

УДК 524.6

ПРОГНОЗЫ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ПОПУЛЯЦИИ ПЛАНЕТ-СТРАННИКОВ МЕТОДОМ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ МИССИЙ K2 И SPITZER

© 2017 Л. Хамолли^{1**}, Ф. Де Паолис², М. Хафизиди¹, А. А. Нучита²

¹Университет, Тирана, Албания

²Университет Саленто, Лечче, 73100 Италия

Поступила в редакцию; принята в печать

Девятая миссия K2 (K2C9) спутника Kepler, целью которой являются наблюдения событий микролинзирования в направлении галактического балджа, началась 7 апреля 2016 г. и продолжится около трех месяцев. Впервые будут измерены массы планет-странников (ПС) — членов большой популяции изолированных темных маломассивных удаленных объектов нашей Галактики. Наблюдения K2 пересекутся с наблюдениями случаев микролинзирования спутником Spitzer, которые стартуют в июне 2016 г. Таким образом, можно будет одновременно наблюдать одни и те же события микролинзирования с помощью наземного телескопа и двух спутников. Это поможет убрать двукратное вырождение прицельного параметра и оценить массу ПС, если измерен угловой радиус Θ_E кольца Эйнштейна. В данной работе мы вычисляем вероятность обнаружения события микролинзирования двумя или более телескопами и изучаем ее зависимость от показателя функции масс ПС и положения наблюдателей на орбите.

Ключевые слова: *гравитационное линзирование: микро — планеты и спутники*

1. ВВЕДЕНИЕ

Гравитационное микролинзирование является практически единственным инструментом исследования популяции планет-странников (ПС) в нашей Галактике, так как оно не зависит от мощности потока линзирующего объекта [1]. Для полного понимания формирования и эволюции планетных систем необходимо выяснить, как часто встречаются ПС и какова их функция масс. Механизмы формирования ПС остаются открытым теоретическим вопросом в астрофизике. Возможно, эти объекты изначально сформировались в протопланетных дисках и были в дальнейшем выброшены из своих прародительских звездных систем. По другой версии ПС формируются в результате прямого коллапса молекулярных облаков. Суми и др. [2] проанализировали данные двухлетнего обзора по микролинзированию Microlensing Observations in Astrophysics (MOA). Они обнаружили избыток кратковременных событий длительностью менее двух дней по отношению к числу событий, ожидаемых на основании экстраполяции звездной

функции масс для маломассивных коричневых карликов с массой в диапазоне $10^{-5} - 10^{-2} M_{\odot}$.

Известен тот факт, что из анализа кривой блеска микролинзирования по Пачиньскому (в случае одной линзы) можно получить только три параметра: время максимального усиления t_0 , эйнштейновское время события $T_E = R_E/\nu_T$ (где R_E — эйнштейновский радиус, а ν_T — тангенциальная скорость между линзой и источником) и прицельный параметр u_0 (минимальное расстояние $u(t)$ между линзой и лучом зрения в направлении на источник в единицах R_E). Однако из этих параметров только время прохождения эйнштейновского радиуса T_E содержит информацию о линзе. Оно зависит от массы линзы M , ее расстояния от наблюдателя D_L и тангенциальной скорости линзы по отношению к лучу зрения ν_T . Это вырождение означает, что свойства линзы нельзя определить однозначно, несколько затрудняя интерпретацию результатов микролинзирования. Один из способов нарушить, по крайней мере, частично, вырождение параметров микролинзирования состоит в рассмотрении эффекта параллакса, вызванного движением наблюдателя.

В принципе существуют два способа наблюдать сдвиг, вызванный эффектом параллакса. В первом случае событие может наблюдаться по мере

*Текст был представлен авторами на английском языке.

**E-mail: lindita.hamolli@fshn.edu.al

орбитального движения Земли, которое создаёт сдвиг относительно простого прямого движения между источником и линзой. Во втором случае два наблюдателя, находящиеся в разных местах и смотрящие одновременно в направлении одного события, могут сравнить свои наблюдения.

В настоящей работе нас интересуют только события, вызванные ПС, которые являются изолированными линзами. Мы покажем, что комбинацию наземных и космических наблюдений можно успешно использовать для определения массы ПС. Так как миссия K2C9 и Spitzer будут наблюдать в направлении галактического балджа, основная цель данной работы состоит в определении вероятности того, что событие микролинзирования, вызванное ПС, можно обнаружить наземными и космическими телескопами.

Статья организована следующим образом: в разделе 2 мы кратко описываем концепцию эффекта параллакса микролинзирования, необходимую для понимания последующих разделов статьи, а в разделе 3 мы представляем краткий обзор спутников Kepler и Spitzer. В разделе 4 представлены параметры событий микролинзирования, смоделированные методом Монте-Карло. Результаты вычислений вероятности обнаружения событий представлены в разделе 5, а в разделе 6 мы обобщаем наши основные выводы.

2. ЭФФЕКТ ПАРАЛЛАКСА СОБЫТИЯ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ

Эффект параллакса, последовательная деформация кривой блеска по Пачиньскому, действительно был обнаружен в результате наземных наблюдений некоторых событий, в частности, долгосрочных (см., например, [3–5] и ссылки в этих работах). В случае коротких событий микролинзирования, например, тех, что вызваны ПС, отклонения кривой блеска движением Земли малы и в целом необнаружимы. Однако ещё один способ оценки параллакса микролинзы π_E — это использование двух телескопов — одного на Земле, другого в космосе — при условии, что они наблюдают одно и то же явление микролинзирования одновременно.

