



Туманный цвет недальних планет

Газовые гиганты Уран и Нептун похожи если не как близнецы, то как родные братья. У седьмой и восьмой планет Солнечной системы с диаметрами около четырех земных примерно равные массы и сходные до процентов составы атмосфер (водород, гелий, метан и др.). Планеты слегка отличаются цветом, то есть спектрами. Нептун ярко-голубой, Уран бледно-голубой. Причины до конца не выяснены.

Обычно, чтобы определить состав атмосферы, астрофизики изучают спектры солнечного излучения, отраженного от планет. Делают они это лишь на определенных длинах волн или в узких диапазонах. Поэтому ученым часто сложно сравнивать и обобщать выводы разных наблюдений.

Недавно в печати появилась новая работа международной команды исследователей, которую возглавил профессор Оксфордского университета Патрик Ирвин (Patrick Irwin). В ней для Урана и Нептуна на основе анализа спектральных кривых в широком диапазоне 0,3–2,5 микрон авторы предложили универсальную слоевую модель атмосфер.

Сами спектры получены на трех известных спектральных инструментах: телескопах Джемини Север и IRTF на Гавайях, а также знаменитом космическом телескопе имени Хаббла. Выводы новой теории хорошо согласуются с наблюдаемыми характеристиками спектров.

Если раньше ученые считали, что глубокие атмосферные слои Урана и Нептуна содержат только облака метана и льды сероводорода, то теперь к ним добавили метановый туман. Единая модель утверждает, что цвет планет связан с наличием в атмосферах трех аэрозольных слоев

метана. Их толщины удобно характеризовать диапазонами давлений, так как с глубиной атмосферное давление возрастает. Через газовые законы его можно пересчитать в высоты.

В первом слое, простирающемся на глубину до давлений 1–2 атмосферы, происходит конденсация метана в мелкие аэрозольные частицы. Их размер нарастает с глубиной, и ключевой для цвета средний слой уже состоит из ледяного аэрозольного тумана. Он медленно опускается вниз и, смешиваясь с более теплыми слоями, дает зародыши сероводородного льда третьего слоя, давление в котором выше 5–7 атмосфер.

Приятным бонусом для ученых стал побочный результат, объясняющий темные пятна, иногда появляющиеся в атмосфере Нептуна и очень редко – Урана. У Нептуна более активная и турбулентная атмосфера, это делает средний слой более динамичным, истончает его, снижая коэффициент пропускания солнечного излучения

к третьему слою. Затемнение или осветление нижнего слоя объясняет цвета и спектры пятен. У Урана более толстый слой застойного тумана, из-за чего его атмосфера в целом более белая, поэтому Уран ярче Нептуна. Если б туман на планетах отсутствовал, обе они были б одинаково голубыми. Астрофизики впервые построили модель с такими широкими обобщениями. (*Journal of Geophysical Research: Planets*, 23. 05. 2022)

Дальние звезды тяжелее

Как выглядят звезды в нашей Галактике, хотя бы издалека, мы знаем. Но как они выглядят в других галактиках? Об этом можно только догадываться, ведь даже лучшие телескопы не различают в них отдельные светила. Впрочем, естественно предположить, что так же, как и в нашей.

Последние семьдесят лет это было общепринятым положением астрофизики. Ученые считали, что состав звезд всех галактик подобен популяции сотен миллиардов звезд Млечного Пути. Она представляет собой смесь массивных, средне- и маломассивных светил, взятых в определенных пропорциях. Эту зависимость числа светил в системе от их массы или диаметра ученые называют начальной функцией распределения. Она играет заметную роль во всех современных моделях образования и эволюции звезд.

Старые представления только что поколебали ученые Института Нильса Бора при Копенгагенском университете. Команда под руководством выпускника университета Альберта Снеппена (Albert Snenppen), курируемая профессором Чарльзом Штайнхардтом (Charles Steinhardt), проанализировала данные об излучении 140 000 галактик. Информация была взята из большой международной базы с более чем миллионом наблюдений галактического света (каталог COSMOS 2015).

