

тивистской ($v/c \approx 1$) КС, обладающей дефицитом угла порядка $1-2''$, амплитуда генерируемой анизотропии порядка $(15-30)$ мкК.

Для того чтобы КС можно было искать как оптическими методами гравитационного линзирования, так и методом анализа анизотропии реликтового излучения, дефицит угла должен составлять от нескольких десятых долей секунды дуги ($\delta T/T \approx 1,5$) до $5-6''$ ($\delta T/T \approx 100$). Нижний предел определяется максимально доступным разрешением в оптическом диапазоне (HST) при поиске событий гравитационного линзирования галактик на струне. Верхний предел даёт величину анизотропии струны, сравнимую со стандартной анизотропией, вызванной адиабатическими возмущениями плотностей.

Также необходимо принять во внимание эффект запаздывания сигнала [22], обусловленный протяжённостью струны: если бесконечно длинная прямая струна движется на некотором расстоянии от наблюдателя, то он видит разные части струны в разные моменты времени.

5. Заключение

В развитие наблюдательных методов поиска КС внесли важный вклад следующие исследования.

Открыт и исследован двойной внегалактический источник CSL-1. Наблюдения на HST в 2006 г. смогли опровергнуть гипотезу КС, показав, что имеет место эффект проекции двух галактик с идентичными морфологиями и спектрами, обладающих близкими пекулярными скоростями. Тем не менее проделанная обширная теоретическая и наблюдательная работа впервые позволила создать достаточно полную модель гравитационного линзирования фоновых объектов на КС применительно к реальным наблюдениям, в особенности с использованием инструментов с высоким угловым разрешением.

Исследован квазар Q0957+561 A, B. Обнаружены аномальные флуктуации яркости в гравитационно-линзовой системе, одна из возможных причин возникновения которых — эффект гравитационного линзирования на КС.

Получены некоторые указания на наличие КС в данных спутника WMAP по исследованию анизотропии реликтового излучения. Определена структура анизотропии реликтового излучения, генерируемая движущейся с постоянной скоростью прямой КС. Количество струн, которые могут быть обнаружены оптическими методами, составляет 20 % от их общего числа, т.е. поиск в оптическом диапазоне должен быть с необходимостью дополнен анализом радиокарт анизотропии реликтового излучения. Для струн с дефицитом угла $1''-2''$ амплитуда генерируемой анизотропии составляет $15-30$ мкК (для струн с наиболее реалистичными энергиями ($10^{15}-10^{16}$ ГэВ) и соответствующими плотностями ($G\mu \propto 10^{-7}-10^{-6}$)). Для обнаружения струн двумя независимыми методами (оптическим и радиометодом) дефицит угла КС должен лежать в интервале от $0,1''$ до $5-6''$. Если КС может быть детектирована оптическими методами, то характерный размер "пятна" на карте анизотропии должен быть не менее $100''$.

Изучены поля HST (в совокупности 4,5 квадратных градуса) с целью поиска гравитационно-линзовых пар, сформированных прямыми длинными КС. Обнаружены четыре кандидата в гравитационные линзы, образован-

ные КС, однако пока доступной исследователям точности недостаточно для однозначного выяснения природы этих кандидатов.

Работа финансово поддержана грантом РФФИ 10-02-00961a, грантом Президента РФ МК-473.2010.2. Работа выполнена в рамках проекта Министерства образования и науки РФ 14.740.11.0085.

Список литературы

1. Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва* (М.: URSS, 2008) [Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Hot Big Bang Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)]; Горбунов Д С, Рубаков В А *Введение в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория* (М.: URSS, 2010) [Gorbunov D S, Rubakov V A *Introduction to the Theory of the Early Universe: Cosmological Perturbations and Inflationary Theory* (Singapore: World Scientific, 2011)]
2. Hindmarsh M, in *The Formation and Evolution of Cosmic Strings: Proc. of a Workshop Supported by the SERC and Held in Cambridge, 3-7 July, 1989* (Eds G W Gibbons, S W Hawking, T Vachaspati) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990) p. 527
3. Vilenkin A, Shellard E P S *Cosmic Strings and Other Topological Defects* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1994)
4. Davis A-C, Kibble T W B *Contemp. Phys* **46** 313 (2005); hep-th/0505050
5. Copeland E J, Myers R C, Polchinski J *JHEP* (06) 013 (2004); hep-th/0312067
6. Kibble T W B *J. Phys. A Math. Gen.* **9** 1387 (1976)
7. Vilenkin A *Phys. Rev. D* **23** 852 (1981)
8. Vilenkin A *Astrophys. J. Lett.* **282** L51 (1984)
9. Zeldovich Ya B *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **192** 663 (1980)
10. Allen B, Shellard E P S *Phys. Rev. Lett.* **64** 119 (1990)
11. Uzan J-P, Bernardeau F *Phys. Rev. D* **63** 023004 (2001); Bernardeau F, Uzan J-P *Phys. Rev. D* **63** 023004 (2001)
12. de Laix A A, Vachaspati T *Phys. Rev. D* **54** 4780 (1996)
13. Majumdar M, hep-th/0512062
14. Сажина О С, Сажин М В, Семенов В Н *ЖЭТФ* **133** 1005 (2008) [Sazhina O S, Sazhin M V, Sementsov V N *JETP* **106** 878 (2008)]
15. Lo A S, Wright E L, astro-ph/0503120
16. Sazhin M V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **376** 1731 (2007); astro-ph/0611744
17. Sazhin M et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **343** 353 (2003)
18. Sazhin M V et al., astro-ph/0601494
19. Morganson E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **406** 2452 (2010)
20. Gasparini M A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **385** 1959 (2008)
21. Stebbins A *Astrophys. J.* **327** 584 (1988)
22. Vilenkin A *Nature* **322** 613 (1986)

PACS numbers: **04.20.** – **q**, **97.82.** – **j**, 98.62.Sb
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201110g.1114

Поиски экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования

А.Ф. Захаров

1. Гравитационное линзирование: введение

В зависимости от масс гравитационных линз говорят о различных режимах гравитационного линзирования, причём различные режимы соответствуют различным угловым расстояниям между изображениями в предпо-

А.Ф. Захаров. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.А. Алиханова", Москва, РФ; Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., РФ
E-mail: zakharov@itep.ru

ложении, что и линзы, и источники находятся на космологических расстояниях от наблюдателя. В случае, когда гравитационная линза имеет характерную звёздную массу, такой режим называется гравитационным микролинзированием. Угловое расстояние между изображениями пропорционально корню квадратному от массы, поэтому линзирование для планеты с массой, несколько меньшей массы Земли ($10^{-6}M_{\odot}$, где M_{\odot} — масса Солнца), называется нанолинзированием.

