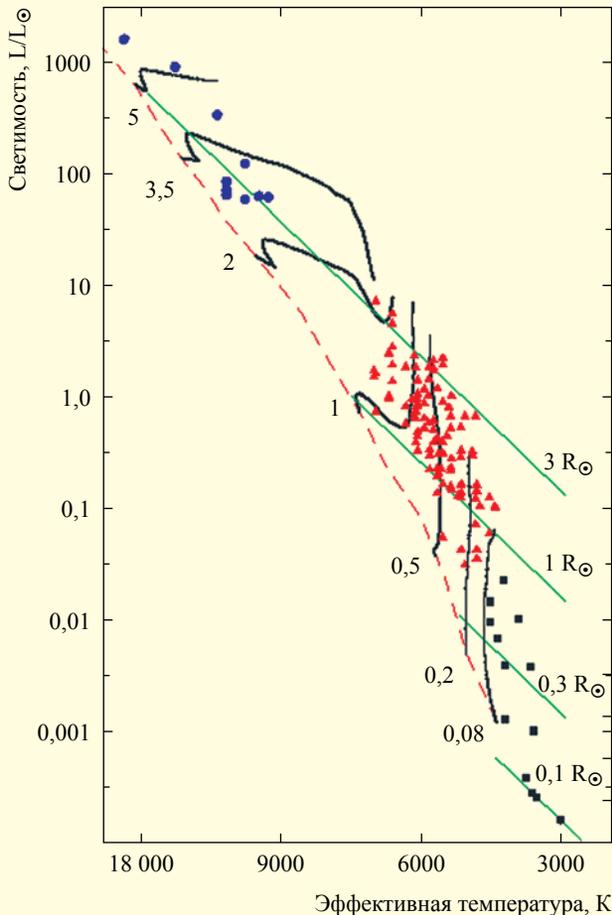


Диаграмма Герцшпрунга–Рассела для молодых звездных объектов. Жирные линии – эволюционные треки молодых звезд разной массы (указаны в  $M_{\odot}$  у каждой кривой) вплоть до начальной Главной последовательности (обозначена красной штриховой линией). Синими кружками показано наблюдаемое положение Ae/Be звезд Хербига, красными треугольниками – звезд типа Т Тельца, а черными квадратами – коричневых карликов; зеленые прямые – линии одинакового радиуса.

понят довольно быстро. В конце 1940-х гг. советский астрофизик В.А. Амбарцумян на основе звездно-динамических расчетов пришел к выводу, что эти звезды должны быть молодыми. На это также указывала близость звезд Т Тельца к темным туманностям, а также большая глубина линии лития в их спектрах, что свидетельствовало о довольно большом (сравнимом с межзвездным) обилии этого элемента, который “выгорает” к моменту, когда звезда “приходит” на Главную последовательность. Например, в атмосфере Солнца лития всего в 2–3 раза больше, чем урана, а в центре Солнца лития нет совсем. Окончательно “молодость” звезд Т Тельца подтвердили расчеты японского астрофизика Ч. Хаяши

дополнительное излучение в непрерывном спектре – эмиссионный континуум, который формируется там же, где эмиссионные линии. Большой вклад в последующее изучение молодых звезд внес американский астрофизик Дж. Хербиг, который не только открыл и исследовал много новых звезд Т Тельца, но и нашел их более массивных

собратьев – теперь их называют Ae/Be звездами Хербига. Кроме того, он вместе с мексиканским астрономом Г. Аро обнаружил в окрестностях молодых звезд компактные туманности (объекты Хербига–Аро), которые излучали энергию без видимой подпитки извне и перемещались в пространстве, меняя свою форму.

Эволюционный статус звезд типа Т Тельца был

с коллегами: рассчитанные ими эволюционные треки молодых звезд проходили как раз через ту область диаграммы Герцшпрунга–Рассела, в которой располагаются звезды типа Т Тельца.

Еще А. Джой отметил, что спектры исследованных им звезд напоминают спектр хромосферы Солнца во время полного солнечного затмения. Отсюда возникла идея объяснить наблюдаемую эмиссию в линиях и континууме наличием у этих звезд хромосфер и корон, аналогичных солнечным, но гораздо более мощных, что казалось весьма естественным. Действительно, поверхностные конвективные зоны у звезд типа Т Тельца переносят гораздо больше энергии, чем в случае Солнца, и вращаются эти звезды вокруг своей оси в несколько раз быстрее, чем наше светило. А как раз от этих факторов зависит, насколько сильным будет магнитное поле звезды и сколь интенсивно это поле будет взаимодействовать с ее атмосферой, что в конечном счете проявляется как хромосферно-корональная активность.

В начале 1960-х гг. американский астрофизик Л. Кухи обнаружил, что эмиссионные линии водорода в спектрах наиболее активных звезд Т Тельца формируются не в статических хромосферах,

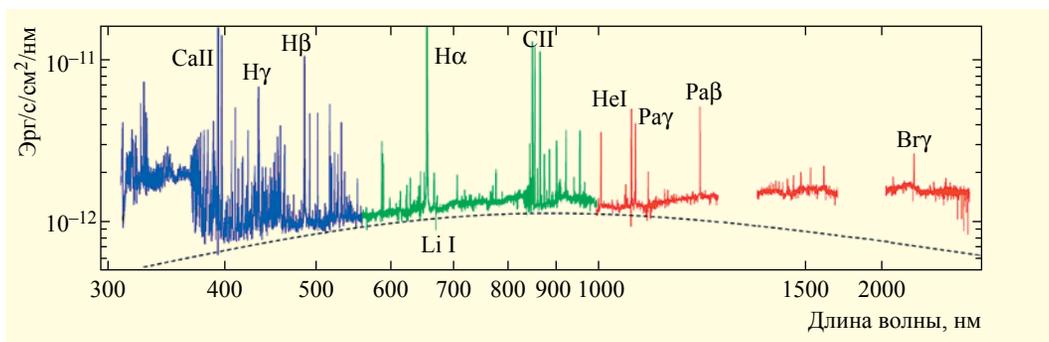
а в улетающем от звезды газе – звездном ветре. По оценке Л. Кухи, характерная скорость движения газа в ветре составляет 300 км/с, уносит этот ветер в окружающее пространство до  $10^{-8} M_{\odot}$  в год, то есть в миллион раз больше, чем солнечный ветер. В следующем десятилетии у звезд Т Тельца было обнаружено рентгеновское излучение, мощность которого в тысячи раз превышала рентгеновскую светимость Солнца.