Галактики эти находятся на разном удалении от нашей. От самой дальней

из них до Земли свет идет дюжину миллиардов лет. Обычно мы видим свет от их массивных звезд, излучение менее ярких до нас не доходит. Общая закономерность звездных спектров в том, что цвет больших и массивных звезд голубой, в то время как маленькие и легкие звезды более желтые или красные. Сравнивая соотношение холодных и теплых цветов в дальней галактике, можно оценить пропорции легких и тяжелых звезд и тем самым судить об их функциях распределения.

Оказалось, звезды в дальних галактиках, как правило, более массивны, чем в нашей, причем чем дальше, тем они тяжелее. Этот вывод способен поставить под сомнение многие базовые представления современной астрофизики. Он даже может изменить наше понимание таких астрономических явлений, как образование черных дыр или сверхновых, которые берут начало от массивных звезд. Вывод также может поколебать представления об эволюции галактик, их рождении и смерти.

Как и почему умирают галактики, исследователи пока не понимают. Работа показывает, что менее массивные из изученных галактик продолжают формировать звезды, в то время как более тяжелые прекращают звездообразование. Профессор Штайнхардт утверждает, что это явление универсально. (*The Astrophysical Journal*. 931, 1, 57, 2022)

Быстрые, яркие, молодые

Звезда β Pictoris знаменита тем, что окружена одной из молодых планетных систем в стадии формирования. Это делает ее уникальной лабораторией для изучения активных процессов. Система содержит по меньшей мере две молодые экзопланеты и много более мелких тел, в частности комет.

Кометы были открыты в 1987 году и стали первыми из найденных вне Солнечной системы. Естественно, с Земли их не видно, но, пролетая на линии взгляда между земным наблюдателем и материнской звездой,

кометы модифицируют ее свет. Это происходит из-за их газопылевых атмосфер и хвостов. Спектральные изменения света звезды фиксируют земные приборы, чтобы на их основе астрофизики смогли интерпретировать состав и свойства комет.

Только что международная команда ученых под руководством сотрудника Национального центра научных исследований Франции Алана Лекавелье де Этана (Alain Lecavelier des Etangs) открыла у звезды β Pictoris три десятка новых комет и определила размеры их ядер. Работа, опубликованная в одном из ведущих журналов мира, потребовала от астрономов 156 дней наблюдения звезды и ее окрестностей с помощью космического телескопа TESS, которое было начато в 2018 году.

Размеры комет, как оказалось, варьировались в диапазоне от 3 до 14 км. Это дало возможность впервые построить кривую распределения экзокomet по размерам. Она подчиняется степенному закону и очень похожа на таковую для комет Солнечной системы. Анализ свидетельствует о том, что экзокometы появились в результате столкновений и разрушений более крупных тел.

Работа проливает свет на слабо изученную тему эволюции комет в звездно-планетных системах. Это важно по многим практическим причинам. Например, астрофизики думают, что воду на Землю хотя бы частично принесли кометы. Поэтому так важно понять происхождение комет. (*Scientific Reports*, 12, 1, 2022)

Инверсия экзопланет

Астрономы надежно подтвердили существование нескольких тысяч экзопланет. Число же кандидатов на утверждение в разы больше. Это большой успех, хотя планеты у далеких звезд изучать не просто. Большой и надежный архив помогает теоретикам строить модели образования экзопланет, применяя статистические подходы к их описанию. В Сети есть несколько баз данных

с информацией об их массах, размерах, орбитальных характеристиках, свойствах материнских звезд и пр.

В последнее время вырос объем данных и о планетных атмосферах. Их получают по спектральным и фотометрическим характеристикам. Но популяционные исследования атмосфер по-прежнему редки, хотя и могут стать ключом к пониманию механизмов их образования. Обычно авторы детально анализируют отдельные планеты, изучают лишь отдельные явления, к примеру — наличие водяного пара или облаков в популяции.

Недавно вышла новая статья международной группы исследователей под руководством доктора Кентина Ченгита (Quentin Changeat) из Университетского колледжа Лондона. В ней впервые проведен популяционный анализ атмосфер планет. Все их спектры получены при затмении ими материнских звезд.

Исследователи всесторонне проанализировали статистику двадцати пяти горячих юпитеров. Это планеты размером с крупнейший газовый гигант Солнечной системы, расположенные вблизи своих звезд. Ученые рассмотрели данные шестисот часов наблюдений в космический телескоп Хаббл и четырехсот — в телескоп Спитцер.