Таким образом, поиски достаточно лёгких экзопланет с помощью гравитационного линзирования можно называть гравитационным нанолинзированием. Имеются различные методы поисков экзопланет, такие как измерения доплеровских смещений спектральных линий, транзиты, пульсарный тайминг и др. В настоящей статье показано, что гравитационное микролинзирование является одним из наиболее перспективных методов поиска экзопланет с массами порядка массы Земли M_{\oplus} на расстоянии порядка нескольких астрономических единиц (а.е.) от звезды и можно надеяться, что удастся обнаружить экзопланеты с температурой твёрдой поверхности в диапазоне $1-100^{\circ}\text{C}$ (т.е. с температурой воды в жидкой фазе).

Детальное обсуждение гравитационного линзирования можно найти в книге [1] (см. также обзор [2]). Тем не менее мы напомним основные сведения, а также приведём новые результаты, полученные в этой области.

Гравитационное линзирование основано на том, что в гравитационном поле лучи света искривляются. Можно говорить, что гравитирующее тело притягивает фотоны. Впервые искривление траекторий фотонов в гравитационном поле обсуждалось в книге И. Ньютона [3]. Такое искривление представляется вполне естественным выводом в рамках корпускулярной теории света, которой придерживался Ньютон. Первый вывод в рамках ньютоновской теории гравитации угла отклонения траектории движения фотона был опубликован известным немецким астрономом И. Зольднером [4].

В рамках общей теории относительности (ОТО) выражение для отклонения луча света в гравитационном поле было получено А. Эйнштейном [5]:

$$\Theta = \frac{4GM}{c^2 p}, \quad (1)$$

где M — масса гравитирующего тела, p — прицельный параметр, c — скорость света, G — гравитационная постоянная Ньютона. Если $M = M_{\odot}$ и $p = R_{\odot}$ (где R_{\odot} — радиус Солнца), то соответствующий угол отклонения луча света равен $1,75''$. В 1919 г. это предсказание было подтверждено при наблюдениях отклонения положения звёзд вблизи солнечного диска во время полного солнечного затмения. Наблюдения проводились на острове Принсипи (вблизи Южной Африки) и в деревне Собрал на северо-востоке Бразилии [6]. Однако ещё в течение нескольких десятилетий наблюдатели проверяли предсказания ОТО и иногда приходили к выводу, что эти предсказания не соответствуют наблюдательным данным, как в случае наблюдений Э. Фройндлиха за смещением звёзд во время полного солнечного затмения на Суматре в 1929 г. Тем не менее примерно к середине 1950-х годов учёные пришли к выводу о том, что в целом наблюдения соответствуют теоретическим предсказаниям об отклонении луча света в гравитационном поле [7].

Используя соотношение (1), можно ввести уравнение гравитационной линзы

$$\boldsymbol{\eta} = \frac{D_s \boldsymbol{\xi}}{D_d} - D_{ds} \boldsymbol{\Theta}(\boldsymbol{\xi}), \quad (2)$$

где D_s , D_d и D_{ds} — соответственно расстояния между источником и наблюдателем, линзой и наблюдателем, источником и линзой. Векторы $\boldsymbol{\eta}$ и $\boldsymbol{\xi}$ определяют координаты в плоскости источника и линзы соответственно,

$$\boldsymbol{\Theta}(\boldsymbol{\xi}) = \frac{4GM\boldsymbol{\xi}}{c^2 \xi^2}. \quad (3)$$

Если источник, линза и наблюдатель находятся на одной прямой, то правая часть (2) должна обращаться в нуль ($\boldsymbol{\eta} = 0$), и тогда, подставляя в (2) $\boldsymbol{\Theta}$ из соотношения (3), получаем так называемый радиус Эйнштейна–Хвольсона¹ [11]

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{4GMD_d D_{ds}}{c^2 D_s}} \quad (4)$$

и, соответственно, угол Эйнштейна–Хвольсона, определяемый соотношением $\theta_0 = \xi_0/D_d$. Если $D_s \gg D_d$, то

$$\theta_0 \approx 2'' \times 10^{-3} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{D_0}{D_d} \right)^{-1/2}, \quad (5)$$

где $D_0 = 1$ кпк.

1.1. Режимы гравитационного линзирования

Имеется большое число обзоров и книг, посвящённых гравитационному линзированию и микролинзированию [1, 11–15]. В последнее время рассмотрено гравитационное линзирование в пределе сильного гравитационного поля [16–22].

В рамках простейшей модели точечной гравитационной линзы (линзы Шварцшильда) угловые расстояния между изображениями порядка углового диаметра Эйнштейна–Хвольсона $2\theta_0$, и эта величина пропорциональна квадратному корню из массы линзы (если остальные параметры задачи фиксированы). При космологических расстояниях между объектами и характерной для галактики массе линзы $10^{12}M_{\odot}$ расстояние между изображениями порядка нескольких угловых секунд (такой режим линзирования называется стандартным режимом макролинзирования). Если масса гравитационной линзы порядка звёздной массы ($\sim M_{\odot}$), то характерное расстояние между изображениями порядка 10^{-6} угловых секунд (при космологических расстояниях между источником, линзой и изображением), и этот режим называется гравитационным микролинзированием. Если гравитационная линза имеет массу порядка массы Земли ($10^{-6}M_{\odot}$), то характерное расстояние между изображениями порядка 10^{-9} угловых секунд (режим гравитационного нанолинзирования) (табл. 1) (см. [12, 23, 24]). В действительности, 10^{-9} угловых секунд является очень малым углом: под таким углом видна, например, монета

¹ Хвольсон [8] описал возникновение круговых изображений, а Эйнштейн привёл основные уравнения для гравитационной фокусировки в случае точечной гравитационной линзы [9], называемой сейчас в литературе линзой Шварцшильда. Позднее было обнаружено, что Эйнштейн рассмотрел феномен гравитационной фокусировки в неопубликованных заметках [10] в 1912 г.