Возможность измерить параллакс микролинзы путём одновременных наблюдений одного случая микролинзирования двумя наблюдателями, находящимися достаточно далеко друг от друга, была высказана Рефсдалом [6] и затем разработана Гольдом [7]. Эра космических наблюдений параллаксов микролинзирования началась десятилетия спустя с помощью спутника Spitzer при анализе события в Малом Магеллановом Облаке [8], а позднее была продолжена в 2014 г. в рамках проекта Spitzer для отслеживания событий микролинзирования, обнаруженных в направлении галактического балджа [9–12]. Этот наблюдательный проект

уже привёл к нескольким существенным результатам, доказывая важность такого рода измерений.

Угловой радиус кольца Эйнштейна Θ_E можно определить конечным числом проявлений источника в событиях микролинзирования [13]. Следовательно, масса линзы ПС M_{FFP} вычисляется по формуле: $M_{\text{FFP}} = \Theta_E / (\kappa \pi_E)$, где $\kappa \equiv 4G / (c^2 \text{ AU}) = 8.144 \text{ mas} / M_\odot$, а π_E — обратный эйнштейновский радиус R_E в астрономических единицах в плоскости наблюдателя:

$$\pi_E = \frac{\text{AU}}{r_E} = \frac{\text{AU}(1-x)}{R_E}.$$

Здесь $x = D_L / D_S$, а D_L , D_S — расстояния от наблюдателя до линзы и до источника соответственно. Простым совмещением предыдущих соотношений получаем формулу

$$M = \frac{c^2}{4G} r_E \Theta_E. \quad (1)$$

Таким образом, для того, чтобы определить массу линзы, крайне важно найти обе величины — Θ_E и r_E . При измерении r_E для коротких событий микролинзирования необходимо определить сдвиг максимума события t_0 , а также сдвиг u_0 на кривых блеска, наблюдаемых в двух (или более) положениях. Эти наблюдения позволяют определить отношение D_\perp (проекция расстояния между двумя телескопами и плоскостью наблюдателя) к r_E , т.е.

$$\frac{D_\perp}{r_E} = \Delta u = \left(\frac{\Delta t_0}{t_E}, \Delta u_0 \right) = \frac{d_\perp}{R_E}. \quad (2)$$

Здесь d_\perp — проекция расстояния в плоскости линзы между двумя рассматриваемыми телескопами. Параллакс микролинзы π_E задаётся выражением

$$\pi_E = \frac{\text{AU}}{r_E} = \frac{\text{AU} \Delta u}{D_\perp} = \frac{\text{AU}}{D_\perp} \left(\frac{\Delta t_0}{t_E}, \Delta u_0 \right).$$

Если значение D_\perp достаточно велико, кривые блеска события, видимого двум наблюдателям, покажут заметное различие в значении параллакса [14]. Следовательно, измеряя разность прицельных параметров $\Delta u_0 = |u_{0,\oplus} \pm u_{0,\text{sat}}|$, а также задержку времени между пиками усиления $\Delta t_0 = t_{0,\oplus} - t_{0,\text{sat}}$ кривых блеска, детектируемыми двумя наблюдателями, можно измерить компоненты $\Delta u = \left(\frac{\Delta t_0}{t_E}, \Delta u_0 \right)$, а, значит, r_E и π_E (т.к. вектор расстояния D_\perp известен). Следует принимать во внимание двойное вырождение Δu_0 : «±» зависит от того, лежат ли Земля и спутник на одной «−» или на противоположной «+» сторонах направления движения линзы. Таким образом, значение r_E нельзя однозначно определить.

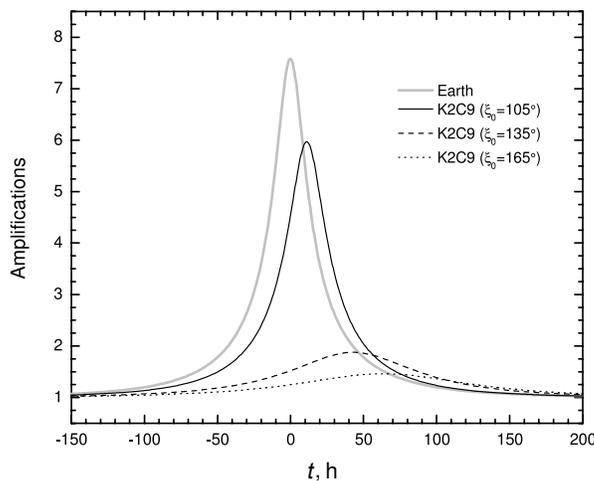


Рис. 1. Модельные кривые блеска для события с эйнштейновским временем $t_E \simeq 76$ часов ($M_{\text{FFP}} \simeq 4 \times 10^{-3} M_{\odot}$, $D_L \simeq 3.1$ кпк и $u_0 \simeq 0.1331$) по наблюдениям наземного телескопа и K2 для разных значений ξ_0 : $\xi_0 = 105^\circ$ ($D_{\perp} = 0.1265$ а.е.), $\xi_0 = 135^\circ$ ($D_{\perp} = 0.3437$ а.е.) и $\xi_0 = 165^\circ$ ($D_{\perp} = 0.4734$ а.е.). Кривая, наблюдаемая наземным телескопом (сплошная серая линия) одинакова во всех трёх случаях, а кривая, наблюдаемая K2C9, отличается (чёрные линии) и зависит от значения ξ_0 (указано в скобках).

