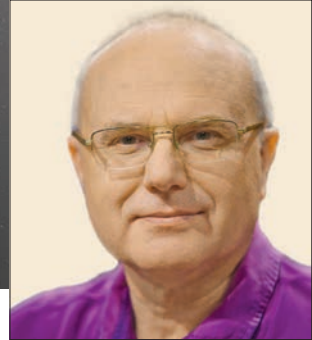
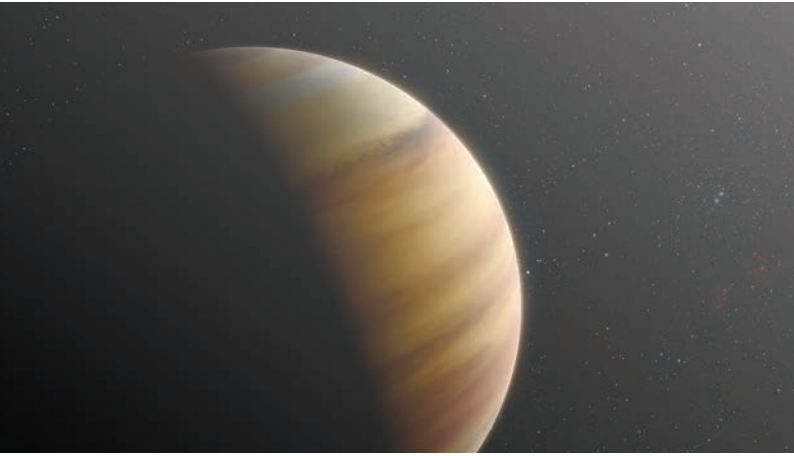


НАША ВСЕЛЕННАЯ И ДРУГИЕ ЗЕМЛИ



ПОСТНОВ Константин Александрович,

доктор физико-математических наук
профессор

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова

DOI: 10.7868/50044394820010016

Вселенная не перестает удивлять нас богатством и разнообразием населяющих ее объектов и происходящих в ней физических процессов. Не перестает удивлять она и Нобелевский комитет, который в очередной раз отметил фундаментальные открытия в астрономии и достижения в космологии, сделанные за прошедшие десятилетия. Название нашего журнала “Земля и Вселенная” почти точно отражает суть Нобелевской премии 2019 г., и об этом стоит подробнее рассказать нашим читателям.

В ушедшем году Нобелевская премия по физике была присуждена трем лауреатам: половина премии – космологу Джеймсу Пиблзу (James Peebles, Принстонский университет, США) “за теоретические открытия в физической космологии”, и вторая половина премии – совместно швейцарским астрономам Мишелю Майору (Michel Mayor, Женевский университет и Кембриджский университет) и Дидье Кело (Didier Queloz, Женевский университет) “за открытие

экзопланеты вокруг солнцеподобной звезды”.

Сочетание физической космологии и открытия экзопланет, на первый взгляд, может показаться довольно искусственным, однако не отметить открытие экзопланет астрономическими наблюдениями было нельзя, а успехи современной космологии столь впечатляющи, что половина нобелевской премии по физике за 2019 г. одному из лучших американских космологов кажется вполне обоснованной.



Лауреаты Нобелевской премии по физике 2019 г. Справа налево: Дж. Пиблз (Принстонский университет, США), М. Майор, Д. Кело (Женевский университет, Швейцария). Фотографии: Princeton University, Office of Communications, Denise Applewhite (2019); ESO, L. Weinstein/Ciel et Espace Photos

ПОХОД К ИСТОКАМ ВРЕМЕНИ И ВЕЩЕСТВА

Чтобы оценить по достоинству награду за физическую космологию, следует начать с величайшего достижения естествознания XX века – создания общей теории относительности (ОТО) А. Эйнштейна, ставшей современной теорией тяготения. В отличие от ньютоновской теории, разделяющей пространство и время, ОТО – релятивистская теория, в которой пространство и время составляют единый пространственно-временной континуум. Всемирное тяготение – это не просто сила притяжения между телами, как было у Ньютона, а внутреннее свойство пространства-времени, описываемое его кривизной. Теория Эйнштейна – это геометризованная гравитация. Коротко говоря, согласно уравнениям Эйнштейна, *пространство-время диктует, как двигаться материальным телам, а материя диктует пространству-времени, как искривляться* (подробно об истории создания и развития ОТО от Эйнштейна до наших дней рассказывается в замечательной популярной книге А.Н. Петрова “Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор”).