Таблица 1. Режимы гравитационного линзирования [12]

| Режим | Угол отклонения, угл. с | Масса, m/M_\odot | Линза |
|-------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|
| Килолинзирование | 10^3 | 10^{18} | Сверхскопление |
| Макролинзирование | 10^0 | 10^{12} | Галактика |
| Миллилинзирование | 10^{-3} | 10^6 | Чёрная дыра |
| Микролинзирование | 10^{-6} | 10^0 | Звезда |
| Нанолинзирование | 10^{-9} | 10^{-6} | Планета (земной массы) |
| Пиколлинзирование | 10^{-12} | 10^{-12} | ? |
| Фемтолинзирование | 10^{-15} | 10^{-18} | Комета |

диаметром 2,5 см с расстояния порядка $4,5 \times 10^9$ км (или около 30 а.е., что примерно равно расстоянию между Солнцем и Нептуном).

В настоящее время не удаётся достичь микро- и наносекундного углового разрешения, однако можно обнаружить фотометрические признаки, проводя мониторинг фоновых источников, как было предложено в работе [25]. Тем не менее существуют проекты, в которых предполагается достичь углового разрешения на уровне нескольких угловых микросекунд (в различных спектральных диапазонах), такие как проект Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) Space Interferometry Mission (SIM), Европейского космического агентства (ESA) Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (GAIA) [26], MicroArcsecond X-Ray Imaging Mission (MAXIM) NASA² [27, 28], российский "Радиоастрон". С помощью космической миссии "Миллиметр" планируется достичь углового разрешения порядка угловых наносекунд в миллиметровом диапазоне³.

Если гравитационная линза является звездой в нашей Галактике на расстоянии 1 кпк и её масса порядка солнечной, $M = M_\odot$, то $\theta_0 \approx 2'' \times 10^{-3}$. Если линза — планета, находящаяся на таком же расстоянии от наблюдателя, и её масса несколько меньше массы Земли, $M = 10^{-6} M_\odot$, то $\theta_0 \approx (2 \times 10^{-6})''$.

В соответствии с терминологией, принятой ранее, если масса линзы $M \sim M_\oplus$ ($M \sim 10^{-6} M_\odot$), то этот режим называется микролинзированием (нанолинзированием), вне зависимости от величины характерных расстояний. Можно говорить о нанолинзировании, когда поиски планет проводятся по их вкладу в гравитационное линзирование.

Феномен гравитационного линзирования может приводить к появлению кратных изображений [1, 11]. Для точечной гравитационной линзы (линзы Шварцшильда) мы имеем два изображения или кольцо. Общая площадь двух изображений больше, чем площадь источника. Отношение суммы площадей обоих изображений к площади источника, которое называется коэффициентом усиления гравитационной линзы A , и есть результат гравитационной фокусировки.

2. Гравитационное микролинзирование

Гравитационное микролинзирование интенсивно обсуждалось в литературе [2, 15, 29–37]. Если источник S лежит на конусе Эйнштейна–Хвольсона, то коэффи-

циент усиления $A = 1,34$. Соответствующее характерное время микролинзирования T_0 обычно определяется как половина времени, необходимого для пересечения конуса Эйнштейна–Хвольсона,

$$T_0 = 3,5 \text{ месяца} \sqrt{\frac{M}{M_\odot} \frac{D_d}{10 \text{ кпк}}} \frac{300 \text{ км с}^{-1}}{V_\perp},$$

где V_\perp — трансверсальная компонента скорости линзы. Если мы предположим, что $V_\perp \sim 300 \text{ км с}^{-1}$ (что является характерной скоростью звёзд в Галактике), то характерное время пересечения конуса Эйнштейна–Хвольсона составит около 3,5 месяцев. Тем самым кривая блеска для фоновой звезды изменяется в зависимости от времени.

Приведём некоторые характерные значения величин для гравитационного микролинзирования. Если расстояние между линзой и Солнцем около 10 кпк, то характерное значение конуса Эйнштейна–Хвольсона приблизительно равно $0,001''$, что соответствует линейным расстояниям порядка 10 а.е. Ясно, что при таком малом угловом расстоянии между изображениями их трудно разрешить с помощью наземных телескопов, по крайней мере в оптическом диапазоне.

Эйнштейн отмечал, что если гравитационные линзы — звёзды, то феномен гравитационного линзирования довольно трудно обнаружить в природе, поскольку угол, разделяющий изображения, очень мал⁴ [9]. Тем не менее в последнее время обсуждается возможность измерения углового диаметра Эйнштейна–Хвольсона $2\theta_0$ посредством разрешения кратных изображений, порождаемых микролинзированием. Для того чтобы разрешить кратные изображения, предложено использовать оптический интерферометр, например VLTI (Very Large Telescope Interferometer) [38]. Более того, в ближайшем будущем планируется осуществить астрометрическую миссию GAIA⁵, с помощью которой будет достигнута угловая точность порядка 10 угловых микросекунд и, в принципе, можно будет разрешать кратные изображения, возникающие при микролинзировании. Использование будущих астрометрических миссий для астрометрического микролинзирования рассматривалось в работах [41, 42].

Феномен микролинзирования в удалённых гравитационно-линзованных квазарах обсуждался в работе [43], опубликованной вскоре после открытия первой гравитационно-линзовой системы [44]. Этот феномен, благодаря тому что его оптическая толщина (вероятность) довольно высока, был обнаружен впервые в работе [45]. Позднее признаки микролинзирования в разных спектральных диапазонах были найдены в различных гравитационно-линзовых системах [46, 47], в частности в гравитационно-линзовой системе SBS 1520+530 в оптическом диапазоне с помощью телескопа RTT-150 [48]. Оптическая толщина для микролинзирования удалённых квазаров обсуждалась в работах [49–52]. Влияние микролинзирования на кривые блеска в различных спектральных диапазонах проанализировано в работах [53, 54]. Моделирование кривых блеска (в том числе в рентгеновском диапазоне) было

² Проекты SIM и MAXIM, скорее всего, не будут реализованы.

³ <http://www.asc.rssi.ru>.

⁴ Тем не менее микролинзирование может быть обнаружено с помощью наблюдений изменения кривой блеска фоновой звезды, как это было предложено в работе Бялко [25].

⁵ <http://astro.estec.esa.nl/gaia> (см. также [26, 39, 40]).