Сначала казалось, что эти факты подтверждают хромосферно-корональную природу активности этих звезд, однако попытки количественно объяснить весь комплекс наблюдаемых явлений оказались безуспешными. Между тем в 1974 г. английские астрофизики Д. Линден-Белл и П. Прингл предположили, что активность звезд Т Тельца обусловлена совсем другим механизмом – аккрецией вещества окружающего их газопылевого диска, который, как мы видели, должен формироваться вокруг молодой звезды в процессе ее рождения. В пользу того, что вокруг звезд Т Тельца имеются сильно сплюснутые пылевые оболочки, свидетельствовали и наблюдения. Пожалуй, главным аргументом было то, что мощность излучения многих молодых звезд в инфракрасном

диапазоне намного больше, чем у звезд главной последовательности тех же спектральных классов. Проще всего этот факт объяснялся наличием в окрестности молодых звезд пылинок, которые поглощают оптическое излучение звезды и переизлучают его в ИК-диапазоне. Но заметное ослабление оптического излучения наблюдается у сравнительно небольшого числа объектов, следовательно – не сферические (иначе поглощение наблюдалось бы у всех звезд), а сильно сплюснутые.

На протяжении 1980-х гг. накапливались наблюдательные факты, говорившие в пользу как хромосферно-корональной, так и аккреционной гипотезы. К началу 1990-х гг. стало ясно, что правы сторонники и той, и другой точек зрения; просто у одних звезд преобладает активность, обусловленная аккрецией, а у других – наличие мощных хромосфер и корон.

Самая сильная эмиссионная линия в оптических спектрах звезд типа Т Тельца – линия водорода  $H_{\alpha}$  ( $\lambda = 6563 \text{ \AA}$ ), которая может служить индикатором активности этих объектов: чем она интенсивней – тем больше в спектре звезды наблюдается эмиссионных линий как самого водорода, так и других элементов, и тем сильней



Спектр RU Волка – классической звезды Т Тельца – полученный со спектрографа X-SHOOTER на 8-м телескопе VLT Европейской Южной Обсерватории в трех диапазонах, показанных кривыми разного цвета. Разрывы в инфракрасной части спектра – окна непрозрачности земной атмосферы. Отмечено положение наиболее интенсивных эмиссионных линий и абсорбционной линии Li I 6708 Å. Для сравнения штриховой линией показано распределение энергии в континууме звезды Главной последовательности с такой же эффективной температурой, как и у RU Волка.

дополнительная эмиссия в оптическом, ультрафиолетовом и инфракрасном континуумах. По предложению французского астрофизика К. Берту, звезды типа Т Тельца, у которых эквивалентная ширина<sup>2</sup> линии  $H_{\alpha}$  превышает 5–10 Å, стали называть классическими, а остальные – звездами со слабыми линиями. Ниже мы увидим, что у классических звезд главным образом наблюдаются последствия аккреции, а у звезд со слабыми линиями – проявления мощных хромосфер и корон.

#### КЛАССИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДЫ Т ТЕЛЬЦА

За последнюю четверть века удалось окончательно убедиться в том,

что классические звезды Т Тельца окружены газопылевыми дисками: надежно определены их параметры, получены достаточно детальные радиоинтерферометрические изображения некоторых из них. Оказалось, что массы протопланетных дисков, как правило, не превышают несколько сотых  $M_{\odot}$ , а размеры варьируются от нескольких десятков до нескольких сотен астрономических единиц. В поперечном сечении, проходящем через ось их вращения, диски одиночных звезд имеют почти треугольную форму.

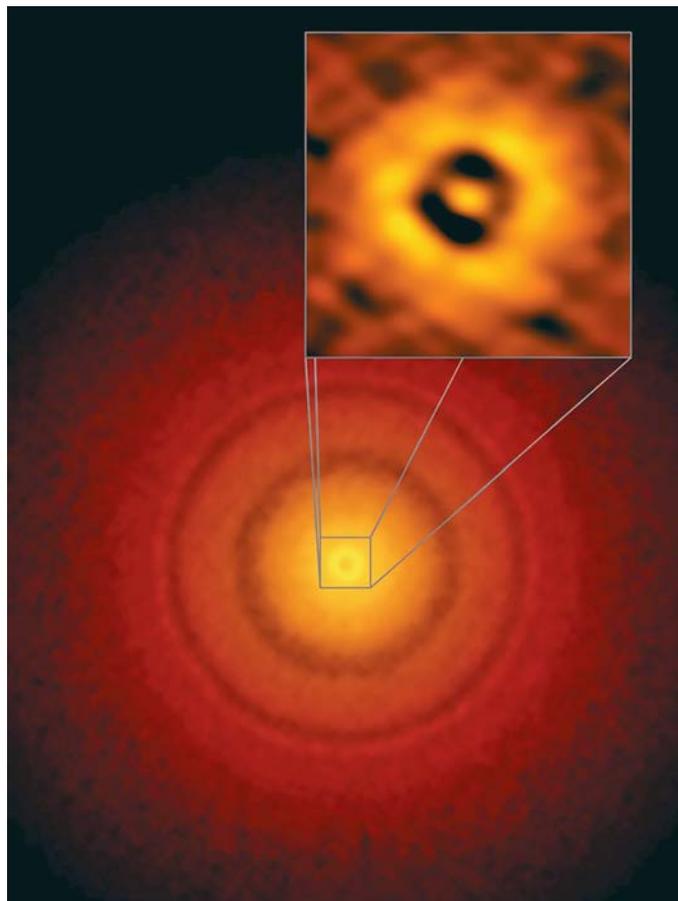
Анализ профилей спектральных линий атомов и молекул, которые возникают в диске, показал, что, по мере

удаления от звезды, угловая скорость вращения диска уменьшается. Из-за этого между соседними слоями диска возникает трение, которое “тормозит” газ, вынуждая его по спирали приближаться к звезде. Тепло, выделяющееся при трении, нагревает вещество диска, в результате чего его температура вблизи центральной плоскости растет от нескольких десятков кельвинов на внешней границе до нескольких тысяч вблизи звезды. Другой источник нагрева диска – излучение центральной звезды. Но если трение нагревает газ (причем, главным образом, вблизи центральной плоскости), то излучение звезды поглощают,

<sup>2</sup> Эквивалентной шириной линии называют ширину полосы близлежащего континуума, в которой излучается столько же энергии, сколько в самой линии.