Именно ОТО легло в основу физической космологии, переведя ее из об-

ласти метафизики в область точных наук. Первая физическая космологическая модель была предложена самим А. Эйнштейном уже в 1917 г., вскоре после окончательной формулировки ОТО. В этой модели Вселенная считалась статической, что соответствовало привычному тогда представлению о глобальной неизменности окружающего мира, а пространство – трехмерной сферой, заполненной веществом. Для статичности такой Вселенной, правда, Эйнштейну пришлось добавить одну деталь в свои уравнения – так называемую “космологическую постоянную”, которая в некотором смысле компенсировала действие гравитации, стремящейся сделать свойства Вселенной зависящими от времени. В дальнейшем, признав наблюдаемый факт расширения Вселенной, Эйнштейн назвал введение космологической постоянной своим “величайшим заблуждением”. Однако сегодня мы наблюдаем ускоренное расширение Вселенной, и космологическая постоянная или подобная субстанция, обобщенно называемая “темной энергией”, серьезно рассматривается как одна из основных физических составляющих современной космологической модели. Концептуально важно, что в этой модели впервые было показано, что Вселенная может быть конечной, но безгранич-

ной (об этом можно прочитать в популярной книге А.Д. Чернина и А.М. Черепашука “Вселенная, жизнь, черные дыры”).

Через несколько лет после первой космологической модели Эйнштейна в работах замечательного русского математика А.А. Фридмана 1922 и 1924 гг. впервые были получены зависимости от времени решения уравнения ОТО, описывающие модель расширяющейся Вселенной. Вскоре похожие решения были независимо получены бельгийским ученым – аббатом Дж. Леметром (1927 г.). Эти решения лежат в основе современных космологических моделей, а соответствующие уравнения называются уравнениями Фридмана.

В конце 20-х годов Э. Хабблом на телескопе обсерватории Маунт Вилсон (США) было открыто расширение Вселенной по красным смещениям линий в спектрах далеких галактик $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$: скорость удаления галактики пропорциональна расстоянию до нее, $v = Hr$, где скорость вычисляется по линейному эффекту Доплера $\frac{v}{c} = z$, а расстояние – по каким-либо индикаторам (пульсирующим звездам – цефеидам, как это впервые сделал Хаббл, или иным источникам с известной мощностью излучения). Это эпохальное открытие (не отмеченное, увы, никакой мировой наградой) легло, таким образом, на хорошо подготовленную теоретическую почву.

Следующий важный этап становления физической космологии, несомненно, связан с выдающимися работами американских физиков Дж. (Георгия Антоновича) Гамова и его молодых коллег Р. Альфера, Р. Хермана, выполненных в конце 1940-х гг. Эти работы были мотивированы желанием объяснить происхождение химических элементов в ранней Вселенной, в которой долж-

ны были царить очень высокие плотности и температуры, пригодные для протекания термоядерных реакций. Так впервые было рассчитано обилие химических элементов в ранней Вселенной и введено понятие Big Bang (неудачный русский перевод – “Большой Взрыв”). На самом деле, точнее надо говорить о начале классической стадии расширения Вселенной, никакого “взрыва” Вселенной, понятно, не было.

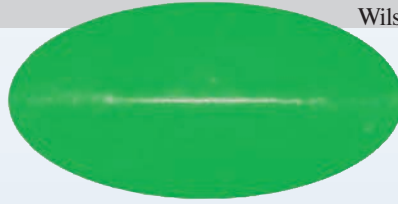
Довольно быстро стало ясно, что элементов тяжелее водорода, гелия и легких изотопов в расширяющейся однородной изотропной Вселенной произвести не удастся (тяжелые элементы – продукт термоядерной эволюции звезд и вспышек сверхновых разных типов). Тем не менее основная физическая идея о высоких температурах и плотностях в ранней Вселенной совершенно правильная. Эта теория получила название “модель горячей Вселенной”, потому что предсказывала высокую удельную энтропию Вселенной на одну частицу, измеряемую отношением куба температуры к плотности барионов.