проведено после обнаружения микролинзирования в рентгеновском диапазоне для некоторых гравитационно-линзовых систем [55–58] с помощью космического рентгеновского телескопа "Чандра" (Chandra), имеющего угловое разрешение порядка 0,5 угловых секунд, что в принципе позволяет разрешать отдельные макроизображения в гравитационно-линзовых системах.

Основными признаками гравитационного микролинзирования (в случае, если источники и линзы — звёзды) является симметричность и ахроматичность кривой блеска. Это утверждение справедливо, если линза сферически симметрична и источник является точечным. Однако если мы рассматриваем более сложную модель, в которой источник — неточечный и есть распределение цвета по диску источника и (или) отклонения от сферически симметричного распределения гравитационного поля линзы, то тогда могут быть отклонения от симметрии и (или) ахроматичности кривой блеска [1].

Проблема поиска событий микролинзирования тесно связана с проблемой тёмной материи (ТМ). Много лет тому назад было обнаружено, что видимая материя составляет только небольшую часть гравитирующей массы [59, 60]. В настоящее время известно, что плотность материи в единицах критической плотности порядка $\Omega_m \approx 0,3$ (включая плотность барионной материи $\Omega_b \approx 0,05–0,04$, однако плотность светящейся материи $\Omega_{lum} \leq 0,005$), а плотность, соответствующая Λ -члену, порядка $\Omega_\Lambda = 0,7$ [61–64]. Таким образом, плотность барионной материи (а тем более светящейся материи) составляет малую часть полной плотности Вселенной. Часто предполагается, что галактические гало — достаточно "естественные" области, в которых может находиться не только барионное, но и небарионное тёмное вещество. Если ТМ формирует объекты с массами в диапазоне $(10^{-5}–10) M_\odot$, то микролинзирование могло бы помочь обнаружить такие объекты. Естественно, с помощью микролинзирования можно обнаружить тусклые маломассивные звёзды и массивные планеты. Таким образом, перед началом интенсивных исследований микролинзирования в нашей и ближайших галактиках имелась надежда пролить свет на проблему тёмной массы в Галактическом гало.

Как отмечалось ранее, возможность обнаружения феномена микролинзирования обсуждалась в работе [25]. Систематические поиски событий микролинзирования по характерным признакам кривых блеска отдельных звёзд начались после обсуждения Пачинским возможности обнаружения компактных тёмных объектов в Галактическом гало с массами порядка масс планет или звёзд с помощью мониторинга нескольких миллионов звёзд в Большом Магеллановом Облаке (БМО) [65]. В начале 1990-х годов появились новые вычислительные и технические возможности и огромные массивы наблюдательных данных, что способствовало относительно быстрой реализации идей Пачинского (ситуация была существенно другой во времена опубликования работы Бялко [25]). Предложено было называть такие микролинзы "мачо" (от англ. *macho* — *Massive Astrophysical Compact Halo Objects*) [66]. Кроме того, МАСНО — название американо-австралийско-британской коллаборации, которая проводила мониторинг звёзд в БМО и Галактическом балдже, используя 1,3-метровый телескоп Обсерватории Маунт-Стромло на горе Стромло в

Австралии⁶. Для поиска событий микролинзирования проводился мониторинг нескольких миллионов звёзд в направлении двух мишеней: а) звёзд в БМО и Малом Магеллановом Облаке (ММО), поскольку БМО и ММО являются ближайшими галактиками в направлении, лежащем вне Галактической плоскости, и проходят через Галактическое гало; б) звёзд в Галактическом балдже, что позволяет оценить распределение микролинз в направлении, близком к Галактической плоскости. Впервые события микролинзирования в направлении на БМО были обнаружены коллаборацией МАСНО [67] и французской коллаборацией EROS (*Expérience de Recherche d'Objets Sombres*)⁷ [69].

Первые сообщения об открытии микролинзирования в направлении на Галактический балдж были сделаны американо-польской коллаборацией OGLE (*Optical Gravitational Lens Experiment*), которая использует телескоп с диаметром зеркала 1,3 м в Обсерватории Лас-Кампанас. В 2001 г. началась третья фаза этого эксперимента — OGLE-III, и в рамках этого проекта коллаборация наблюдала 200 млн звёзд каждые 1–3 ночи. В течение последних нескольких лет коллаборация OGLE-III обнаруживала по несколько сотен событий микролинзирования каждый год [70, 71]. Фаза OGLE-III завершилась⁸ в мае 2009 г. Система раннего предупреждения (*Early Warning System* — EWS) способствовала обнаружению большого числа событий микролинзирования (табл. 2).

Астрономы Японии и Новой Зеландии с целью поиска событий микролинзирования создали коллаборацию MOA (*Microlensing Observations in Astrophysics*)⁹ [72].

Для исследования распределения мачо в другом направлении, существенно отличном от направлений на БМО и ММО, можно использовать Туманность Андромеды (галактика М31), находящуюся на расстоянии порядка 725 кпк. Эта галактика является ближайшей галактикой в северной Земной полусфере [73–76]. В 1990-х годах две коллаборации, AGAPE (*Andromeda Gravitational Amplification Pixel Experiment*, гора Пик дю Миди, Франция)¹⁰ и VATT (*Vatican Advanced Technology Telescope*), начали проводить мониторинг пикселей, а не отдельных звёзд [68, 80], поскольку при наблюдениях Туманности Андромеды в одном пикселе принимается излучение большого числа звёзд. В настоя-

Таблица 2. События микролинзирования, обнаруженные во время фазы проекта OGLE-III

| Год наблюдений | Число событий |
|----------------|---------------|
| 2002 | около 350 |
| 2003 | около 450 |
| 2004 | около 600 |
| 2005 | около 550 |
| 2006 | около 600 |
| 2007 | около 600 |
| 2008 | около 650 |

⁶ Проект МАСНО завершён с конца 1999 г.

⁷ Проект EROS завершён в 2002 г. [68].

⁸ <http://www.astrouw.edu.pl/ogle/ogle3/ews/ews/html>.

⁹ <http://www.roe.ac.uk/%7Eiab/alert/alert/alert/html>.

¹⁰ Коллаборация POINT-AGAPE (POINT — аббревиатура от англ. *Pixel-lensing Observation with the Isaac Newton Telescope (INT)*) начала наблюдения в 1999 г., используя INT с диаметром зеркала 2,5 м [77, 78]; был предложен также проект телескопа-робота "Ангстрем" (Angstrom) [79].