*Протопланетный диск молодой звезды TW Гидры. Темные концентрические кольца и темное пятно вблизи звезды – области с пониженной концентрацией вещества, которое, по-видимому, вошло в состав формирующихся планет. Изображение получено в субмиллиметровом диапазоне с помощью радиоинтерферометра ALMA (NRAO) в Чили. Фото С. Эндриус (Гарвард-Смитсоновская обсерватория), ESO/NAOJ/NRAO.*

в основном, пылинки, расположенные ниже и выше этой плоскости, – в атмосфере диска. Поэтому для того, чтобы рассчитать распределение температуры по диску (а затем и спектр его излучения), необходимо учитывать обмен тепла между газом и пылинками как вдоль радиуса диска, так и в перпендикулярном направлении. Чтобы решить эту задачу, приходится делать предположения о физико-химических свойствах пылинок и распределении их по размерам, зато сравнение расчетных спектров в ИК-диапазоне с наблюдаемыми дает возможность получить информацию об этих параметрах. В частности, было установлено, что с течением времени более крупные пылинки



оседают к центральной плоскости диска. Это увеличивает вероятность их столкновения и слипания, что запускает процесс формирования зародышей планет.

Из наблюдений следует, что у классических звезд типа Т Тельца есть глобальное магнитное поле, индукция которого в полярных областях некоторых звезд превышает 5000 Гс. Для

сравнения напомним, что индукция глобального магнитного поля Солнца (и Земли) – порядка 1 Гс, и лишь в солнечных пятнах встречаются поля с индукцией  $\approx 1000$  Гс. Как известно, плазма (ионизованный газ) – диамагнетик, а это значит, что магнитное поле должно препятствовать ее проникновению в область, которую оно занимает<sup>3</sup>. По этой причине

<sup>3</sup> Еще М. Фарадей обнаружил, что пламя свечи “выталкивается” из промежутка между полюсами достаточно сильного магнита. Можно посмотреть видеозапись соответствующего эксперимента, пройдя по ссылке: <https://www.youtube.com/watch?v=nhg8vG9vBK0>.

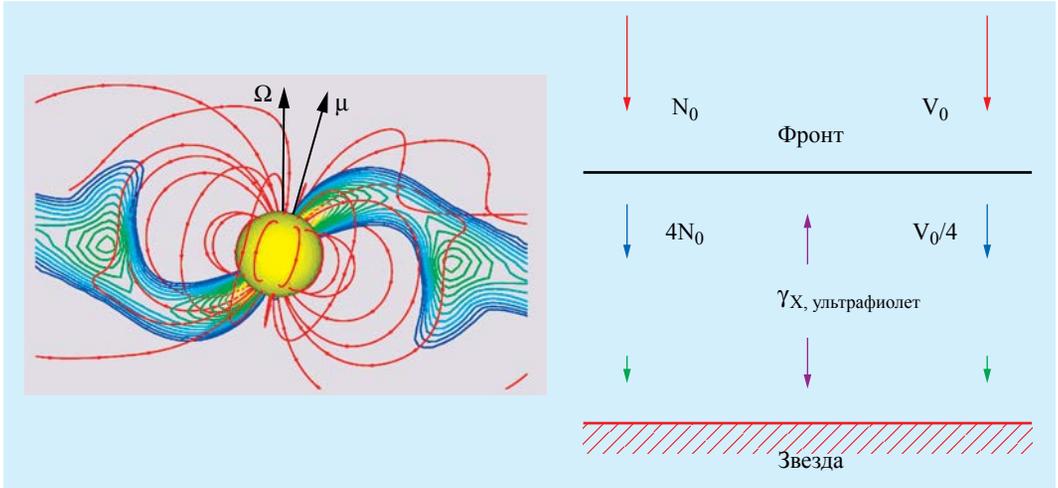


Схема процесса магнитосферной аккреции на звезду типа Т Тельца. Слева – область взаимодействия магнитного поля звезды с протопланетным диском в разрезе (синие и зеленые линии в диске соединяют в точки с одинаковой плотностью газа). Ось вращения звезды  $\Omega$  наклонена к оси магнитного поля  $\mu$ , силовые линии которого показаны красным цветом (рисунок с сайта М.М. Романовой). Справа – строение аккреционной ударной волны. Пересекая фронт, падающий газ нагревается, а затем его тепловая энергия уносится квантами рентгеновского и УФ-излучений, половина которых движется к звезде, а половина – от звезды.

сильное глобальное магнитное поле молодой звезды останавливает спиральное падение вещества диска на расстоянии нескольких радиусов от поверхности звезды. Однако удержать плазму магнитным полем очень трудно (иначе термоядерные реакторы уже давно были бы построены), и она в виде отдельных сгустков все-таки проникает внутрь запретной области, называемую магнитосферой, а затем, пользуясь терминологией астрофизиков, “вмораживается” в силовые линии магнитного поля звезды и “соскальзывает” вдоль них к ее поверхности. Сила

тяготения разгоняет падающее вещество до скорости около 300 км/с, что раз в 30 превышает скорость распространения в нем звуковых волн; поэтому в области, где аккреционный поток сталкивается с атмосферой звезды, возникает ударная волна.

Поясним, о чем идет речь. Если пассажир эскалатора, лента которого движется вниз со скоростью  $V_0$ , хочет подняться по нему вверх, то он должен бежать вверх по ленте со скоростью  $V > V_0$ , иначе со скоростью  $V_0 - V$  он будет смещаться вниз. Теперь рассмотрим струю движущегося газа, на пути

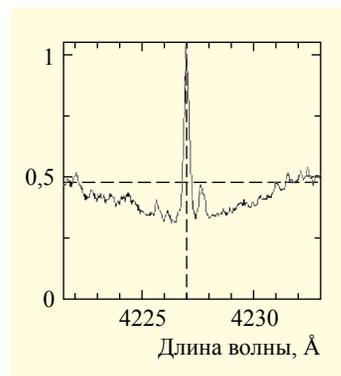
которой вдруг появилось препятствие: в области столкновения резко повысится плотность и давление газа, и от этого места во все стороны побегут звуковые волны, которые переносит по газу информацию об изменении давления. Из аналогии с эскалатором ясно, что если скорость струи будет меньше скорости звука, то волны смогут удаляться от области столкновения и “предупреждать” еще не дошедший до препятствия газ о возможности столкновения. Это позволит давлению в газе перераспределиться таким образом, чтобы он в дальнейшем плавно

обтекал препятствие. Но если струя движется со сверхзвуковой скоростью, то звуковые волны не смогут удалиться от области столкновения, поскольку будут сноситься потоком газа, подобно медленно бегущему пассажиру эскалатора. Следовательно, столкновение с препятствием будет неожиданным для всех частей струи, и в области столкновения сохранится скачок плотности и давления – ударная волна.