Важнейшим проверяемым предсказанием этой теории стало существование остаточного фонового излучения с чернотельным спектром (“реликтового” излучения, по меткому выражению И.С. Шкловского), температура которого в наше время должна быть несколько градусов. Это излучение образовалось во Вселенной на самых ранних стадиях в процессах электрослабого взаимодействия заряженных частиц. Из-за высоких плотностей и температур длина свободного пробега реликтовых фотонов оставалась много меньше “размера” Вселенной (причинно-связанной области, которая определяется произведением скорости света на возраст Вселенной, т.е. время, прошедшее с начала классического расширения). Образно говоря, фотоны были “заперты” в первичной плазме вплоть до времени (порядка

1965



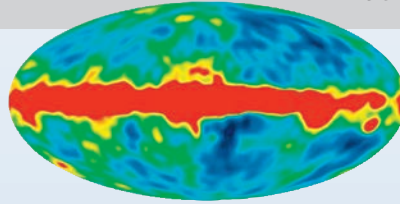
Penzias and Wilson



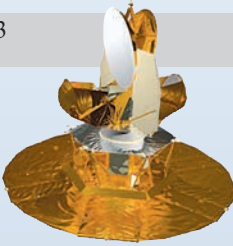
1992



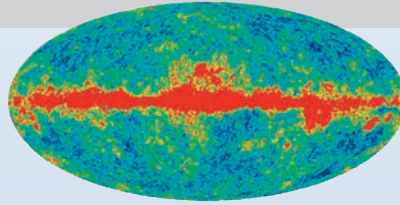
COBE



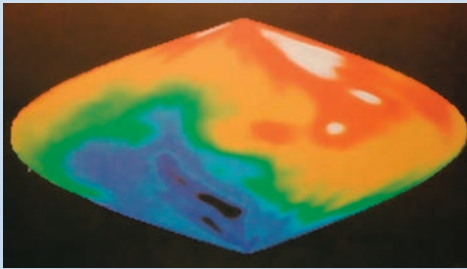
2003



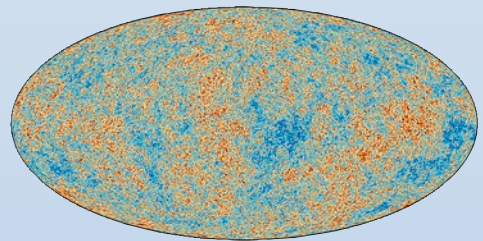
WMAP



Так менялась карта флуктуаций реликтового излучения по мере совершенствования наблюдательных инструментов. Сверху вниз: карты, полученные с помощью наземной антенны (работы А. Пензиаса и Р. Уилсона), инструментов на КА COBE и WMAP (NASA).
Изображение: NASA / WMAP Science Team



Карта анизотропии температуры реликтового излучения, полученная в эксперименте «Реликт-1» на борту КА «Прогноз-9» (1983). Изображение: ИКИ РАН



−300 μK 300

Карта флуктуаций температуры реликтового излучения по данным космического аппарата Planck (ESA). Разность температур между самыми горячими («горы») и холодными («океаны») областями составляет $\Delta T/T \sim 10^{-5}$, где $T = 2.76$ К. Изображение: ESA and the Planck Collaboration

360 тыс. лет), когда температура в ходе расширения упала примерно до 3000 К, и свободные электроны связались (рекомбинировали) с протонами и ядрами гелия в атомы водорода и гелия.

