

ние порядка $B^2/8\pi$, приложенное к кометной плазме. В итоге газ кометы образует гигантский плазменный хвост ничтожной плотности, не совпадающий с пылевым, длина которого может измеряться десятками миллионов километров.

Другая негравитационная сила, действующая на комету в целом, которая может медленно изменять параметры ее орбиты — это реактивная сила, связанная с неизотропным выбросом вещества ядром кометы при его нагреве или разрушении. Эта сила может также изменять скорость вращения ядер комет.

Таким образом, изучение Солнечной системы позволяет исследовать комплекс сложных физических явлений, приводящих к медленной эволюции как планет, так более мелких тел в околозвездном пространстве.

8.2. Методы обнаружения планет вокруг звезд

А) Динамический метод. Основан на измерении периодических вариаций лучевой скорости звезды по доплеровскому смещению линий в ее спектре при движении вокруг центра масс планетной системы. Это исторически первый (1995 г., система 51 Peg) и наиболее продуктивный метод обнаружения планет вокруг звезд.

Рассмотрим планету массой M_p на круговой орбите вокруг центральной звезды массой M_* . Период обращения планеты $P = 2\pi/\omega$, полуось орбиты a , наклонение орбиты i . Расстояние планеты до центра масс $a_p = aM_*/(M_p + M_*)$, а звезды — $a_* = aM_p/(M_p + M_*)$. Амплитуда лучевой скорости звезды, связанная с ее движением вокруг центра масс, равна

$$K_r = \omega \cdot a_* \sin i \approx (GM_*\omega)^{1/3} \left(\frac{M_p}{M_*} \right) \sin i, \quad (8.1)$$

здесь мы воспользовались условием $M_* \gg M_p$ и выразили полуось орбиты через период с помощью 3-го закона Кеплера. Измерение положений большого числа линий поглощения в оптических спектрах звезд поздних классов (ГКМ) позволяет выявлять их вариации с точностью до $\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-8}$, т. е. измерять изменения лучевых скоростей звезд до нескольких метров в секунду (!) Из приведенной выше формулы следует, что измерение вариаций лучевых скоростей звезд с точностью до 1 м/с позволит выявлять наличие вокруг звезд типа

Солнца планет с массой 10 масс Земли $M_E \approx 3 \cdot 10^{-5} M_\odot$, обращающихся с периодом короче 5 дней:

$$P \lesssim 5(\text{сут}) \left(\frac{K_r}{1 \text{ м/с}} \right)^{-3} \left(\frac{M_p}{10 M_E} \right)^3 \left(\frac{M_*}{M_\odot} \right).$$

Однако обнаружение таким образом планет с массой менее $10 M_E$ крайне осложняется «шумом», связанным с турбулентным движением газа в фотосфере звезды, наличием пятен и особенно — акустических колебаний (p -мод), которые создают стохастический фон при измерении лучевых скоростей звезд типа Солнца.

Хотя динамический метод может быть использован независимо от расстояния до звезды, для поиска планет выбирают достаточно яркие звезды, чтобы получить спектры с большим отношением сигнала к шуму. Перспективы метода связаны с увеличением точности измерения лучевых скоростей до 0.1 м/с на крупных 6–8 м телескопах с использованием нового поколения ИК спектрографов с высоким разрешением.

К динамическому методу также относится высокоточное измерение периодических пульсаций (тайминг) от звезды, вокруг которой обращаются планеты. Такие измерения возможны для радиопульсаров — быстровращающихся нейтронных звезд. Пульсары — природные «часы», замедление «хода» которых происходит с характерным временем в миллионы лет, а для некоторых типов старых пульсаров (миллисекундных) — в миллиарды лет. По наблюдениям измеряют доплеровское изменение времени прихода импульсов из-за движения нейтронной звезды вокруг общего центра масс с периодом P . При этом используется та же формула для эффекта Доплера $(\Delta t/P) = (K_r/c)$. Как видно из формулы (8.1), для пульсара с характерной массой $M_* = 1.3 M_\odot$ периодические остаточные отклонения времени прихода импульсов при обращении планеты с массой M_p на круговой орбите, видимой с ребра ($i = 90^\circ$),

$$\Delta t \simeq 1.2(\text{мс}) \left(\frac{M_p}{M_E} \right) \left(\frac{P}{1 \text{ год}} \right)^{2/3}. \quad (8.2)$$

Тайминг пульсаров выявил три планеты с массой порядка нескольких масс Земли вокруг миллисекундного пульсара PSR 1257+12. Невидимый спутник с массой в несколько раз большей, чем масса Юпитера, обнаружен вблизи двойного пульсара PSR B1620-26 в ша-

ровом скоплении М4. Это или планета-гигант, или коричневый карлик, динамически захваченный пульсаром в плотном звездном скоплении.