На фронте ударной волны, который у молодых звезд представляет собой слой толщиной около 1 м, скорость газа  $V_0$  падает в четыре раза, плотность  $N_0$  вчетверо возрастает, а температура увеличивается до величины  $\sim 10^6$  К за счет превращения примерно 94% кинетической энергии направленного движения газа в тепло (в кинетическую энергию хаотического движения атомов). За фронтом газ остывает и, постепенно уменьшая свою скорость, оседает на звезду. Тепловая энергия остывающего газа уносится квантами мягкого рентгеновского (до 1 кэВ) и УФ-диапазонов, половина которых летит по направлению к звезде и поглощается верхними слоями ее атмосферы. В результате на

поверхности звезды образуется горячее пятно<sup>4</sup>, эффективная температура которого может на несколько тысяч градусов превышать эффективную температуру звезды: насколько именно зависит от плотности и скорости падающего газа перед фронтом ударной волны.

Еще совсем недавно считалось, что горячее пятно излучает только в континууме, который называли вуалирующим, полагая, что его добавка к излучению молодой звезды уменьшает глубину линий поглощения в наблюдаемом спектре, по сравнению со спектрами звезд Главной последовательности с такой же эффективной температурой. Однако из расчетов, выполненных молодым российским астрофизиком А.В. Додиним, следует, что значительную долю энергии горячее пятно излучает в эмиссионных линиях, причем почти в тех же самых, в которых у звезды без пятна наблюдались бы линии поглощения. Вследствие этого в наблюдаемом спектре системы “звезда + горячее пятно” линии излучения пятна накладываются на линии поглощения звезды и, наряду с вуалирующим континуумом, уменьшают их глубину. Как правило, ширина



*Профиль линии Ca I ( $\lambda = 4227$  Å) в спектре звезды DK Тельца, эмиссионный компонент которой формируется в горячем пятне. По оси абсцисс отложена длина волны в системе отсчета звезды, а по оси ординат – интенсивность излучения в относительных единицах.*

эмиссионных линий горячего пятна – почти такая же, как у аналогичных линий поглощения в спектре звезды, поэтому их трудно заметить. Едва ли не единственным исключением является линия Ca I ( $\lambda = 4227$  Å): в спектрах звезд Т Тельца она гораздо шире других линий поглощения, и поэтому эмиссионную линию пятна внутри нее легко заметить.

Поскольку раньше “вуалирование линиями” не учитывалось, то все предыдущие оценки темпа аккреции  $M_{ac}$ , т.е. массы газа, падающей на звезду в единицу времени,

<sup>4</sup> На схеме процесса магнитосферной аккреции на звезду типа Т Тельца (слева) таких пятен два: по одному в каждом полушарии звезды.

в той или иной мере были завышены. И вот почему. В конечном итоге вся кинетическая энергия падающего на звезду потока превращается в излучение, которое в единицу времени должно уносить в окружающее пространство энергию  $L_{ac} = M_{ac} \times V_0^2/2$ , где  $V_0$  – скорость газа перед фронтом ударной волны. Как мы уже говорили, половина этой энергии, называемой аккреционной светимостью, излучается горячим пятном. Чтобы узнать, чему равна эта “половинка”, определяли, какой должна быть интенсивность континуума, излучаемого горячим пятном, чтобы обеспечить наблюдаемую степень вуалирования линий поглощения. (На рисунке, где показан спектр звезды RU Волка, это – разность между спектром звезды и штриховой линией.) Но на “ямочный” ремонт дороги нужно гораздо меньше асфальта, чем для того, чтобы покрыть им всю дорогу. Поэтому, не учитывая эффект вуалирования эмиссионными линиями, которые “засыпают” провал в спектре звезды (читай – линию поглощения) как раз в нужном месте, астрономы значительно завышали величину  $L_{ac}$ , а следовательно, и темп аккреции.

Тут уместно сказать о том, каково значение  $M_{ac}$  у классических звезд Т Тельца. Средняя

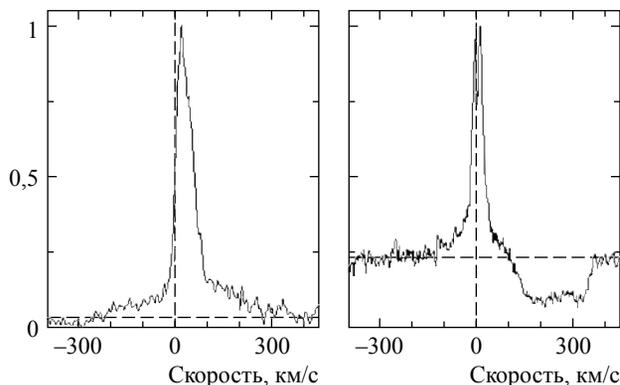
светимость  $L$  этих звезд сравнима со светимостью Солнца  $L_{\odot} = 4 \times 10^{26}$  Вт, поэтому для того, чтобы аккреционная светимость составляла, скажем, 10% от  $L$  (при  $V_0 \approx 300$  км/с), необходим темп аккреции, равный  $3 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$ . У исследованных звезд значения  $M_{ac}$  могут отличаться от этой величины примерно на порядок – как в большую, так и в меньшую сторону.

Обратим внимание на еще одно следствие эффекта “вуалирования линиями”. Наблюдения показывают, что ось симметрии крупномасштабного магнитного поля звезды, как правило, заметно наклонена к оси ее вращения, вследствие чего горячие пятна постоянно, по мере вращения звезды, меняют свою ориентацию относительно наблюдателя. Одновременно меняется и их вклад в общее излучение системы “звезда + пятно”, что наблюдается как периодическое изменение блеска и показателей цвета с периодом осевого вращения звезды, который обычно составляет от 3 до 8 суток. Излучение пятен в линиях проявляется в том, что при вращении звезды профили спектральных линий поглощения также периодически меняют свою форму. Это происходит из-за того, что когда пятно при вращении звезды приближается

к нам, то его эмиссионные линии вследствие эффекта Доплера немного смещаются в коротковолновую часть спектра, а когда пятно удаляется – в длинноволновую. На спектрах с низким разрешением это выглядит как периодическое изменение “центра тяжести” абсорбционных линий, которое некоторые астрономы принимали за изменение скорости движения всей звезды, обусловленное наличием близкого спутника. После тщательного анализа спектров высокого разрешения, выполненного российским астрофизиком П.П. Петровым с коллегами, некоторые из “открытых” таким образом спутников пришлось “закрыть”...

Все эти эффекты – результат воздействия на звезду рентгеновских и ультрафиолетовых квантов, которые из зоны охлаждения газа за фронтом ударной волны летят по направлению к звезде. Что же происходит с аналогичными квантами, которые летят в противоположном направлении? Они поглощаются падающим на звезду газом в магнитосфере звезды, нагревая и ионизуя его. Наши расчеты показывают, что даже непосредственно перед фронтом падающий газ – не очень горячий ( $T < 20000$  К), но довольно сильно ионизован: углерод, например,

Профили линий в спектре звезды DS Тельца, длинноволновое крыло которых образуется в области перед фронтом ударной волны. Слева – профиль линии C IV ( $\lambda = 1548 \text{ \AA}$ ), справа – линии Ca II ( $\lambda = 3934 \text{ \AA}$ ). По оси абсцисс отложено расстояние  $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$  от центральной длины волны линии  $\lambda_0$ , выраженный в единицах скорости с помощью соотношения Доплера  $V = c\Delta\lambda/\lambda_0$ , где  $c$  – скорость света.