До эпохи рекомбинации излучение и вещество находилось в термодинамическом равновесии, определяемом единой температурой. После рекомбинации длина свободного пробега реликтовых фотонов стала больше размеров Вселенной (излучение “отделилось” от вещества), и, таким образом, реликтовое излучение несет прямую информацию о физическом состоянии Вселенной в эпоху рекомбинации. С астрономической точки зрения, реликтовое излучение – самый “далекий” объект, на красном смещении $z \sim 1100$, который, в принципе, возможно прямо изучать в электромагнитном диапазоне.

Прошло полтора десятилетия после пионерских работ группы Г. Гамова, и в 1965 г. реликтовое излучение было открыто сотрудниками лаборатории *Bell A.* Пензиасом и Р. Уилсоном как фоновое космическое излучение с температурой около 3 К, проявляющее себя как неустраняемый шум на рупорной антенне (Нобелевская премия по физике 1978 г.). Так же, как в случае с хаббловским расширением, это открытие ожидалось теоретиками. Так, в 1964 г. в работе И.Д. Новикова и А.Г. Дорошкевича (опубликована в “Докладах Академии наук СССР”) были рассмотрены наиболее оптимальные частоты и методы обнаружения гипотетического реликтового излучения, и они указали на рупорную антенну лаборатории *Bell* как на оптимальный инструмент для его обнаружения.

В 1965 г. Дж. Пиблз работал в Принстонской теоретической группе и разрабатывал теорию “горячей Вселенной”. Как только стало известно об открытии Пензиаса и Уилсона, им, совместно с соавторами (Р. Дике, П. Роллом и

Д. Уилкинсоном), была написана статья (вышедшая в одном номере *Astrophysical Journal* вслед за статьей Пензиаса и Уилсона), объясняющая открытие 3-градусного космического фонового реликтового излучения в рамках модели “горячей Вселенной” Гамова. Вскоре в 1966 г. на основании модели “горячей Вселенной” Дж. Пиблз рассчитал космическое обилие первичного гелия – точнее, чем это было сделано в пионерских работах Гамова и его сотрудников.

Однако самая известная работа Дж. Пиблза вышла в 1970 г. (совместно с Юй Дзе-Таем), в которой были рассчитаны спектры мощности флуктуаций реликтового излучения на небе, которые впоследствии были подтверждены и измерены с высочайшей точностью наземными и стратосферными экспериментами и космическими миссиями COBE (NASA, Нобелевская премия по физике 2006 г.), WMAP (NASA) и *Planck* (Европейское космическое агентство).

Флуктуации реликтового излучения – это результат развития первичных квантовых флуктуаций полей в ранней Вселенной. Как известно из квантовой механики, любое физическое поле в низшем энергетическом состоянии (физический вакуум) флуктуирует. Спектр этих флуктуаций формируется на квантовых (до-фридмановских) стадиях эволюции Вселенной (например, в модели инфляционной Вселенной). К началу классического (фридмановского) расширения первичные квантовые флуктуации имеют вид малых неоднородностей плотности. Флуктуации плотности характеризуются безразмерным отношением величины флуктуаций к среднему (невозмущенному) значению: $\Delta\rho/\rho$. В расширяющейся Вселенной первичные флуктуации эволюционируют особым образом (как было показано Е.М. Лифшицем в 1946 г.): те, размер которых больше причинно-связанной области (горизонта), не растут, а те, которые

находятся внутри горизонта – возрастают пропорционально размеру Вселенной.

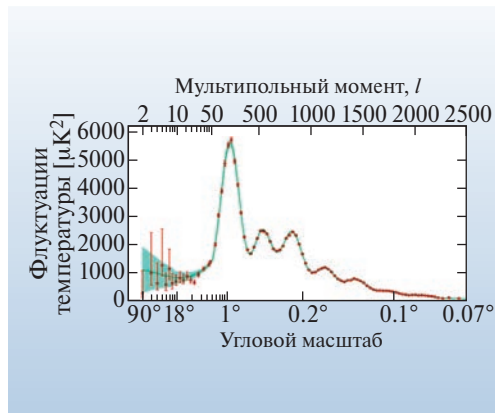
В настоящее время возмущения гравитационного потенциала в масштабах галактик составляют около одной сотысячной доли. Это означает, что для формирования крупномасштабной структуры Вселенной из роста первичных возмущений плотности требуется, чтобы возмущения в масштабах галактик “вошли” под горизонт, когда возраст Вселенной был 100 тыс. лет (еще до рекомбинации) и усилились не менее чем в 10 тыс. раз (за более подробным описанием этого явления можно обратиться к недавней статье В.Ф. Муханова).