щее время сообщается об обнаружении нескольких десятков событий пиксельного линзирования [81, 82]. Для теоретической интерпретации результатов этих наблюдений необходимо проводить имитационное моделирование с использованием методов Монте-Карло [83–86].

Относительно феномена микролинзирования уже около 15 лет назад не было сомнений в том, что этот эффект действительно обнаружен [30]. Тем не менее нельзя точно сказать, сколько на самом деле кандидатов в события микролинзирования связано с этим феноменом, поскольку новые виды звёздной переменности могут иметь проявления, подобные микролинзированию¹¹. Приведём наиболее важные результаты наблюдений микролинзирования и их теоретической интерпретации.

Наблюдаемые кривые блеска, которые связывают с кандидатами в события микролинзирования, хорошо интерпретируются достаточно простыми теоретическими моделями, тем не менее иногда нет полного согласия относительно того, что интерпретация достаточно хороша. Так, например, даже для события МАСНО № 1 приводились различные фитирования одиночной микролинзы, но при этом имелись существенные отклонения теоретической кривой от наблюдательных данных вблизи максимума кривой блеска. Однако в рамках модели двойной микролинзы наблюдается полное согласие результатов теоретического фитирования и наблюдательных данных [87, 88]. Было предложено также фитирование наблюдательных данных с использованием модели некомпактной микролинзы [89–97].

Коллаборация PLANET (Probing Lensing Anomalies NETwork) для события EROS BLG-2000-5 определила массы компонентов двойной микролинзы, $0,35 M_{\odot}$ и $0,262 M_{\odot}$, и расстояние до неё — 2,6 кпк от Солнца [98].

Некоторые продолжительные события микролинзирования связывались с чёрными дырами звёздных масс [99]. Так, первоначально для событий МАСНО-96-BLG-5 и МАСНО-96-BLG-6 были приведены оценки масс соответственно $M/M_{\odot} = 6_{-3}^{+10}$ и $M/M_{\odot} = 6_{-3}^{+7}$, т.е. масса превышала предел Оппенгеймера–Волкова и можно было говорить о микролинзировании чёрными дырами. Более поздние оценки показали, что событие МАСНО-99-BLG-22 может быть ассоциировано с чёрной дырой с достаточно большой вероятностью (78 %), МАСНО-96-BLG-5 — с относительно небольшой вероятностью (37 %), а событие МАСНО-96-BLG-6 — с малой вероятностью (2 %) [100].

Оптическая толщина в направлении на Галактический балдж (порядка 3×10^{-6}) оказалась несколько больше первоначальной оценки [101], что является дополнительным аргументом в пользу существования структуры типа бара.

Коллаборация МАСНО провела анализ данных, полученных в течение 5,7 лет проведения фотометрии 11,9 млн звёзд в БМО, и обнаружила 13–17 кандидатов в события микролинзирования [102] (число кандидатов зависит от правил отбора). Оптическая толщина в направлении БМО, полученная из наблюдений,

$\tau(2 < \hat{t} < 400 \text{ сут}) = 1,2_{-0,3}^{+0,4} \times 10^{-7}$ (здесь \hat{t} — продолжительность событий микролинзирования), оказалась меньше теоретической оценки, основанной на предположении, что тёмная масса в гало сосредоточена в объектах типа мачо. Наиболее вероятная доля вклада мачо в массу гало — $f = 0,2$, что основано на наблюдениях коллаборации МАСНО. Были приведены также следующие оценки вероятностей: $P(0,08 < f < 0,5) = 0,95$ и $P(f = 1) < 0,05$. Наиболее вероятная оценка массы мачо $M = (0,15–0,9) M_{\odot}$, масса гало до расстояний 50 кпк должна быть примерно равна $9_{-3}^{+4} \times 10^{10} M_{\odot}$.

Коллаборация EROS привела оценку вероятности $P(M \in [10^{-7}, 1] M_{\odot}, f > 0,4) < 0,05$ [103, 104]. Кроме того, эта коллаборация дала оценку оптической толщины в направлении БМО $\tau < 0,36 \times 10^{-7}$ (с доверительным интервалом 95 %), что означало долю массы мачо в общей массе гало не более 7 % [105].

С другой стороны, коллаборация OGLE привела оценку доли массы мачо в массе гало: $(8 \pm 6) \%$ [106]. Это, по сути, означает отсутствие детектирования мачо при их распространённости в Галактическом гало на уровне 19 % при $M = 0,4 M_{\odot}$ и 10 % для масс в диапазоне $(0,01–0,2) M_{\odot}$ [106]. Однако данные выводы основаны на предположениях о распределениях по массам и пространству для микролинз, а эти распределения не являются хорошо известными. В принципе изучение микролинзирования может помочь уточнить параметры указанных распределений, однако даже для уточнения параметров необходимо несколько тысяч событий микролинзирования.

Итак, можно сделать следующее общее заключение: открыто очень важное физическое явление — микролинзирование, однако его некоторые количественные особенности должны быть уточнены. Тем самым проблема наличия около 80 % (или даже 93 %, согласно точке зрения коллаборации EROS) тёмной материи в гало Галактики по-прежнему остаётся открытой (до начала исследований микролинзирования была надежда существенно продвинуться в решении проблемы ТМ). Таким образом, можно утверждать, что ситуацию вполне адекватно отражает название статьи Керинса "Мачо и облака неопределённостей" ("Machos and clouds of uncertainty") [107]. Это означает, что остаётся широкое поле для проведения исследований, включая пиксельное линзирование, микролинзирование гравитационно-линзовых систем, при этом наиболее важными и интересными представляются поиски экзопланет с помощью микролинзирования.

3. Методы поиска экзопланет

Около 20 лет назад Мао и Пачинский [108] оценили вероятности нахождения экзопланет с помощью микролинзирования и отметили, что наиболее высока вероятность обнаружить экзопланеты в направлении Галактического балджа. Несмотря на то что первая экзопланета была открыта вблизи миллисекундного пульсара PSR1257+12 [109], это предсказание Мао и Пачинского в целом оказалось практически правильным, и в настоящее время известно, что микролинзирование является довольно эффективным методом обнаружения экзопланет.

Наиболее эффективный метод обнаружения экзопланет основан на измерении радиальных скоростей с по-

¹¹ Кандидаты в события микролинзирования, которые ранее обсуждались коллаборацией EROS-1 (и EROS-2) и коллаборацией МАСНО-2 (и МАСНО-3), позднее интерпретировались как проявления звёздной переменности [30].