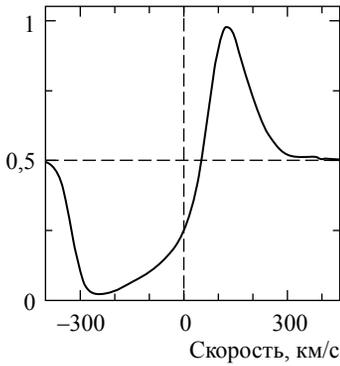
вплоть до ионов с зарядом +3 ( $C^{+3}$ ). Пересекая фронт ударной волны, газ почти мгновенно ионизуется еще больше (углерод при этом теряет все электроны), но потом, по мере остывания газа, степень его ионизации уменьшается, поскольку снижается скорость движения свободных электронов, что повышает вероятность их захвата ионами. Этот процесс называется рекомбинацией.

Любопытно, что при этом газ остывает быстрее, чем рекомбинирует: например, в верхней атмосфере Солнца ион  $C^{+3}$  наиболее обилен при температуре около  $10^5 \text{ K}$ , а за фронтом ударной волны – в области с температурой около  $25\,000 \text{ K}$ , то есть в области, где газ уже почти полностью затормозился. Отсюда следует, что сильные спектральные линии этого (и некоторых других) ионов возникают в двух областях

ударной волны: перед фронтом, где газ приближается к звезде с некоторой скоростью  $V_0$ , и за фронтом, где он почти остановился. Профили таких спектральных линий должны состоять из двух пиков: один – на центральной длине волны, а другой – смещенный вследствие эффекта Доплера в “красную” (длинноволновую) область спектра; причем смещение тем больше, чем меньше угол между направлением вектора скорости и лучом зрения. Если струя аккрецируемого газа имеет достаточно большой поперечный размер, то разные ее области будут видны под разными углами, поэтому расстояние между “нулевой” и “красной” компонентами спектральных линий от различных участков струи будет разным.

Наблюдаемый профиль спектральной линии – это сумма профилей от всех участков

струи. “Нулевые” компоненты складываются, образуя центральный пик линии. “Красные” формируют растянутое “красное” крыло профиля, форма которого зависит не только от ориентации аккреционной струи относительно наблюдателя, но и от ее поперечных размеров, и того, как вдоль и поперек струи меняются плотность и скорость падающего газа. Из расчетов и наблюдений следует, что “нулевой” пик линий, формирующихся в ударной волне, всегда эмиссионный, а “красное” крыло может быть как эмиссионным, так и абсорбционным. Проследив, как меняется профиль такой линии при вращении звезды вокруг оси, можно определить геометрию струи и ее физические параметры, а затем получить информацию о том, как происходит взаимодействие внутренних областей диска с магнитосферой



*Профиль линии He I ( $\lambda = 10830 \text{ \AA}$ ) в спектре звезды DR Тельца. Абсорбция в коротковолновом крыле линии формируется в ветре.*

звезды. Это важно не только для физики молодых звезд: аналогичные процессы столь же плохо изучены и в случае дисковой аккреции на белые карлики или на нейтронные звезды с сильным магнитным полем.

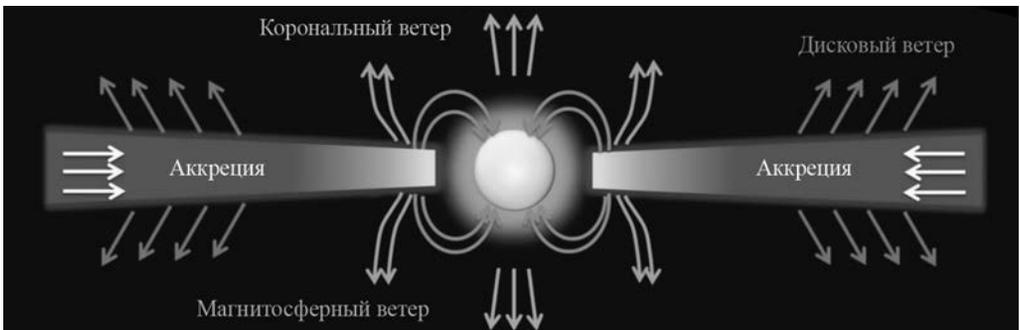
Для того, чтобы вещество протопланетного диска падало по спирали на звезду, оно должно терять момент

импульса. По-видимому, существенную долю момента импульса уносит газ, который улетает с поверхности диска в окружающее пространство — особенно из его внутренних областей, где диск взаимодействует с магнитосферой молодой звезды.

Как мы уже упоминали, об истечении вещества из окрестностей классических звезд Т Тельца со скоростями до 300 км/с известно более полувека: об этом свидетельствуют эмиссионные и абсорбционные детали в коротковолновых крыльях некоторых спектральных линий. Из анализа профилей этих линий следует, что ветер у молодых звезд дует из трех различных областей: с поверхности звезды в районе ее магнитных полюсов (корональный ветер); из области взаимодействия магнитного поля звезды с диском (магнитосферный ветер) и с поверхности диска (дисковый ветер)

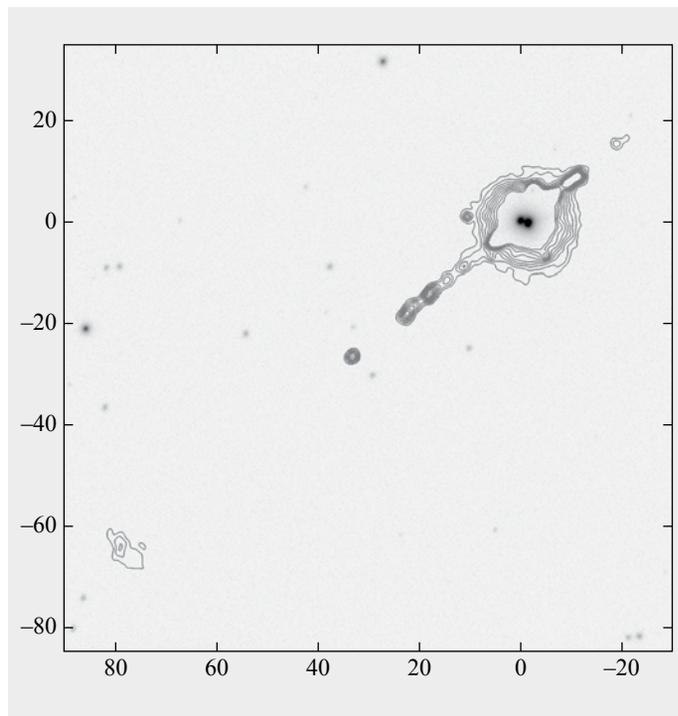
на расстоянии от 0,1 до 1 а.е. от звезды. Скорость потери массы, уносимой магнитосферным и дисковым ветрами, по-видимому, на порядок меньше темпа аккреции, а корональный ветер уносит ежегодно не более  $10^{-10} M_{\odot}$  вещества. Как правило, магнитная ось у молодых звезд наклонена к оси вращения под заметным углом, поэтому картина взаимодействия вещества диска с магнитосферой звезды не имеет осевой симметрии. По этой причине для моделирования процесса аккреции и истечения вещества в случае молодых звезд приходится решать трехмерные нестационарные уравнения магнитогидродинамики и переноса излучения — задача весьма нетривиальная, в решении которой удалось получить первые, весьма обнадеживающие результаты лишь в последнее десятилетие.