Возмущения во Вселенной до эпохи рекомбинации, наполненной горячей плазмой и фотонами, носят характер звуковых волн, которые “бегают” со скоростью всего лишь в 3 раза меньше скорости света, независимо от их длины волны (частоты). Соответственно моменту “входа” под расширяющийся горизонт эти волны имеют разную длину – чем раньше, тем короче длина волны. Ясно, что самая длинная (низкая, “басовая” частота) будет у возмущения вблизи начала рекомбинации, т.е. с длиной волны порядка горизонта на момент рекомбинации, около 1 Мпк.

При этом возмущение плотности, создаваемое этой волной, будет и самым сильным, так как более высокочастотные колебания к моменту рекомбинации успевают немного затухнуть, потому что в плазме с излучением есть небольшая вязкость (в основном из-за фотонов, которые, рассеиваясь на электронах, не дают последним свободно двигаться) – так называемое “затухание Силка”. Размер самого большого возмущения в наше время будет “виден” на небе под углом примерно один градус.

Точное значение этого угла зависит от глобальной геометрии пространства Вселенной. Есть три варианта: плоское (Евклидово), в котором сумма углов треугольника равна 180 градусам; пространство положительной постоянной кривизны (двумерный аналог – поверхность сферы), в котором сумма углов треугольника больше 180 градусов; пространство постоянной отрицательной кривизны (пространство Лобачевского), в котором сумма углов треугольника меньше 180 градусов. Более того, амплитуда этой самой большой флуктуации фиксируется современным наблюдаемым значением возмущений в галактических масштабах и должна быть порядка одной сотысячной, потому что спектр первичных возмущений должен быть плоским, т.е. не зависящим от длины волны (спектр Харрисона-Зельдовича), что автоматически получается в модели инфляционной Вселенной (об этой модели

Акустические пики в наблюдаемом спектре мощности флуктуаций реликтового излучения. Первый пик ~ 1 градуса позволяет измерить пространственную кривизну Вселенной в больших масштабах (порядка 10^{28} см) и соответствует нулевой кривизне (т.е. плоскому пространству) с процентной точностью. По положению и амплитуде второго пика измеряется доля барионов (около 5%), а по третьему пику – доля невидимой “темной материи” (около 25%) во Вселенной. Остальные 70% плотности энергии во Вселенной приходится на “темную энергию”, отвечающую за современное ускоренное расширение Вселенной. Изображение: ESA, Planck Collaboration



можно более подробно узнать в книгах М.В. Сажина и Б.Е. Штерна).

Таким образом, после эпохи рекомбинации в реликтовом излучении, которое наблюдается сегодня, “отпечатываются” следы первичных квантовых возмущений во Вселенной. Эти следы расшифровываются по флуктуациям температуры реликтового фона в разных масштабах, которые отражают флуктуации плотности. Расчет наблюдаемых акустических пиков в флуктуациях температуры реликтового излучения с учетом многих физических эффектов и был впервые сделан в работе Дж. Пиблза и Юй Дзе-Тая, и – независимо – в работе Я.Б. Зельдовича и Р.А. Сюняева, вышедшей в том же 1970 г.

Работы Дж. Пиблза, несомненно, внесли значительный вклад в становление современной прецизионной космологии. Измерения спектра флуктуаций реликтового фона позволили наиболее точно определить количество барионной и невидимой темной материи, а также гипотетической “темной энергии”, отвечающей за современное ускоренное расширение Вселенной.