мощью спектрографа HARPS (High Accuracy Radial velocity Planet Searcher). Этот спектрограф установлен на 3,6-метровом телескопе Европейской южной обсерватории в Ла-Силлья (Чили). Характерная неопределённость составляет $\sim 1 \text{ м с}^{-1}$ или, точнее, лежит в диапазоне $0,7 - 2 \text{ м с}^{-1}$, в зависимости от условий наблюдений [110]. Оценки радиальных скоростей приведены в обзоре [111] в таблице 1. В настоящее время с помощью этого метода обнаружено более 300 экзопланет.

Около 100 экзопланет обнаружено с использованием метода транзитов, часть из которых приведена в статье [112] (см. также таблицу 2 в обзоре [111]), где представлены результаты как наземных, так и космических экспериментов¹². Запуск космического телескопа "Кеплер" существенно повышает возможность обнаружить новые экзопланеты с помощью метода транзитов. Напомним, что диаметр зеркала телескопа "Кеплер" более чем в три раза превосходит диаметр зеркала космического телескопа COROT (CONvection ROTation and planetary Transits) и поле зрения "Кеплера" более чем в 100 раз превышает поле зрения COROT. Группа COROT обнаружила интересные планетные системы, такие как планета COROT-7b с радиусом порядка двух радиусов Земли [113]. Последующие наблюдения с помощью спектрографа HARPS показали, что имеются две экзопланеты с массами, близкими к массе Земли: $(4,8 \pm 0,8) M_{\oplus}$ (COROT-7b) и $(8,4 \pm 0,9) M_{\oplus}$ (COROT-7c) [114].

В соответствии с базой данных, которую собирает Ж. Шнайдер (Парижская обсерватория)¹³, к настоящему времени открыто более 500 экзопланет и около 400 кандидатов в экзопланеты, тем не менее чётких критериев для разделения этих двух классов объектов нет. Несколько планетных систем обнаружено с помощью пульсарного тайминга.

Одна экзопланета найдена посредством астрометрических измерений (см., например, пресс-релиз Лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory)¹⁴, выпущенный 28 мая 2009 г.), однако имеется надежда, что будущие космические миссии, такие как "Космический телескоп Джеймс Вебб" (James Webb Space Telescope (JWST)) и GAIA, дадут возможность обнаружить планетные системы с помощью астрометрических измерений.

Важным аспектом поисков экзопланет является возможность использовать различные методы, для того чтобы убедиться в справедливости утверждения о существовании экзопланет, сделанного с помощью только одной методики. Методики измерения радиальных скоростей и транзиты и (или) астрометрические измерения могут быть взаимодополняющими (например, наблюдения экзопланетной системы Gliese 876 b с помощью космического телескопа "Хаббл" и измерений радиальных скоростей). Детальное описание различных методик обнаружения экзопланет можно найти в работах [111, 115–118].

4. Поиски экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования

Поскольку наличие планет вблизи звезды-линзы приводит к нарушению линзовой системы, возникают каустики типа складок и сборок [11, 119, 120] и появляются характерные отклонения в кривой блеска звезды-линзы от кривой блеска, соответствующей звезде-линзе без планеты. По этим характерным отклонениям и обнаруживают экзопланеты с помощью гравитационного микролинзирования. Таким образом, во-первых, необходимо найти событие микролинзирования и, во-вторых, найти в нём характерное отклонение. Следует отметить, что если для обнаружения микролинзирования необходимо проведение мониторинга большого числа звёзд, то для обнаружения отклонения в кривой блеска с целью открытия экзопланет надо проводить наблюдения кривой блеска фоновой звезды при наличии признаков микролинзирования, и тогда могут использоваться даже относительно небольшие телескопы с малым полем зрения. В этом случае очень важно иметь систему раннего предупреждения о кандидатах в события микролинзирования, подобную той, которую имеет коллаборация OGLE.

Как отмечалось в разделе 3, Мао и Пачинский [108] подчёркивали, что вероятность обнаружения экзопланет посредством микролинзирования достаточно высока (см. также работы [121, 122]). Эти выводы подтверждены результатами наблюдений.

Экзопланеты, обнаруженные с помощью микролинзирования в направлении Галактического балджа, представлены в табл. 3 [123–127]. Для планетной системы, указанной в последней строке таблицы, приведены две возможные области для расстояний между планетой и звездой-линзой [123, 128]. Открытия экзопланет обсуждены в работах [71, 123, 124, 126, 129–132]. Следует отметить, что первая экзопланета была открыта коллаборацией MOA-I, которая использовала небольшой телескоп с диаметром зеркала всего лишь 0,6 м [123, 129]. Это событие микролинзирования было обнаружено коллаборацией OGLE, но коллаборация MOA-I имела ПЗС (приборы с зарядовой связью) с более широким полем зрения и делала по пять экспозиций для каждого из полей зрения. Этот факт наглядно показывает то, что даже относительно скромные наблюдательные средства при правильном использовании позволяют получить важный результат.

Обнаружено восемь экзопланет, в том числе три экзопланеты Земной группы с массами $10 M_{\oplus}$ (которые называют экзопланетами типа сверх-Земля (super-Earth exoplanets)). Таблица 3 иллюстрирует, что данная техника весьма эффективна в детектировании экзопланет Земной группы на расстоянии порядка 1 а.е. от звезды-линзы.

Как одно из наиболее важных открытий экзопланет с помощью микролинзирования [133] можно отметить открытие экзопланеты с массой порядка $5,5 M_{\oplus}$ (в 2006 г. это была самая лёгкая экзопланета)¹⁵. По сути, это означает, что планеты Земной группы с твёрдой поверх-

¹² Недавно появились сообщения об обнаружении с помощью телескопа "Кеплер" около 1000 экзопланет.

¹³ См. веб-сайт <http://exoplanet.eu>.

¹⁴ <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.cfm?release=2009-090>.

¹⁵ Позднее было сообщено об открытии лёгкой экзопланеты с массой $m_p \sin i = 1,94 M_{\oplus}$ [110] на расстоянии порядка 0,03 а.е. в системе Глизе 581 b (GJ 581 b), которая имеет несколько экзопланет.