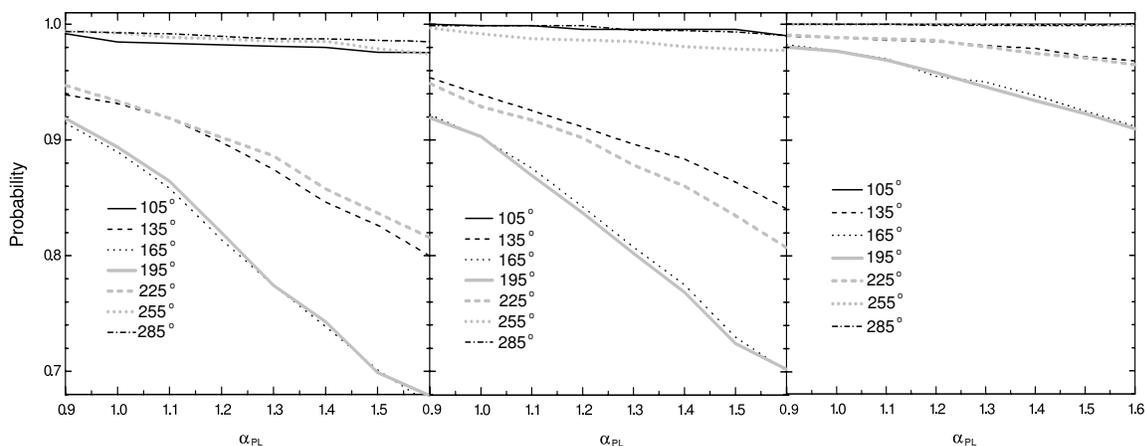


Рис. 2. Вероятность для разных значений ξ_0 (от $\xi_0 = 105^\circ$ до $\xi_0 = 285^\circ$) того, что событие микролинзирования, вызванное ПС, обнаружимо на Земле и K2C9, в зависимости от α_{PL} для трёх разных распределений ПС: тонкий диск (слева), толстый диск (в центре) и балдж (справа).

2.1. Обзор миссий спутников

В данном разделе мы приводим описание двух космических телескопов, с помощью которых будет осуществляться мониторинг событий микролинзирования одновременно с наземными телескопами.

Kepler движется вместе с Землёй по орбите вокруг Солнца. Его основная миссия состояла в исследовании демографии экзопланет транзитным методом. Механический отказ второго из его четырёх реактивных колёс в 2013 г. повлёк за собой завершение основной миссии, но предвосхитил начало расширенной миссии K2. Результатом миссии K2C9 с 7 апреля по 1 июля 2016 г. будет первый

обзор событий микролинзирования, который охватит $3.74 \square^\circ$. Планируется масштабное вовлечение в проект наземных телескопов [15]. В ходе одиннадцатой миссии K2 также осуществит наблюдения в направлении галактического балджа с 24 сентября по 8 декабря 2016 г.

Миссия K2C9 будет продолжаться около трех месяцев, и этот наблюдательный период совпадает с наблюдениями *Spitzer* в июне 2016 г. по проекту отслеживания событий микролинзирования (напомним, что должно быть учтено ограничение видимости *Spitzer* в направлении балджа). Впервые появится возможность наблюдать одновременно

одни и те же события микролинзирования с Земли и с двух спутников на орбите.

Spitzer был первым спутником, использовавшимся для проведения мониторинга событий микролинзирования в реальном времени совместно с наземными инструментами [8]. В ходе выполнения программы 2014 г. спутником были измерены параллаксы микролинзирования для одиночной звезды [16] и для планетной системы [17]. Более длительная 832-часовая программа осуществлялась в 2015 г., в результате было открыто большое количество популяций астрофизических объектов. Две дополнительные программы *Spitzer* будут осуществляться в 2016 г.: одна для исследования галактического распределения экзопланет с помощью событий микролинзирования с большим усилением [11], другая — для проведения эксперимента по детектированию случаев микролинзирования с помощью двух спутников [15] совместно с миссией *K2C9*.

Оба спутника — *K2* и *Spitzer* — движутся по гелиоцентрической орбите. Экваториальные координаты в сторону галактического балджа по лучу зрения *K2C9* следующие: $(RA, Dec) = (17^h56^m54^s, 28^d22^m5^s)$. Можно рассчитать проекцию расстояния D_{\perp} между Землей и каждым из двух спутников так, как она видна из центра поля зрения *K2C9*. Поскольку *K2* движется по гелиоцентрической орбите на расстоянии примерно 0.5 а.е. от Земли, можно вычислить D_{\perp} во время выполнения программы *K2C9*: $0.12 \leq D_{\perp}/a.e. \leq 0.49$. Спутник *Spitzer* движется на расстоянии примерно 1.48 а.е. от Земли и в силу ограничений по углу вектора на Солнце совместная работа спутников *Kepler* и *Spitzer* будет происходить в последние две недели миссии *K2C9*.

3. ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ КРИВЫХ БЛЕСКА

Так как параметры системы Земля—Солнце и координаты звезды-источника известны с высокой точностью, мы можем с достаточной степенью достоверности смоделировать кривые блеска события микролинзирования, вызванного ПС, для земного наблюдателя и для одного из космических телескопов.

Как показано в работе [18], положение звезды-источника описывается параметрами ϕ, χ , которые дают соответственно долготу, измеренную в плоскости эклиптики от перигелия в сторону движения Земли, и широту, измеренную от плоскости эклиптики в сторону северной точки эклиптики. Траектории движения Земли и космических телескопов могут быть спроецированы на плоскость линзы.

Координаты Земли в плоскости линзы задаются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \rho [-\sin \chi \cos \phi (\cos \xi(t) - \varepsilon) \\ &\quad - \sin \chi \sin \phi \sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin \xi(t)], \\ x_2(t) &= \rho [-\sin \phi (\cos \xi(t) - \varepsilon) \\ &\quad + \cos \phi \sqrt{1 - \varepsilon^2} \sin \xi(t)], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\rho = \frac{a_{\oplus}(1-x)}{R_E} = \frac{a_{\oplus}(1-x)}{r_E(1-x)} = \frac{a_{\oplus}}{r_E}$ — есть длина большой полуоси орбиты Земли в проекции на плоскость линзы, измеренная в радиусах Эйнштейна. Здесь a_{\oplus} — большая полуось орбиты Земли, $\varepsilon = 0.0167$ — эксцентриситет земной орбиты, а ξ — параметр, связанный с временем через соотношение $t = \sqrt{\frac{a_{\oplus}^3}{GM_{\odot}}} (\xi - \varepsilon \sin \xi)$.

Мы предполагаем, что событие микролинзирования обнаружимо, если есть по крайней мере восемь последовательных точек с усилением больше, чем порог усиления. Разумеется, пороговое усиление зависит от конкретного телескопа. Для наземных наблюдений мы предполагаем, что пороговое усиление есть минимальное значение пикового усиления событий *OGLE*, обнаруженных в ходе выполнения проекта 2015 г., т.е. $A_{th-E} = 1.028$. Это значение соответствует событиям с прицельным параметром больше $u_{0,\oplus} = 2.5$.

Если говорить о номинальных значениях миссии *Kepler*, то фотометрическая точность *K2C9* стала хуже в 3–4 раза [19]. Поэтому для миссии *K2C9* мы принимаем пороговое усиление $A_{th-K2} = 1.004$.

Для наблюдений *Spitzer* мы принимаем значение $A_{th-S} = 1.066$ [20] в качестве порогового усиления, т.к. ошибка видимой величины составляет примерно 0.07.

Далее предположим, что один из космических телескопов — *Kepler* или *Spitzer* — наблюдает одновременно с наземным телескопом одно и то же событие микролинзирования в направлении галактического балджа. Экваториальные координаты поля *K2C9* составляют $(RA, Dec) = (17^h56^m54^s, 28^d22^m5^s)$, и источники находятся на расстоянии $D_S = 7-10$ кпк от Земли. Применяя обычные преобразования между системами координат, находим следующие значения для луча зрения *K2C9* в направлении галактического балджа: $\phi \simeq 166.7^\circ$ и $\xi \simeq -4.9^\circ$.

Далее мы генерируем методом Монте-Карло события микролинзирования, вызванные ПС, и вычисляем кривые блеска, как они были бы видны двумя телескопами. В частности:

1) Расстояние ПС от Земли D_L получено на основании пространственных распределений ПС в диске и в балдже вдоль луча зрения в направлении на галактический балдж. Считается, что пространственное распределение ПС аналогично распределению звёзд, описанному в [21–23], вдоль луча зрения К2С9 в направлении галактического балджа. Мы предполагаем, что частота наблюдений составляет 30 мин.

2) Расстояние до источника D_S получаем из распределения вероятности, учитывая пространственно распределение звёзд галактического балджа:

$$f(x, y, z) \sim e^{-s^2/2}$$

при

$$s^4 = (x^2/a^2 + y^2/b^2)^2 + z^4/c^4 S,$$

$a = 1.49$ кпк, $b = 0.58$ кпк и $c = 0.40$ кпк (детали см. в [23]).

3) Принимается, что прицельный параметр события u_0 (для наблюдений с Земли) равномерно распределён в интервале $[0, 2.5]$.

4) Относительную тангенциальную скорость ПС получаем из распределения Максвелла (как в [24–25]):

$$f(\nu_i) \propto \exp\left(-\frac{(\nu_i - \bar{\nu}_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), i \in (x, y, z), \quad (4)$$

где координаты (x, y, z) имеют начало в центре Галактики, а оси x и z направлены на Солнце и на северный полюс Галактики соответственно. Упомянем, что нас интересуют только компоненты скорости, перпендикулярные лучу зрения, а именно компоненты y и z . Для линз в галактическом балдже мы используем компоненты средней скорости $\bar{\nu}_y = \bar{\nu}_z = 0$ с дисперсией $\sigma_y = \sigma_z = 100 \text{ км с}^{-1}$; для линз в галактическом диске — компоненты средней скорости $\bar{\nu}_y = 220 \text{ км с}^{-1}$, $\bar{\nu}_z = 0$ с дисперсией скоростей $\sigma_y = \sigma_z = 30 \text{ км с}^{-1}$ для тонкого диска и $\sigma_y = \sigma_z = 50 \text{ км с}^{-1}$ для толстого диска. Так как Земля, К2 и Spitzer лежат в плоскости эклиптики, а поля микролинзирования в балдже обычно близки к эклиптике (менее 5°), повернём систему координат yOz на 60° (на угол между эклиптикой и плоскостью Галактики), чтобы согласовать ее с системой координат $x2Ox1$, полученной в плоскости линзы Домиником [18]. Таким образом, мы можем определить угол Ψ в плоскости линзы, который задает относительную ориентацию ν_T к системе Солнце–Земля.