Б) Астрометрический метод. Он заключается в высокоточном измерении небесных координат звезд и поиске периодических смещений, вызванных их движением вокруг центра масс планетной системы. Из-за наличия планеты положение звезды на небе будет описывать относительно центра масс системы «звезда–спутник» периодический эллипс с большой полуосью

$$\frac{\alpha}{1''} = \frac{M_p}{M_*} \cdot \frac{a}{1 \text{ а. е.}} \left(\frac{d}{1 \text{ пк}} \right)^{-1}. \quad (8.3)$$

Метод может применяться только для близких звезд. Для типичных значений параметров планетных систем и расстояний в несколько парсек размеры эллипса составляют десятки микросекунд дуги. Достижение такой точности в оптическом диапазоне при наблюдениях с Земли осложнено турбулентностью атмосферы, поэтому основные надежды на подобные измерения возлагаются на будущие космические проекты.

Проект NASA космического 9-метрового интерферометра SIM (2011–2016) предполагает астрометрическое измерение положений звезд ярче $V = 10^m$ с точностью до 1.5 мкс дуги. Такая точность позволит провести целенаправленные поиски планет земной группы с массой около $\sim 3M_E$, вращающихся на расстояниях от 0.1 до 2 а. е. (т. е. видимых на угловых расстояниях порядка 0.3 секунды дуги) вокруг примерно 250 звезд спектральных классов AFGKM, специально отобранных внутри области радиусом 20 пк.

Более отдаленный проект ESA — инфракрасный космический интерферометр «Дарвин» предполагает запуск на околосолнечную орбиту от 4 до 6 охлаждаемых до 40 К 1.5-метровых зеркал, составляющих интерферометр с базой до 50 м. Предполагается измерение ИК-спектров планет земной группы вокруг 100–200 звезд на расстояниях до 15–20 пк в диапазоне 6–17 мкм, в котором наиболее заметны линии молекул H_2O , CH_4 , O_3 и CO_2 .

В) Фотометрический метод. Заключается в измерении периодических фотометрических вариаций блеска звезды при прохождении планеты по ее диску. Был предложен Струве в 1952 г., однако считался менее предпочтительным перед динамическими методами. В

первом приближении амплитуда изменения блеска звезды при прохождении планеты по ее диску дается выражением

$$\frac{\Delta L}{L} \simeq \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2,$$

где R_* и R_p — радиусы звезды и планеты, соответственно. Например, для системы Солнце–Юпитер эффект составляет около 2%. Радиус звезды можно оценить по спектральной классификации, а радиус планеты — по глубине затмения. По длительности затмения можно определить расстояние между звездой и планетой. В настоящее время этот метод считается наиболее перспективным для поиска планет земной массы и меньше. Первое обнаружение прохождения планеты по диску звезды имело место в 2000 г. (система HD 209458). Позднее этим методом было открыто еще несколько планет. Измерение массы динамическим методом и радиуса по затменным эффектам позволило оценить среднюю плотность планет ~ 0.2 – 1.4 г/см³. Эта плотность подтверждает (ожидаемый) газообразный состав гигантских планет (однако с внутренним ядром из жидкого водорода). Спектроскопические наблюдения прохождения планет по диску звезд дали возможность определить состав планетной атмосферы, в которой был обнаружен, в частности, водород и натрий. Узкополосная ИК-фотометрия во время затмения звезды планетой позволила найти температуру планетной атмосферы и выявила наличие в ней паров воды и метана. Замечателен случай планеты вокруг звезды HD 149026 с массой 1.21 массы Сатурна и высокой средней плотностью 1.4 г/см³ (в два раза выше плотности Сатурна). Такая высокая средняя плотность позволяет предположить наличие у этой планеты массивного ядра с массой около 70 масс Земли M_E .