Ученые установили корреляции между разными характеристиками атмосфер, например вертикальными профилями температуры и химическим составом. Как правило, атмосфера задерживает тепло, поэтому ее температура должна падать с высотой. Однако у некоторых планет верхний слой газовой оболочки теплее нижнего, это называют инверсией. На Земле, к примеру, она вызвана слоем озона.

Исследователи нашли, что почти на всех горячих юпитерах с инверсией присутствуют анион водорода и соединения металлов, такие как монооксиды титана и ванадия, а также гидрид железа. А вот у планет без этих соединений термоинверсии не бывает. Одно из возможных объяснений в том, что найденные соединения эффективно поглощают свет и, если они присутствуют в верхней атмосфере, свет материнской звезды ведет к нагреву содержащего их слоя атмосферы.

Заняться атмосферами ученых подвигла теория образования газовых гигантов, принадлежащая одному из соавторов работы Икома Масахиро (Masahiro Ikoma) из Национальной астрономической обсерватории Японии. Эта теория предсказывает различия в составе атмосфер, что и было найдено.

Эти исследования без сомнения дадут пищу новым идеям. Тем более что в скором времени в печати появятся революционные данные новейших астроприборов, в том числе космического телескопа Джеймс Уэбб. (*The Astrophysical Journal Supplement Series*, 260, 1, 3, 2022)

Подрыв Марса

Происхождение Марса, его эволюция и история — вот основные цели всех экспедиций летательных аппаратов к нему. И орбитальные облеты, и передвижения роверов по поверхности Красной планеты позволили ученым сильно продвинуться в понимании этих процессов.

Шестнадцать лет назад марсоход Спирит (Spirit) обнаружил силикатный минерал оливин и карбонаты в кратере Гусева. Недавно аналогичное открытие сделал марсоход Персеверанс (Perseverance) в области Nile Fosse, содержащей кратер Езеро (Jezero). В обоих регионах концентрация оливина самая высокая из всех, до сих пор найденных на Марсе.

О происхождении этих пород уже два десятилетия спорят ученые. Существует множество гипотез, объясняющих их появление. По-видимому, оливин происходит из магмы, возникающей в мантии Марса ровно так же, как на Земле. Поэтому логично думать, что появление его на Марсе связано с каким-либо вулканическим процессом.

Команда исследователей под руководством профессора Стива Раффа (Steve Ruff) из Школы земных и космических исследований Университета штата Аризона вновь проанализировала данные нескольких миссий. Орбитальные аппараты дали спектры

регионов, а микроскопические камеры роверов позволили сделать микрофотографии поверхности пород.

Ученые установили, что богатые оливином породы вокруг кратеров Гусева и Jezero могут быть вулканическими осадочными породами, образовавшимися в результате катастрофических взрывных извержений вулканов. Необычная текстура марсианских пород имеет аналоги среди очень специфических пород на Земле. Это игнимбриты, которые формируются из многокилометровых потоков горячих газов, почти расплавленного пепла, пемзы и гравия при самых мощных извержениях на Земле.

Игнимбриты застывают в течение нескольких дней в слое в сотни метров толщиной, а затем медленно охлаждаются месяцы и годы. Это и приводит к их специфической микроморфологии из-за растрескивания при сжатии. На Земле игнимбриты находят, к примеру, на западе США, в Йеллоустонском национальном парке. Это желтые породы массивной вулканической кальдеры, которые сформировались около двух миллионов лет назад.

На Марсе расположен самый большой вулкан в Солнечной системе, здесь же существовали и лавовые потоки, покрывающие громадные регионы. Но игнимбриты есть только в определенных районах. На Земле оливиновый состав необычен для большинства вулканов, он характерен лишь для самых старых из них.

Профессор Рафф считает, что для полного подтверждения и уточнения деталей образования пород надо доставить их образцы на Землю. Это помогло бы понять природу извержений в начале истории планеты, а также объяснить существование других регионов с оливинами на Марсе. В будущем Рафф с командой надеются протестировать гипотезу появления оливинов при последовательном осаждении вулканического пепла. Однако профессор считает, что игнимбриты могли образоваться при гораздо более энергичных процессах, то есть при взрывах. (*Icarus*, 26. 03. 2022)

Выпуск подготовил
А. Гурьянов