В 1980-х гг. было обнаружено, что на расстоя-



*Области, из которых происходит истечение вещества у классических звезд Т Тельца.*

Джет молодой звезды RW Aur A показан в виде линий одинаковой интенсивности (изофот) красного цвета. Звезда входит в состав двойной системы, расстояние между компонентами которой 1,5". Концентрические изофоты вокруг системы возникли при обработке изображения, выполненного для того, чтобы показать, что источником джета является RW Aur A, а не ее спутник. Изображение получено в феврале 2017 г. с помощью 2,5-м телескопа Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ в диапазоне излучения линий S II ( $\lambda = 6716 + 6731 \text{ \AA}$ ). По осям отложено расстояние от RW Aur A в угловых секундах.

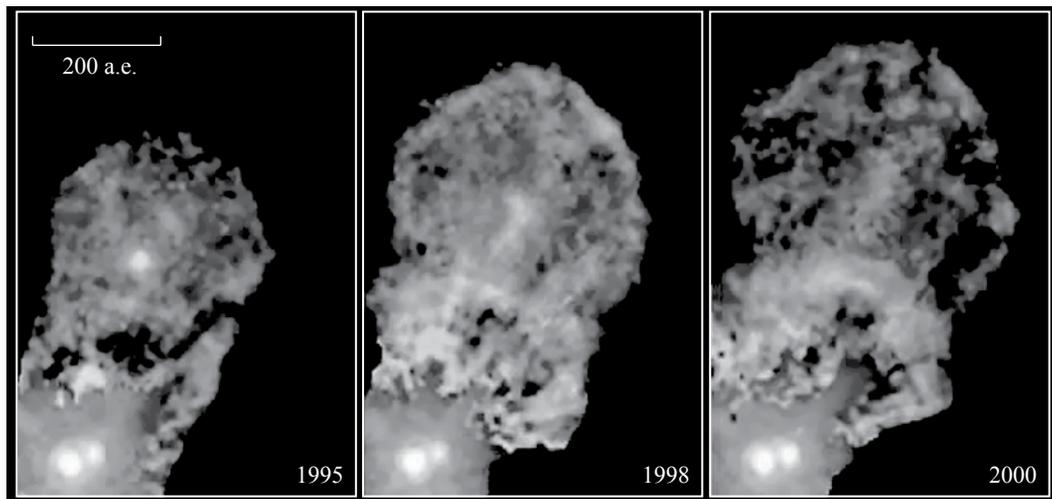


ниях свыше 10 а.е. от звезды истекающее вещество превращается в две противоположно направленные струи (джеты) с поперечным диаметром около 20 а.е., перпендикулярные плоскости протопланетного диска. По-видимому, в окрестностях звезды истечение вещества происходит в разных направлениях; но затем улетающий газ “обжимается” крупномасштабным магнитным полем, которое сохранилось с протозвездной стадии, и образует почти цилиндрический джет. У некоторых молодых звезд следы взаимодействия джетов с остатками родительского протозвездного облака

прослеживаются до расстояний в несколько парсек. Внутри этих струй наблюдаются пятна-уплотнения, которые перемещаются вдоль джета со скоростью порядка 100 км/с – это и есть упоминавшиеся выше объекты Хербига–Аро. Уплотнения представляют собой ударные волны, которые возникают в основании джета вследствие того, что из области формирования коронального и/или магнитосферного ветра в джет эпизодически “впрыскивается” вещество с более высокой скоростью. После очень мощного выброса в нижней части джета одного из компонентов молодой двойной звезды XZ Tau

сформировалось не просто уплотнение, а огромный “пузырь” горячего газа. Механизм возникновения высокоскоростных выбросов вещества еще предстоит выяснить, но сам факт того, что ветер молодых звезд дует “порывами”, не кажется странным. Вероятно, это связано с тем, что темп аккреции у этих звезд без видимой закономерности меняется с течением времени, что вызывает нерегулярные колебания блеска звезды, а также вариации интенсивностей и формы профилей спектральных линий на временных интервалах от десятков минут до десятков лет.

Если говорить о периодичности блеска, то



следует особо упомянуть объекты, получившие название “фуоры” и “эксоры” по имени звезд-прототипов – FU Ориона и EX Волка соответственно. Фуоры – это молодые звезды, скорее всего – звезды типа Т Тельца, блеск которых за несколько лет возрастает на  $5-6^m$ , а затем возвращается к исходному уровню за время порядка 100 лет. Сейчас ни у кого не вызывает сомнения, что возрастание блеска фуоров вызвано тем, что по какой-то причине темп аккреции вещества из протопланетного диска на молодую звезду возрастает до  $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$ . В результате светимость, обусловленная аккрецией, становится гораздо больше светимости самой звезды, поэтому наблюдаемый спектр фуоров – это спектр не звезды, а аккреционного диска, который, впрочем,

вблизи звезды разбухает настолько, что сам становится похожим на звезду. Есть основание считать, что через стадию фуора в процессе эволюции проходит большинство звезд типа Т Тельца, причем неоднократно. Самая большая загадка фуоров – причина увеличения темпа аккреции до столь больших значений, сравнимых с темпом аккреции на черную дыру в знаменитом объекте SS433 (Земля и Вселенная, 1980, № 4; 1986, № 1; 1991, № 4). Обсуждаются два вида моделей явления: неустойчивость в массивном протопланетном диске (гравитационная, тепловая или магнито-ротационная) и приливное воздействие спутника (маломассивной звезды, коричневого карлика или планеты-гиганта). У самой FU Ori недавно был обнаружен спутник, но он сейчас

*Процесс формирования гигантского газового пузыря в основании джета молодой двойной звезды XZ Tau. Изображение получено в 1995, 1998 и 2000 гг. с помощью Космического телескопа им. Хаббла. Фото NASA.*

находится от звезды на расстоянии свыше 250 а.е., поэтому вряд ли именно его воздействие на диск ответственно за вспышку, которая произошла 80 лет назад. В 2005 г. группа французских астрономов сообщила об обнаружении движущейся структуры в диске FU Ori на расстоянии около 10 а.е. от звезды, но независимого подтверждения этого результата пока нет.