5) Массу линзы генерируем случайным образом, получая M из распределения вероятности на основе функции масс, определённой Суми и др. [2], т.е. $\frac{dN}{dM} = k_{PL} M^{-\alpha_{PL}}$, с показателем функции масс α_{PL} в диапазоне $[0.9–1.6]$.

Мы по отдельности промоделировали 1000 событий микролинзирования, вызванных популяцией ПС в галактическом балдже, тонком и толстом дисках. Кривые блеска событий, наблюдаемых с Земли и космическим телескопом, были промоделированы с учётом движения наблюдателей вокруг Солнца. Для промоделированных событий мы предполагаем вероятность, которая основана на рассуждениях в разделе 2, что рассматриваемый телескоп находится на той же (или противоположной) стороне направления движения ПС. Так как координаты наблюдателей в плоскости линзы известны, можно вычислить значение прицельного параметра для другого наблюдателя. Если два наблюдателя находятся на одной и той же стороне, получаем $\Delta u_0 = |u_{0,\oplus} - u_{0,\text{sat}}|$, а если наблюдатели находятся на противоположных сторонах, находим $\Delta u_0 = |u_{0,\oplus} + u_{0,\text{sat}}|$.

Одно событие можно обнаружить, если есть по крайней мере восемь последовательных точек с усилением больше порогового. Таким образом, одно событие микролинзирования будет наблюдаться на Земле и К2С9 тогда, когда на каждой кривой блеска будет по меньшей мере восемь последовательных точек с усилением, которое больше соответствующего порога усиления.

Более того, для каждого события мы вычислили Δu_0 , Δt_0 и затем Δu , как было показано выше. Наши модели строились для случая, когда наблюдения проведены при некоторых положениях телескопов на орбите. Так как наземные наблюдения микролинзирования будут проводиться с марта по октябрь, а наблюдения К2 — с апреля по июль и затем с сентября по декабрь, мы рассматриваем такие положения Земли на орбите, при которых галактический балдж будет виден с Земли и с К2. Они задаются определёнными значениями параметра ξ на пике усиления: $\xi_0 = 105^\circ$, $\xi_0 = 135^\circ$, $\xi_0 = 165^\circ$, $\xi_0 = 195^\circ$, $\xi_0 = 225^\circ$, $\xi_0 = 255^\circ$, $\xi_0 = 285^\circ$.

4. ВЕРОЯТНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ

Так как проекция расстояния D_\perp между двумя телескопами меняется в ходе обзора К2С9, кривые блеска событий будут различаться в зависимости от значения ξ_0 . На рис. 1 показаны смоделированные кривые блеска для события микролинзирования, наблюдаемого с Земли и К2С9 для трёх значений ξ_0 : $\xi_0 = 105^\circ$, $\xi_0 = 135^\circ$ и $\xi_0 = 165^\circ$. Временной сдвиг пика усиления между

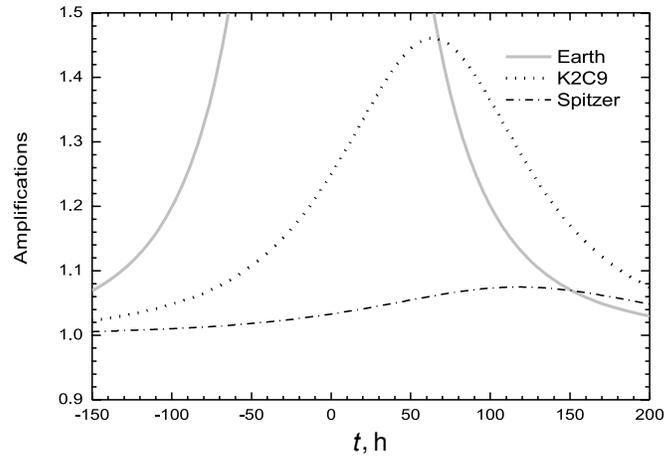


Рис. 3. Смоделированные кривые блеска при наблюдениях на трёх телескопах для значения $\xi_0 = 165^\circ$ ($D_{\perp(E-K)} = 0.4734$ а.е. и $D_{\perp(E-S)} = 0.9665$ а.е). Кривая, наблюдаемая с Земли, показана серой линией, кривая K2C9 — чёрный пунктир, кривая Spitzer — штрих-пунктир. Параметры события те же, что и на рис 1.