Таблица 3. Экзопланеты, обнаруженные с помощью микролинзирования [123–126]

| Масса звезды | Масса планеты | Главная полуось, а.е. |
|-------------------------------------|---|---|
| $0,63^{+0,07}_{-0,09} M_{\odot}$ | $830^{+250}_{-190} M_{\oplus}$ | $4,3^{+2,5}_{-0,8}$ |
| $(0,46 \pm 0,04) M_{\odot}$ | $(1100 \pm 100) M_{\oplus}$ | $4,4 \pm 1,8$ |
| $0,22^{+0,21}_{-0,11} M_{\odot}$ | $5,5^{+5,5}_{-2,7} M_{\oplus}$ | $2,6^{+1,5}_{-0,6}$ |
| $0,49^{+0,14}_{-0,18} M_{\odot}$ | $13^{+4,0}_{-5,0} M_{\oplus}$ | $3,2^{+1,5}_{-1,0}$ |
| $(0,50 \pm 0,04) M_{\odot}$ | $(226 \pm 25) M_{\oplus}$ | $2,3 \pm 0,2$ |
| $(0,50 \pm 0,04) M_{\odot}$ | $(86 \pm 10) M_{\oplus}$ | $4,6 \pm 0,5$ |
| $0,060^{+0,028}_{-0,021} M_{\odot}$ | $3,3^{+4,9}_{-1,6} M_{\oplus}$ | $0,62^{+0,22}_{-0,16}$ |
| $0,30^{+0,19}_{-0,12} M_{\odot}$ | $260,54^{+165,22}_{-104,85} M_{\oplus}$ | $\begin{cases} 0,72^{+0,38}_{-0,16} \\ \text{или } 6,5^{+3,2}_{-1,2} \end{cases}$ |

ностью — достаточно широко распространенный феномен во Вселенной [130, 134, 135].

Пиксельное линзирование в направлении Туманности Андромеды (M31) может представлять собой достаточно эффективный способ обнаружения экзопланет в другой галактике [136–141]. В случае пиксельного линзирования в одном пикселе может приниматься излучение нескольких тысяч звезд, и тогда линзирование только звезд-гигантов может приводить к детектируемым отклонениям наблюдаемого потока излучения в одном пикселе. Поскольку звезды-гиганты могут иметь радиус порядка 1 а.е. (расстояние от Земли до Солнца), то для оценки вероятности потенциально детектируемого отклонения кривой блеска звезды-линзы с экзопланетой относительно кривой блеска для системы со звездой-линзой без экзопланеты необходимо проводить имитационное компьютерное моделирование с использованием методов Монте-Карло, при котором моделируется процесс наблюдений событий пиксельного линзирования и обнаружения в этих событиях признаков экзопланет [138, 139].

Поскольку обнаружение экзопланеты с помощью пиксельного линзирования естественно разделяется на два этапа, а именно поиски событий пиксельного линзирования и поиски признаков наличия экзопланет в этих событиях, крайне важным представляется создание системы раннего предупреждения в режиме онлайн для групп, проводящих мониторинг Туманности Андромеды с целью поиска событий пиксельного линзирования, подобно тому как это сделано коллаборацией OGLE для поиска событий микролинзирования в направлении на Галактический балдж. При наличии подобной системы даже относительно небольшие телескопы, не имеющие широкого поля зрения, могли бы проводить наблюдения за кандидатами в события пиксельного линзирования и, возможно, обнаруживать отклонения в кривой блеска, свидетельствующие о наличии экзопланеты в линзовой системе.

В событии PA-N2-99 коллаборация POINT-AGAPE обнаружила аномалию [142], которая наиболее вероятно интерпретируется наличием планетной системы в линзе [138–140]. Тем самым можно говорить, что была обнаружена первая экзопланета в другой галактике. Так, например, в электронной энциклопедии Википедии в статье о Туманности Андромеды указано, что у одной из звезд этой галактики обнаружена экзопланета, и

приведена ссылка на работу [138]. Как было отмечено ранее, источники-звезды для пиксельного линзирования являются красными гигантами (в одном пикселе имеется много звезд, и поэтому линзирование только звезд-гигантов может приводить к наблюдательным проявлениям) и, следовательно, их размер сопоставим с радиусом Эйнштейна – Хвольсона и размером каустик, в связи с чем необходимо учитывать конечный размер источника, подобно тому как это делается при микролинзировании в квазарах [53, 143]. Как хорошо известно [144–152], усиление точечного источника отличается от усиления источника с конечным размером. Если размер источника мал, то вероятность обнаружить признаки двойной линзы (или планеты вблизи звезды) пропорциональна размеру области вблизи каустики. Тем не менее гигантские звезды, рассматриваемые как фоновые источники, имеют большие угловые размеры, поэтому повышается вероятность того, что какая-то область источника находится вблизи каустики (см. работы [138–140], в которых обсуждаются детали этого аспекта).

5. Заключение

Обнаружено несколько десятков экзопланет типа сверх-Земля¹⁶ с массами в диапазоне $(1–10) M_{\oplus}$ с использованием различных методик [110, 124, 130, 157–164]. Как легко заметить, доля экзопланет с массой порядка массы Земли, обнаруженных с помощью гравитационного микролинзирования, довольно высока по сравнению с обнаруженными с использованием других методик поиска экзопланет. Поиски маломассивных экзопланет связаны с поисками жизни во Вселенной. Положения экзопланет вблизи зоны обитаемости [165–167] детально изучены с помощью различных методик, включая динамический анализ мультипланетных систем [168–177]. Ясно, что с этой точки зрения наиболее интересными являются планетные системы с массами порядка массы Земли, в которых расстояния между звездами и такими планетами составляет около 1 а.е. Гравитационное микролинзирование является очень эффективным методом поиска таких экзопланетных систем. В этом контексте американский проект MPF (Microlensing Planet Finder) может быть гораздо эффективнее, чем другие космические проекты поиска экзопланет (см. рис. 2 в статье [125] и рис. 1.9 в [123]).

Для удаленных планетных систем, обнаруженных с помощью микролинзирования (или пиксельного линзирования), использование каких-либо дополнительных методов довольно затруднительно (по крайней мере, в настоящей момент), поскольку эти методы являются недостаточно чувствительными для таких систем. Тем не менее прямые наблюдения планеты, например с помощью космического телескопа [178], могут оказаться весьма полезными для уменьшения неопределенностей в оценке параметров планетной системы. Интересная возможность прямых наблюдений экзопланет, похожих на Землю, может быть реализована с помощью космического телескопа и звездного экрана, существенно уменьшающего поток излучения звезды, имеющей экзопланету. Такая возможность обсуждается в рамках проекта "Наблюдатель новых миров" (New Worlds Observer)

¹⁶ Физические свойства таких объектов являются предметом интенсивных исследований [153–156].