Фотометрия наземными телескопами с точностью лучше 0.1% осложнена атмосферной турбулентностью, а также нестабильностью приемной аппаратуры и потоков от звезд сравнения, поэтому наиболее перспективными считаются космические проекты. Например, проекты «Кеплер» (NASA) и COROT (ESA) нацелены на фотометрический поиск планет с массой Земли вокруг звезд солнечного типа на расстояниях свыше 250 пк от Солнца.

Г) Микролинзирование. Этот метод использует эффект гравитационного линзирования света, проходящего вблизи тяготеющих тел. Метод состоит в измерении вариаций яркости звезды, которые происходят, если вблизи линии источник–наблюдатель (S–O) пролета-

ет тяготеющее тело (линза L). Яркость источника плавно возрастает, достигает максимума в момент наибольшего сближения линзы с линией $S-O$ (см. также рис. 11.8 в главе 11). Увеличение яркости происходит из-за отклонения лучей источника полем тяготения линзы и не зависит от длины волны.

Количественно, точечная линза, расположенная на расстоянии D_L от наблюдателя, характеризуется т. н. «радиусом Эйнштейна–Хвольсона»

$$R_E = \sqrt{\frac{4GM_L (D_S - D_L)D_L}{c^2 D_S}} \simeq 8(\text{АЕ}) \left(\frac{M_L}{M_\odot}\right)^{1/2} \left(\frac{D_S}{8 \text{ кпк}}\right)^{1/2} [(1-d)d]^{1/2} \quad (8.4)$$

(D_S — расстояние до источника, $d = D_L/D_S < 1$). Физический смысл этого параметра состоит в том, что при пересечении точечной линзой оси $S-O$ изображение источника превращается в кольцо с радиусом R_E , а поверхностная яркость его неограниченно возрастает. В реальных ситуациях яркость максимально возрастает при наибольшем сближении линзы с осью $O-S$. Угловое расстояние, под которым виден радиус R_E , равно

$$\theta_E = R_E/D_L \simeq 0.001'' \left(\frac{M_L}{M_\odot}\right)^{1/2} \left(\frac{D_L}{8 \text{ кпк}}\right)^{-1/2} (1-d)^{1/2}.$$

Вероятность микролинзирования возрастает в направлении на наиболее плотно заселенные звездами области, например, область галактического балджа или Магеллановы Облака (проекты EROS, OGLE, MACHO, DUO). Начиная с 1993 г., когда стало технически возможным проводить одновременную фотометрию миллионов звезд, наблюдались несколько сотен событий микролинзирования.

Если линза одиночная, то кривая блеска при прохождении линзы симметрична. Ее длительность определяется скоростью движения линзы и ее массой, $t_E = R_E/v_L$. Для скоростей v_L порядка 200 км/с (дисперсия скоростей звезд в галактическом балдже) длительность одного события микролинзирования на звездах галактического балджа составляет около 70 дней.

Если линза имеет спутник (планету), то гравитационное поле планеты дополнительно линзирует свет от источника, и на кривой блеска могут возникнуть резкие пики (см. рис. 8.1) длительностью

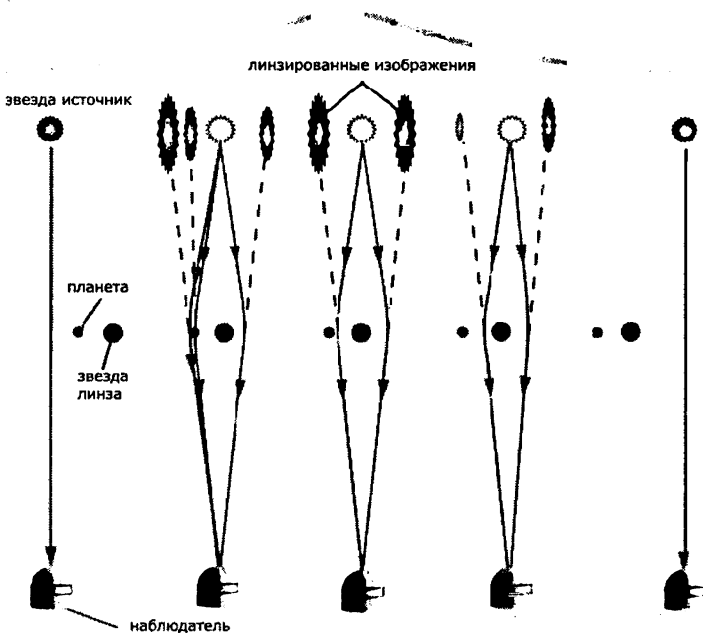


Рис. 8.1. Эффект микролинзирования на двойной линзе. Наличие спутника (планеты) приводит к появлению на кривой блеска дополнительных пиков яркости (кривая вверх).