Кроме отмеченных работ по реликтовому излучению, Дж. Пиблз внес вклад в изучение образования крупномасштабной структуры Вселенной: галактик и скоплений галактик – в результате развития первичных флуктуаций плотности в модели холодной (нерелятивистской) темной материи (1982 г.), а также исследовал связь возможного ускоренного расширения Вселенной из-за наличия космологической постоянной с формированием и свойствами крупномасштабной структуры Вселенной (1984 г.) задолго до его открытия в конце XX века.

Подчеркнем, что в своих работах Дж. Пиблз опирался на физические идеи, параллельно разрабатываемые в 1960-е гг. в Советском Союзе: свойства и методы обнаружения реликто-

вого излучения обсуждались в 1964 г. в работе И.Д. Новикова и А.Г. Дорошкевича, флуктуации реликтового излучения впервые были предсказаны в работе А.Д. Сахарова в 1965 г., а их физика и наблюдаемые проявления – в упомянутой работе Я.Б. Зельдовича и Р.А. Сюняева. Работы Пиблза по ускоренному расширению Вселенной были во многом инициированы созданием модели инфляционной Вселенной (А.А. Старобинский, А.Д. Линде, А. Гус, П. Стейнхард и др.), в 1980-х гг. предсказывающей пространственно-плоскую Вселенную с критической плотностью. Подробнее об этом можно почитать в уже упомянутых книгах М.В. Сажина и Б.Е. Штерна, а также в “ЗиВ” № 6, 2019.

ЭКЗОПЛАНЕТЫ: ТАК ДАЛЕКО, ТАК БЛИЗКО

Теперь о второй части премии. О множественности миров наподобие нашего писал еще Джордано Бруно в 1584 г. Столетие спустя Исаак Ньютон признавал возможность существования планет как в Солнечной системе, так и вокруг других звезд.

Поиском планет у других звезд астрономы интересовались издавна. Кроме прямого наблюдения, которое крайне сложно ввиду малого блеска планеты, отражающей свет гораздо более яркой звезды, основной метод – динамический, т.е. использующий измерение периодических вариаций лучевой скорости звезды по доплеровскому смещению линий в ее спектре. Этот физический принцип весьма прост и основан на хорошо известных законах классической небесной механики. По амплитуде и периоду вариаций радиальных скоростей движения звезды можно оценить массу спутника (с точностью до угла наклона орбиты двойной системы к лучу зрения).

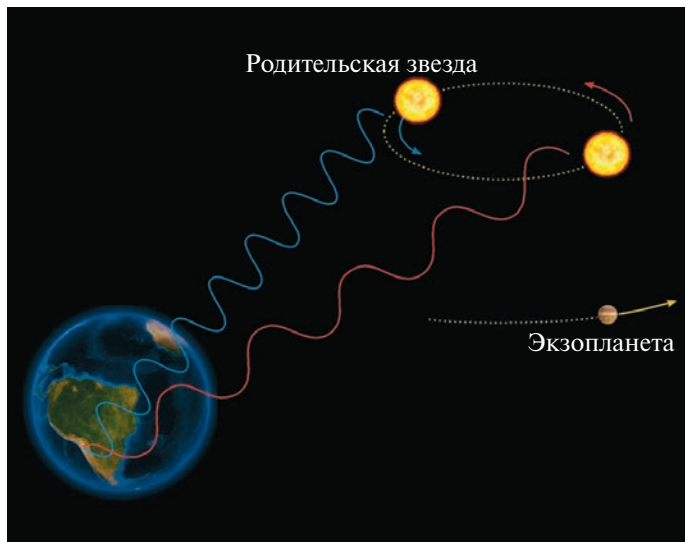


Иллюстрация детектирования экзопланет по доплеровским модуляциям лучевой скорости. Изображение: ESO

Спектроскопический метод для поиска планет вокруг других звезд был предложен О. Струве в 1952 г.