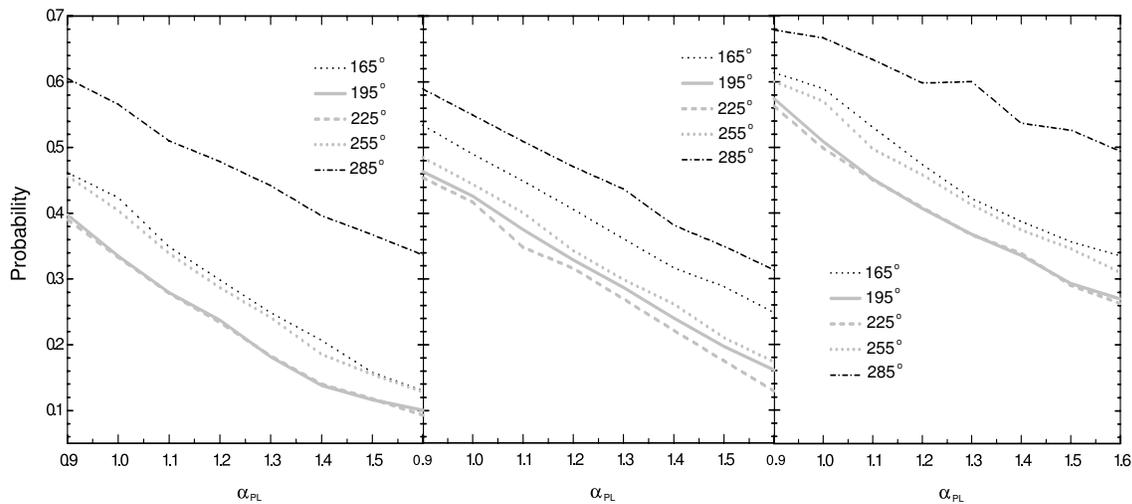


Рис. 4. Вероятность обнаружения с Земли и со спутника Spitzer события микролинзирования, вызванного ПС, для разных значений ξ_0 (от $\xi_0 = 105^\circ$ до $\xi_0 = 285^\circ$) в зависимости от α_{PL} для трёх разных распределений ПС, рассмотренных по отдельности: тонкий диск (слева), толстый диск (в центре) и балдж (справа).

кривыми, наблюдаемыми с Земли (серая линия) и K2C9 (черные линии) для $\xi_0 = 105^\circ$ составляет $\Delta t_0 \simeq 11.5$ часа ($\Delta u_0 = 0.3022$) (сплошная линия), для $\xi_0 = 135^\circ$ — $\Delta t_0 \simeq 43.5$ часа ($\Delta u_0 = 0.7353$) (штриховая линия), а для $\xi_0 = 165^\circ$ — $\Delta t_0 \simeq 64.3$ часа ($\Delta u_0 = 0.9945$) (пунктирная линия). Также для данного случая максимальное усиление уменьшается при возрастании ξ_0 . На рис. 1 ясно видно, что значения $\Delta u = \left(\frac{\Delta t_0}{t_E}, \Delta u_0 \right)$ увеличиваются с ростом D_{\perp} .

Мы вычисляем вероятность того, что событие микролинзирования детектируется двумя наблюдателями, в предположении обнаружимости события в случае если его кривая блеска содержит

по крайней мере восемь последовательных точек с усилением, превышающим пороговое усиление инструмента. На рис. 2 показана вероятность того, что для разных значений показателя функции масс событие микролинзирования можно обнаружить с Земли и K2C9. Мы рассматриваем три различных популяции ПС в предположении, что они распределены в тонком галактическом диске, в толстом диске или в галактическом балдже.

Как видно на рис. 2, для любой популяции ПС вероятность падает по мере возрастания показателя функции масс, и в начале K2C9 почти все события микролинзирования обнаружимы с Земли и с K2. Самая высокая вероятность получена для случая распределения ПС в галактическом балдже.

Далее мы рассматриваем вопрос о том, обна-

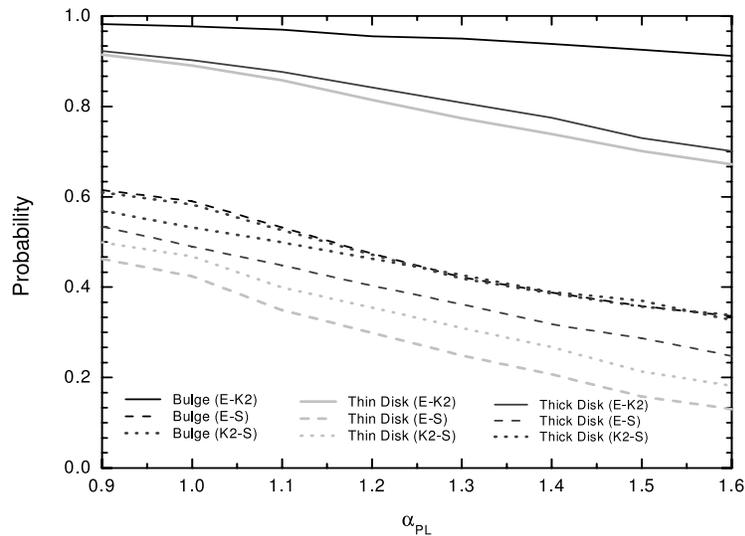


Рис. 5. Вероятность того, что событие микролинзирования, вызванное ПС, обнаружимо разными парами телескопов: Земля–K2C9 (сплошные линии), Земля–Spitzer (штриховые линии) и K2C9–Spitzer (пунктирные линии), в зависимости от α_{PL} во время двухнедельного пересечения наблюдений. Как обычно, мы рассматриваем три разных распределения ПС: балдж (чёрные кривые), тонкий диск (серые линии) и толстый диск (тёмно серые линии).