от нескольких часов до нескольких суток, в зависимости от расстояния планеты до линзы (периода ее обращения) и отношения масс M_p/M_L . Расчеты показывают, что эффект максимален при расстояниях между планетой и линзой от 0.6 до 1.2 R_E ($\sim 6-10$ а. е.), то есть в диапазоне характерных размеров планетных орбит вокруг звезд типа Солнца. Этим методом в 2004–2005 гг. впервые были обнаружены 4 планеты с массами от нескольких процентов до 1.5 масс Юпитера и периодами обращения порядка 10 лет (рис. 8.2).

Недостаток метода — уникальность наблюдения каждого события микролинзирования. Достоинство — обнаружение планет вокруг звезд (или даже одиночных) на больших расстояниях от Солнца (радиус R_E для линзы максимален при ее положении строго посередине между источником и наблюдателем).

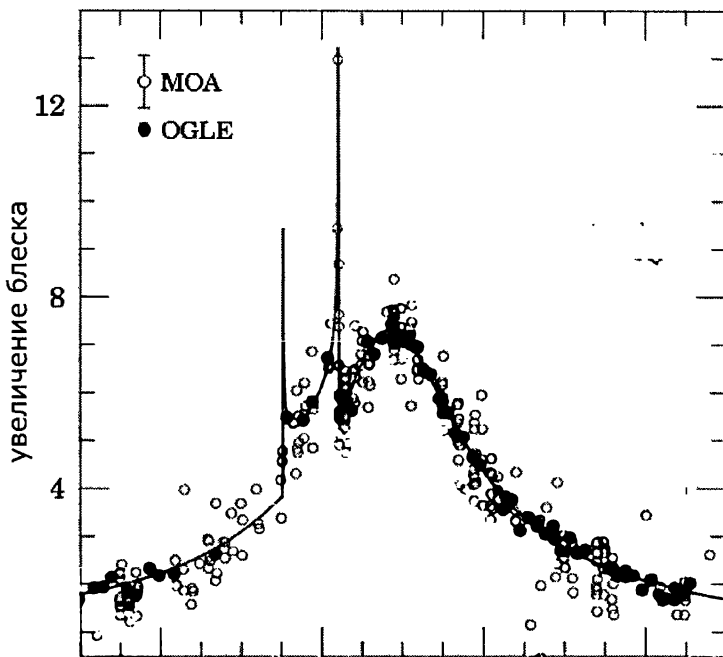


Рис. 8.2. Кривая блеска первой открытой методом микролинзирования планеты OGLE 2003–BLG–235/MOA 2003–BLG–53. Темные кружки – наблюдения проекта OGLE, светлые кружки – наблюдения группы MOA. Сплошная кривая – моделирование линзой с планетой $M_p/M_L = 0.4\%$ ($M_p = 1.5M_J$) на расстоянии 3 а. е. от линзы. Линза – К-карлик с $M = 0.36M_\odot$ на расстоянии 5.2 кпк. Одно деление по горизонтальной оси соответствует пяти суткам. Из работы Bond et al., *Astrophys. J.*, 606, L155–L158 (2004).

8.3. Статистические зависимости экзопланет

Анализ данных для ~ 200 экзопланет приводит к ряду интересных закономерностей.

А) Более 7% звезд поздних спектральных классов (F–M) имеют гигантские планеты на орбитах между 1 и 5 а.е.

Б) Распределение масс планет следует закону $dN/dM \sim M^{-1}$. Минимальная масса $M_p \sin i$ порядка нескольких масс Земли, максимальная – свыше 15 масс Юпитера M_J (рис. 8.3). Верхняя граница масс экзопланет, выводимая из наблюдений лучевых скоростей,