Первые планеты вне Солнечной системы (экзопланеты) были обнаружены динамическим методом не у обычных, а у нейтронных звезд – пульсаров, так как измерения времени прихода импульсов от пульсара (так называемый “пульсарный тайминг”) позволяют очень точно определить измерения лучевой скорости нейтронной звезды при наличии спутника. В 1992 г. радиоастрономы А. Вольщан (Польша) и Д. Фрейл (США) объявили об обнаружении сразу двух планет с массами около трех масс Земли вокруг пульсара PSR1957+12. В дальнейшем еще одна планета была найдена в системе вокруг PSR1957+12. Но это – необычная планетная система, формирование которой, вероятно, произошло из вещества, сброшенного во время вспышки сверхновой, породившей нейтронную звезду-пульсар.

Однако астрономам хотелось открыть планетную систему типа Сол-

нечной вокруг звезды, похожей на Солнце. Но даже для планет с массой Юпитера (около одной тысячной массы Солнца) динамический эффект крайне мал – например, в Солнечной системе орбитальное движение Юпитера смещает центр масс Солнца с амплитудой всего 12 м/с (амплитуда скорости центра масс Солнца из-за вращения Земли – 10 см/с). Основная проблема

для измерения такой скорости по эффекту Доплера состояла в том, что линии поглощения в спектрах звездных атмосфер значительно уширены из-за хаотических (турбулентных) движений газа, вращения звезды, а также из-за теплового движения атомов в атмосфере звезды (скорости порядка км/с).

Представим, что мы хотим измерить движение центра масс какой-нибудь звезды, вызванное наличием спутника с массой Юпитера. Для этого, по аналогии с Солнечной системой, потребуется измерить скорость порядка десятков метров в секунду (скажем, $v = 30$ м/с). Это означает, что доплеровское смещение линий будет порядка $\Delta\lambda/\lambda = v/c = 10^{-7}$. На видимых длинах волн 500 нм эта величина соответствует измерению абсолютных смещений линий в 5×10^{-5} нм! Как это можно сделать, ведь сами спектральные линии уширены раз в тридцать сильнее? На помощь приходит статистика – можно измерить смещение у тысяч линий, и тогда точность измерения возрастает как квадратный корень из числа линий.

Но и это не все. Ведь нужно еще и “привязать” линии к какому-нибудь

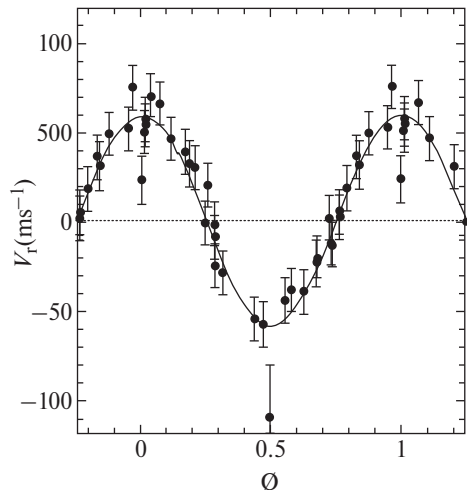
стандартному источнику. Для этого с конца 1980-х гг. в астрономических спектрографах высокого разрешения использовалась кювета с газом – фторидом водорода (весьма ядовит) или парами йода, применявшимися в лазерной спектроскопии в качестве источника опорных линий.

М. Майор и его аспирант Д. Кело совместно с французскими коллегами преодолели технические трудности и разработали новый эшелле-спектрограф ELODIE (главный разработчик – А. Баранн из Марсельской обсерватории), который позволял регистрировать доплеровские смещения спектральных линий поглощения в спектрах слабых звезд. В качестве опорного спектра использовалась не кювета с парами йода, а ториево-аргонная калибровочная лампа, свет которой подавался на дифракционную решетку по оптоволокну. Спектрограф ELODIE был установлен на 1.93-м рефлекторе обсерватории От-Прованс (Франция) в 1993 г. и позволял регистрировать лучевые скорости звезд солнечного типа с большим количеством линий поглощения в спектре с точностью 13 м/с.