Что касается эксоров, то это – звезды типа Т Тельца, у которых также наблюдаются сильные увеличения блеска,

но амплитуда вспышек на пару звездных величин меньше, чем у фуоров. При этом для вспышки у эксоров максимум год-два, после чего блеск звезды возвращается к исходному уровню. У большинства эксоров, в частности у самой EX Lup, наблюдалось несколько вспышек. Из наблюдений следует, что у этих звезд нет настолько массивных аккреционных дисков, чтобы в них могла развиться гравитационная неустойчивость; поэтому гипотеза о том, что причиной вспышек является приливное воздействие спутника на диск, выглядит перспективной. Кстати сказать, недавно появилось сообщение группы европейских астрономов об обнаружении у EX Lup спутника, который обращается вокруг звезды с периодом около 7,4 сут и имеет массу, в несколько десятков раз превышающую массу Юпитера. Можно ли считать этот спутник причиной вспышечной активности звезды – пока не ясно.

#### ЗВЕЗДЫ ТИПА Т ТЕЛЬЦА СО СЛАБЫМИ ЛИНИЯМИ

Чем меньше темп аккреции на звезду, тем меньше в ее оптическом спектре интенсивность избыточного континуума и эмиссионных линий, профили которых, по мере уменьшения темпа аккреции, становятся

все более и более симметричными. У звезд Т Тельца со слабыми линиями (то есть с эквивалентной шириной линии  $H_{\alpha}$  менее примерно  $10 \text{ \AA}$ ) уже не наблюдаются признаков аккреции или истечения вещества, а также отсутствует избыточное излучение в оптическом и ближнем ИК-диапазонах, хотя на длинах волн свыше 5–10 мкм оно все же имеется. Это говорит о том, что у звезд со слабыми линиями сохранились лишь внешние области протопланетных дисков. Вещество внутренних областей исчезло: газ частично испарился из-за нагрева диска излучением звезды, а пыль вошла в состав планетных зародышей, уменьшив тем самым площадь излучающей поверхности и, следовательно, интенсивность ИК-излучения.

Звезды Т Тельца со слабыми линиями отличается от звезд Главной последовательности с той же массой в тысячи раз более интенсивное рентгеновское и УФ-излучения, а также существенная переменность блеска в видимой области. Причина этого – мощные хромосферы и короны, которые образуются потому, что эти звезды имеют протяженные конвективные зоны и периоды осевого вращения порядка 3 сут, вследствие чего индукция магнитного поля у них

в тысячи раз больше, чем средняя на поверхности Солнца. Взаимодействие плазмы внешних слоев этих молодых звезд с сильным магнитным полем порождает комплекс явлений, который мы наблюдаем на Солнце, но в гипертрофированном масштабе. Вспышки, аналогичные солнечным, происходят у этих объектов примерно в сто раз чаще, чем на Солнце, причем средняя мощность вспышек в сто раз больше, чем мощность средней солнечной вспышки. Гораздо больший размер имеют пятна: если на Солнце “крупным” называется пятно, которое занимает 1% поверхности (что случается крайне редко), то у звезды V410 Tau на протяжении 30 лет наблюдалась более холодная, чем фотосфера, область, которая занимала почти треть поверхности звезды. Вспышки и холодные пятна ответственны за наблюдаемую переменность этого вида звезд Т Тельца. Например, у той же V410 Tau перемещение пятна относительно наблюдателя при вращении звезды вокруг оси приводило к переменности блеска с амплитудой более  $1^m$ . Естественно ожидать, что из корон звезд Т Тельца происходит истечение вещества, подобного солнечному ветру, но, хотя оно должно быть в тысячи раз более интенсивным,

чем у Солнца, до сих пор о его существовании судят лишь по косвенным признакам. Отметим, что у классических звезд типа Т Тельца должны происходить аналогичные процессы, однако их трудно заметить на фоне явлений, обусловленных аккреционной активностью. Единственное исключение – рентгеновское излучение с энергией более 1 кэВ, которое даже у классических звезд Т Тельца, по-видимому, обусловлено излучением короны.

При исходной массе протопланетного диска  $M_d \sim 0,01-0,001 M_\odot$  темп аккреции порядка  $3 \times 10^{-9} M_\odot/\text{год}$ , соответствующий стадии классической звезды Т Тельца, может сохраняться на протяжении нескольких миллионов лет. Параллельно происходят процессы испарения остатков газа из внутренних областей диска за счет дискового ветра и формирование планетных зародышей – эти процессы происходят примерно в такой же временной шкале. Таким образом, когда возраст молодой звезды в интересующем нас диапазоне масс достигает примерно 10 млн лет, то все проявления аккреции должны исчезнуть, сохраняется только мощная хромосферная активность, сопровождаемая интенсивным корональным ветром. Ветер

“тянет за собой” силовые линии магнитного поля звезды, которые жестко “привязаны” к поверхности звезды и вращаются вместе с ней вокруг оси. В результате силовые линии закручиваются в спираль, вдоль которой движется вещество ветра – аналогично тому, как это происходит в солнечном ветре. Вследствие этого вещество ветра приобретает момент импульса, который оно отбирает у звезды, уменьшая скорость ее вращения вокруг оси. Торможение осевого вращения звезды сопровождается уменьшением индукции глобального магнитного поля на ее поверхности, в результате чего снижается уровень хромосферной активности. Примерно через 10 млн лет этот уровень становится таким же, как у наиболее активных звезд главной последовательности, и стадия Т Тельца у молодой звезды заканчивается.

#### ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В последние два десятилетия интерес к изучению звезд типа Т Тельца сильно вырос, что в значительной степени связано с массовым обнаружением планет у других звезд. Стало ясно, что образование планетных систем – довольно распространенное явление, которое

является закономерным результатом процесса рождения звезд, и астрономы стремятся разобраться во всех деталях этого процесса. Почему звезды имеют разное количество планет? Почему эти планеты имеют именно такую массу и движутся именно по таким орбитам? Насколько типична Солнечная система? Как менялись эффективность образования планетных систем и их свойства в разные эпохи развития Вселенной? Ответить на эти и многие другие вопросы невозможно без детального понимания явлений, которые определяют строение и эволюцию протопланетных дисков.