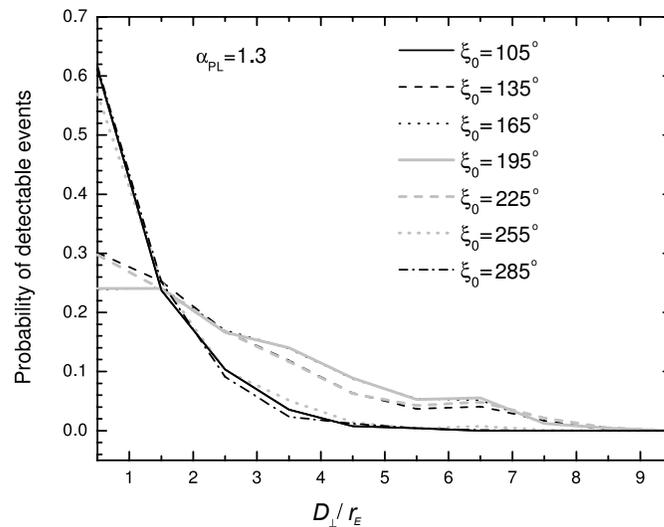


Рис. 6. Вероятность того, что событие микролинзирования, вызванное ПС, обнаружимо обоими телескопами, наземным и K2, в зависимости от D_{\perp}/r_E для разных значений ξ_0 при $\alpha_{PL} = 1.3$. Видно, что вероятность обнаружения событий с $D_{\perp} \leq 2r_E$ имеет максимум в начале программы K2C9 и спадает к ее окончанию.

ржимо ли событие, зарегистрированное на Земле и K2C9, также с помощью спутника Spitzer, и каков соответствующий временной сдвиг пика. На рис. 3 показаны кривые блеска, смоделированные для события микролинзирования с $\xi_0 = 165^\circ$, наблюдаемого с Земли, а также K2C9 и Spitzer. Видно, что появляется очевидный сдвиг максимума по времени. Сдвиг времени пика составляет 60 часов для наблюдений с конфигурацией Земля–K2C9 и примерно 120 часов в случае наблюдений события с конфигурацией Земля–Spitzer.

Мы также вычисляем вероятность того, что со-

бытие микролинзирования обнаружимо наземным телескопом и Spitzer. Наши результаты для трёх разных популяций ПС в зависимости от α_{PL} показаны на рис. 4.

Как хорошо видно на рис. 2 и рис. 4, вероятность обнаружения события микролинзирования двумя телескопами зависит от их положения на орбите. Для случая K2C9 пик вероятности приходится на $\xi_0 = 105^\circ$ (чёрная линия на рис. 2), а для K2C11 — на $\xi_0 = 285^\circ$. При наблюдениях Spitzer самая высокая вероятность получается при $\xi_0 = 285^\circ$ (штрих-пунктирная линия на рис. 4).

Так как наблюдения K2C9 и Spitzer будут пересекаться в течении двух недель, мы вычисляем вероятность того, что событие микролинзирования обнаружимо разными парами телескопов: Земля–K2C9, Земля–Spitzer и K2C9–Spitzer. Наши результаты для трёх разных популяций ПС в зависимости от α_{PL} показаны на рис. 5. Как можно видеть, для любой популяции ПС вероятность того, что событие микролинзирования обнаружимо двумя телескопами, выше для пары Земля–K2C9 и уменьшается для пары Земля–Spitzer.

Что касается вероятности того, что детектирование события, вызванного ПС, обнаружимо тремя телескопами (K2C9, Spitzer и наземным инструментом), она получается такой же, как и для пары Земля–Spitzer.

Ещё один интересный аспект миссии K2C9 состоит в том, что проекция расстояния D_{\perp} спутника Kepler от Земли монотонно растёт от 0.12 а.е до 0.49 а.е. На рис. 6 мы показываем вероятность обнаружения микролинзирования ПС в зависимости от D_{\perp}/r_E . Наши результаты приведены для случая ПС в тонком диске с индексом функции масс $\alpha_{PL} = 1.3$ для разных значений ξ_0 . Очевидно, что вероятность падает по мере возрастания отношения D_{\perp}/r_E для всех значений ξ_0 . Вероятность обнаружимости событий для $D_{\perp} \leq 2r_E$ с двух наблюдательных позиций будет больше в начале (чёрная линия) и меньше в конце (пунктирная линия) миссии K2C9.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы исследовали эффект параллакса событий микролинзирования в случае одновременного наблюдения одного и того же события двумя телескопами с главной целью определить вероятность того, что событие микролинзирования, вызванное ПС, обнаружимо одновременно наземным и космическим телескопами.

Фактически для описания популяции ПС важно измерить r_E и Θ_E ; в случае событий микролинзирования с конечным числом обнаружимых проявлений источника наблюдения параллаксов спутниками позволят измерить значение r_E .

Мы провели детальное моделирование наблюдений K2C9 и Spitzer при сопровождении наземными телескопами для прогнозирования вероятности обнаружения событий микролинзирования, вызванных планетами-странниками с массами в диапазоне 10^{-5} – $10^{-2} M_{\odot}$ [3].

Сначала мы вычислили вероятность того, что событие микролинзирования ПС обнаружимо наземным телескопом и K2C9. Вероятность детектирования обоими телескопами получилась выше в

начале наблюдений, с последующим спадом к их окончанию.