В конце 1994 г. по движениям линий в спектре солнцеподобной звезды 51 Пегаса с периодом около 4 суток М. Майор и Д. Кело впервые обнаружили планету с массой порядка массы Юпитера, о чем и было объявлено 6 октября 1995 г. Но главным сюрпризом в этом открытии было то, что эта планета обращалась вокруг звезды с периодом всего около четырех дней, то есть находилась на расстоянии в сто раз ближе, чем Юпитер к Солнцу, и имела температуру в 10 раз больше юпитерианской! Это было совершенно неожиданно, так как современная теория образования планетных систем запрещает образование планет-гигантов на близких расстояниях от звезды (там слишком “горячо”).



1.93-м рефлектор обсерватории От-Прованс (Haute-Provence), Франция, установленный в 1958 г., со спектрографом ELODIE. На этом инструменте открыто 20 экзопланет (включая 51 Peg).
Изображение: Wikipedia



Кривая лучевых скоростей звезды 51 Пегаса. Рисунок из оригинальной работы М. Майор и Д. Кело (M. Mayor and D. Queloz, A Jupiter-mass companion to a solar-type star, Nature 378, 355 (1995))



Экзопланета 51 Пегаса b, иногда называемая Беллерофонт, в представлении художника. Планета обращается вокруг звезды, находящейся на расстоянии около 50 световых лет от Земли в созвездии Пегаса. Это первая экзопланета около солнцеподобной звезды, открытая в 1995 г. Двадцать лет спустя она стала первой экзопланетой, которую наблюдали спектроскопически в видимом диапазоне. Изображение: ESO/M. Kornmesser/Nick Risinger (skysurvey.org)

Так как технические сложности в определении лучевых скоростей звезд остались позади и динамический метод доказал свою работоспособность, вскоре после открытия Майора и Кело на многих обсерваториях последовало массовое обнаружение аналогичных экзопланет вокруг звезд типа Солнца. Эти планеты обладали похожими свойствами на систему 51 Пегаса. Было предложено объяснение образованию таких экзопланет – “горячих юпитеров” путем динамической “миграции” с периферии планетной системы, где они могут образовываться, на близкие околозвездные орбиты.

В настоящее время известно свыше 4000 экзопланет и заподозрено свыше 3000 планетных систем вокруг звезд, открываемых различными методами наземными и космическими обсерваториями (спутники COROT, *Kepler*, GAIA, TESS), и число их постоянно увеличивается. Динамическим методом по измерению лучевых скоростей звезд, впервые использованным Майором и Кело, в настоящее время открыто около 20% экзопланет. Сейчас основная часть экзопланет (около 77%) открывается методом транзитов – прохождением планеты по диску звезды, который успешно ищет планетные системы, видимые почти “с ребра”. При прохождении планеты по диску звезды ее блеск периодически уменьшается на время прохождения, которое зависит от массы планеты и радиуса ее орбиты. Кстати, метод транзитов для поиска экзопланет был предложен тем же О. Струве в 1952 г.

Кроме метода транзитов, для поиска экзопланет используются более рафинированные методы, включая метод гравитационного микролинзирования, получение прямых изображений экзопланет с помощью звездных коронографов и т.д. Более подробно о методах и результатах поиска экзопланет можно прочитать в предлагаемых книгах. Однако планетных систем – близнецов Солнечной системы до сих пор не найдено.

Таким образом, пионерское открытие М. Майора и Д. Кело положило начало новой эре в планетных исследованиях – физике и эволюции планетных систем вокруг звезд, а также поиску следов внеземной жизни на экзопланетах.

Литература

1. А.Н. Петров. Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор. Фрязино: Век-2, 2013.
2. А.Д. Чернин, А.М. Черепашук. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино: Век-2, 2007 (2-е изд., – 2020).
3. В.Ф. Муханов. Квантовая Вселенная. Успехи физ. наук, 186 (10) 1117–1125 (2016).
4. М.В. Сажин. Современная космология в популярном изложении. Едиториал УРСС, 2002.
5. Б.Е. Штерн. Прорыв за край мира. М.: Троицкий вариант, 2014.
6. <http://exoplanet.eu/>
7. А. Левин. Свита звезд: экзопланеты. Популярная механика № 1, 2009.
8. В.Г. Сурдин. Разведка далеких планет. М.: Физматлит, 2011.