В свою очередь, все происходящее в дисках в значительной степени зависит от процессов, связанных с центральной звездой: аккреция на звезду уменьшает массу диска, а излучение звезды нагревает и ионизует его вещество. Между тем физические аспекты многих явлений у молодых звезд остаются недостаточно изученными. Какую часть массы формирующаяся молодая звезда накапливает в ходе фазы “спокойной аккреции”, а какую – за время пребывания в “стадии фуора”? Каков механизм вспышек фуоров и эксоров? Насколько эффективно дисковый ветер

уносит момент импульса из диска, и в какой степени этот процесс влияет на темп аккреции? Каков механизм образования магнитосферного ветра, и как почти изотропный вблизи звезды ветер превращается в джет? Как происходит проникновение плазмы диска в магнитосферу звезды?

Почему звезды Т Тельца со слабыми линиями в среднем вращаются вокруг своей оси быстрее, чем классические, хотя аккреция вещества диска вроде бы должна увеличивать скорость осевого вращения? Астрофизикам еще предстоит найти ответы на эти вопросы, важность которых далеко

выходит за рамки изучения звезд типа Т Тельца.

Автор благодарит сотрудников ГАИШ МГУ О.В. Возякову и А.В. Додина, которые получили и обработали изображение джета RW Aur A, а также Российский научный фонд за финансовую поддержку (проект № 17-12-01241).

---

## Информация

---

### Обнаружение гравитационных волн

14 августа 2017 г. с помощью трех различных детекторов Лазерно-интерферометрической обсерватории LIGO (США) и Европейской гравитационной обсерватории EGO (Франция, Италия), расположенных на территории штатов Луизиана и Вашингтон (и в Италии), впервые зарегистрирована “рябь”

пространства–времени – гравитационно-волновые сигналы, идущие от столкновения пары сверхмассивных черных дыр массой  $31 M_{\odot}$  и  $25 M_{\odot}$ . Событие произошло на расстоянии примерно 1,8 млрд св. лет от нас, оно привело к появлению вращающейся черной дыры массой примерно  $53 M_{\odot}$ . В ходе их слияния примерно три солнечных массы превратились в энергию гравитационных волн. Это сенсационное открытие дает возможность более глубоко понять природу

гравитационных волн и более точно их локализовать в космическом пространстве.

Индийские астрофизики Университета Пуна пришли к выводу, что в спиральной галактике с перемычкой NGC 7674 в созвездии Пегаса (400 млн св. лет от нас) две сверхмассивные черные дыры общей массой около  $36 \cdot 10^6 M_{\odot}$  в любой момент могут объединиться в один объект. Они совершают один оборот вокруг общего центра масс примерно за 100 тыс. лет; удалены друг от друга всего на 1,1 св. год (0,35 пк) – это примерно в два раза ближе, чем сливающиеся черные дыры в галактике 4C +37.11 или в галактике OJ 287.

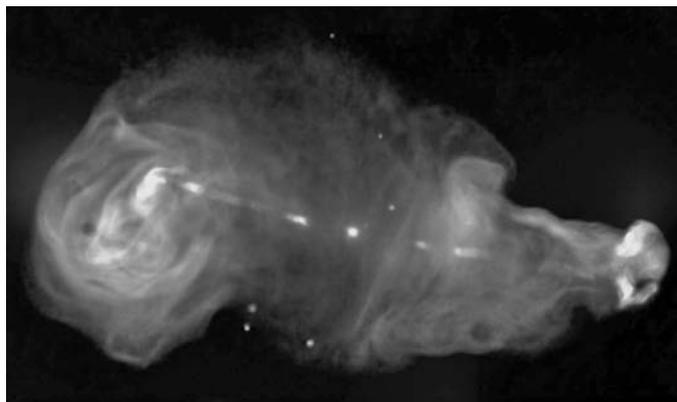
Столь тесное соседство черных дыр говорит о том, что они испускают гравитационные волны. Их обна-



---

*Спиральная галактика с перемычкой NGC 7674 в созвездии Пегаса. В ее центре вращаются близко друг к другу две сверхмассивные черные дыры. Снимок получен с помощью Космического телескопа им. Хаббла. Фото NASA/JPL.*

*Взаимодействие двух близко расположенных черных дыр (в центре снимка) в галактике NGC 7674. Они окутаны облаками горячей плазмы. Снимок получен космической рентгеновской обсерваторией "Чандра". Фото NASA/JPL.*



ружение с помощью детекторов обсерватории LIGO показало, что такие события происходят во Вселенной достаточно часто (Земля и Вселенная, 2016, № 4); однако сегодня ученым известны всего три галактики, где черные дыры находятся очень близко друг к другу.

Малая статистика подобных объектов и огромные расстояния до них не дают ученым изучать свойства близко расположенных черных дыр (в том числе и то, какую роль их слияния могут играть в формировании галактик). Открытие первых отождествленных следов двух черных дыр в центре спиральной галактики говорит о том, что их столкновение не всегда приводит к рождению эллиптических галактик, процессы звездообразования в которых быстро гаснут из-за разогрева газа выбросами черных дыр. Вероятно, существуют разные механизмы слияния галактик и черных дыр.

Следующей важной вехой в регистрации гравитационных волн должно стать открытие аналогичных сигналов, пришедших от слияния нейтронных звезд. Сложность – в том, что, по расчетам, амплитуда таких сигналов значительно ниже, а длина волн – намного больше. Если гравитационная волна от двух сливающихся дыр имеет период – доли секунды, то волна от пары нейтронных звезд может иметь период, измеряемый часами; поэтому для их регистрации требуется более высокая чувствительность детекторов.

Вскоре после появившихся сообщений об открытии гравитационных волн с помощью многих оптических наземных телескопов (в том числе KTX), стали наблюдать за эллиптической галактикой NGC 4993 в созвездии Гидра, находящейся в 130 млн св. лет от нас (в ней сливаются нейтронные звезды).

Возможно, именно там находится источник долгожданного сигнала.

Гравитационные волны, открытые еще в 2014 г. (Земля и Вселенная, 2014, № 4, с. 110), будут исследовать с помощью наземных радиотелескопов, объединенных в единую систему со сверхдлинными базами, а также проектируемая космическая обсерватория "eLISA" (NASA, ESA), запуск которой намечен на 2034 г.

Причины трудного обнаружения низкочастотных гравитационных волн, которые вырабатывают сверхмассивные черные дыры, разные: LIGO не приспособлен для этого, "eLISA" не сможет их зарегистрировать из-за низкой массы объектов, например, в галактике NGC 7674.

*Журнал "Nature", 2017.  
Т. 550. № 7668.*

*Журнал "Physical Review Letters", 2017.  
Т. 119. № 13.*