Мы также рассмотрели одновременные наблюдения событий микролинзирования наземным телескопом и спутником Spitzer. Получившаяся вероятность детектирования для этой пары телескопов ниже по отношению к предыдущему случаю, что вызвано более высокими значениями порогового усиления и проекции расстояния от Spitzer до Земли.

Мы вычислили вероятность того, что событие микролинзирования ПС можно обнаружить одновременно тремя телескопами (K2C9, Spitzer и наземный инструмент) с результатами, подобными случаю обнаружения парой Земля–Spitzer.

В ходе миссии K2C9 проекция удаления K2 от Земли D_{\perp} монотонно возрастает. Поэтому мы определили вероятность обнаружения случая микролинзирования парой телескопов Земля–K2 в зависимости от D_{\perp}/r_E (см. рис. 6). Наши результаты показывают, что вероятность уменьшается по мере возрастания D_{\perp}/r_E для всех значений параметра ξ_0 .

Кроме того, мы предсказали, что в начале миссии K2C9 примерно для 30% всех событий микролинзирования с конечным числом обнаружимых проявлений источника (см. также [26]) значение r_E можно измерить по результатам наблюдений парой телескопов Земля–K2C9. Таким образом, наземные и космические наблюдения одного и того же события микролинзирования могут помочь в определении масс ПС и в получении распределения ПС по всему Млечному Пути.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проектов INFN TAsP (Theoretical Astroparticle Physics Project) и «Euclid».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Paczynski, *Astrophys. J.* **304**, 1 (1986).
2. T. Sumi, K. Kamiya, A. Udalski, et al., *Nature* **473**, 349 (2011).
3. C. Alcock, R. A. Allsman, D. Alves, et al., *Astrophys. J.* **454**, 125 (1995).
4. M. C. Smith, S. Mao, and P. Woźniak, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **332**, 962 (2002).
5. A. A. Nucita, F. De Paolis, G. Inghrosso, et al., *Astrophys. J.* **651**, 1092 (2006).
6. S. Reisdal, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **134**, 315 (1966).
7. A. Gould, *Astrophys. J.* **421**, L75 (1994).
8. S. Dong, A. Udalski, A. Gould, et al., *Astrophys. J.* **664**, 862 (2007).
9. A. Gould, S. Carey, and J. Yee, *Spitzer Proposal*, ID 10036 (2013).

10. A. Gould, S. Carey, and J. Yee, Spitzer Proposal, ID 11006 (2014).
11. A. Gould, J. Yee, and S. Carey, Spitzer Proposal, ID 12015 (2015).
12. A. Gould, J. Yee, and S. Carey, Spitzer Proposal, ID 12013 (2015).
13. H. J. Witt, *Astrophys. J.* **449**, 42 (1995).
14. A. Gould, *Astrophys. J.* **392**, 442 (1992).
15. C. B. Henderson, M. Penny, R. A. Street, et al., arXiv:1512.09142 (2015).
16. J. Yee, A. Udalski, S. Calchi Novati, et al., *Astrophys. J.* **802**, 76 (2015).
17. A. Udalski, J. C. Yee, A. Gould, et al., *Astrophys. J.* **799**, 236 (2015).
18. M. Dominik, *Astrophys. J.* **329**, 361 (1998).
19. A. Vanderburg and J. A. Johnson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126**, 948 (2014).
20. A. A. Lanotte, M. Gillon, B.-O. Demory, et al., *Astron. and Astrophys.* **572**, 73 (2014).
21. G. Gilmore, R. F. G. Wyse, and K. Kuijken, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **27**, 555 (1989).
22. F. De Paolis, G. Ingrosso, and A. A. Nucita, *Astron. and Astrophys.* **366**, 1065 (2001).
23. M. Hafizi, F. De Paolis, G. Ingrosso, and A. A. Nucita, *Int. J. Mod. Phys. D* **13**, 1831 (2004).
24. Ch. Han and A. Gould, *Astrophys. J.* **447**, 53 (1995).
25. Ch. Han and A. Gould, *Astrophys. J.* **467**, 540 (1996).
26. L. Hamolli, M. Hafizi, F. De Paolis, and A. A. Nucita, *Advanced Astronomy* **2015**, ID 402303 (2015).

Перевод Е. Чмыревой

Predictions on the Detection of the Free-Floating Planet Population with K2 and Spitzer Microlensing Campaigns

L. Hamolli, F. De Paolis, M. Hafizi, and A.A. Nucita

The K2's Campaign 9 (K2C9) by the Kepler satellite for microlensing observations towards the Galactic bulge started on April 7, 2016, and is going to last for about three months. It offers the first chance to measure the masses of members of the large population of the isolated dark low-mass objects further away in our Galaxy, free-floating planets (FFPs). Intentionally, this observational period of K2 will overlap with that of the 2016 Spitzer follow-up microlensing project expected to start in June, 2016. Therefore, for the first time it is going to be possible to observe simultaneously the same microlensing events from a ground-based telescope and two satellites. This will help in removing the two-fold degeneracy of the impact parameter and in estimating the FFP mass, provided that the angular Einstein ring radius Θ_E is measured. In this paper we calculate the probability that a microlensing event is detectable by two or more telescopes and study how it depends on the mass function index of FFPs and the position of the observers on the orbit.

Keywords: gravitational lensing: micro—planets and satellites: general