[179–181]. Предполагается, что экран и телескоп будут находиться в окрестности лагранжевой точки L_2 . Размер телескопа примерно 4 м, размер экрана около 50 м, расстояние между телескопом и экраном порядка 80000 км. Такой подход обсуждался ранее в литературе, однако техническая возможность обнаружения маломассивных экзопланет с помощью экрана размером в несколько десятков метров была отмечена относительно недавно [182]. Таким образом, в настоящее время в принципе имеется технология прямого детектирования маломассивных экзопланет.

Автор благодарит С. Кальки Новати, У. Кэша, Ф. Де Паолиса, Ф. Джетцера, Г. Ингроссо, П. Йовановича, А. Нучиту, Л. Поповича, М.В. Сажина и А.М. Черепашука за ценные обсуждения различных аспектов гравитационного линзирования и поисков экзопланет.

Список литературы

1. Захаров А Ф *Гравитационные линзы и микролинзы* (М.: Янус-К, 1997)
2. Захаров А Ф, Сажин М В *УФН* **168** 1041 (1998) [Zakharov A F, Sazhin M V *Phys. Usp.* **41** 945 (1998)]
3. Newton I *Opticks: or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light* (London: Printed for S Smith, and B Walford, 1704)
4. Soldner J G *Berliner Astron. Jahrbuch* **161** (1804)
5. Einstein A *Ann. Physik* **49** 769 (1916) [Эйнштейн А *Собрание сочинений* Т. 1 (М.: Наука, 1965) с. 452]
6. Dyson F W, Eddington A S, Davidson C *Philos. Trans. R. Soc. London A* **220** 291 (1920)
7. Eisenstaedt J *The Curious History of Relativity* (Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 2006)
8. Chwolson O *Astron. Nachrich.* **221** 329 (1924)
9. Einstein A *Science* **84** 506 (1936)
10. Renn J, Sauer T, Stachel J *Science* **275** 184 (1997)
11. Schneider P, Ehlers J, Falco E E *Gravitational Lenses* (Berlin: Springer-Verlag, 1992)
12. Wambsganss J, in *Gravitational Lenses in the Universe: Proc. of the 31st Liege Intern. Astrophysical Colloquium (LIAC 93)* (Eds J Surdej et al.) (Liege: Univ. de Liege, Institut d'Astrophysique, 1993) p. 369
13. Refsdal S, Surdej J *Rep. Prog. Phys.* **56** 117 (1994)
14. Claeskens J-F, Surdej J *Astron. Astrophys. Rev.* **10** 263 (2002)
15. Mollerach S, Roulet E *Gravitational Lensing and Microlensing* (Singapore: World Scientific, 2002)
16. Frittelli S, Kling T P, Newman E T *Phys. Rev. D* **61** 064021 (2000)
17. Bozza V et al. *Gen. Relat. Grav.* **33** 1535 (2001)
18. Virbhadra K S, Ellis G F R *Phys. Rev. D* **65** 103004 (2002)
19. Zakharov A F et al. *New Astron.* **10** 479 (2005)
20. Zakharov A F et al. *Astron. Astrophys.* **442** 795 (2005)
21. Virbhadra K S, Keeton C R *Phys. Rev. D* **77** 124014 (2008)
22. Virbhadra K S *Phys. Rev. D* **79** 083004 (2009)
23. Zakharov A F *New Astron. Rev.* **53** 202 (2009)
24. Zackrisson E, Riehm T, arXiv:0905.4075
25. Бялко А В *Астрон. журн.* **46** 998 (1969) [Byalko A V *Sov. Astron.* **13** 784 (1970)]
26. Lindegren L, Perryman M A C *Astron. Astrophys. Suppl.* **116** 579 (1996)
27. Cash W et al. *Nature* **407** 160 (2000)
28. White N *Nature* **407** 146 (2000)
29. Wu X-P *Astrophys. J.* **435** 66 (1994)
30. Paczyński B *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **34** 419 (1996)
31. Roulet E, Mollerach S *Phys. Rep.* **279** 67 (1997)
32. Mao S *AIP Conf. Proc.* **237** 215 (2001); astro-ph/9909302
33. Jetzer Ph *Naturwissenschaften* **86** 201 (1999)
34. Zakharov A F *Publ. Astron. Observ. Belgrade* (75) 27 (2003)
35. Zakharov A F, in *Particle Physics in Laboratory, Space and Universe: Proc. of the 11th Lomonosov Conf. on Elementary Particle Physics, August 21–27, 2003, Moscow, Russia* (Ed. A I Studenikin) (Singapore: World Scientific, 2005) p. 106
36. Mao S, arXiv:0811.0441
37. Zakharov A F *Phys. Part. Nucl.* **39** 1176 (2008)
38. Delplancke F, Górski K M, Richichi A *Astron. Astrophys.* **375** 701 (2001)
39. Perryman M A C et al. *Astron. Astrophys.* **369** 339 (2001)
40. Perryman M, de Bruijne J, Lammers U *Exp. Astron.* **22** 143 (2008)
41. Захаров А Ф *Астрон. журн.* **83** 99 (2006) [Zakharov A F *Astron. Rep.* **50** 79 (2006)]
42. Zakharov A F *Int. J. Mod. Phys. D* **17** 1055 (2008)
43. Gott J R (III) *Astrophys. J.* **243** 140 (1981)
44. Walsh D, Carswell R F, Weymann R J *Nature* **279** 381 (1979)
45. Irwin M J et al. *Astron. J.* **98** 1989 (1989)
46. Sluse D et al. *Astron. Astrophys.* **468** 885 (2007)
47. Sluse D et al., arXiv:0809.2983
48. Хамитов И М и др. *Письма в Астрон. журн.* **32** 570 (2006) [Khamitov I M et al. *Astron. Lett.* **32** 514 (2006)]
49. Canizares C R *Astrophys. J.* **263** 508 (1982)
50. Zakharov A F, Popović L Č, Jovanović P *Astron. Astrophys.* **420** 881 (2004)
51. Zakharov A F, Popović L Č, Jovanović P, in *Gravitational Lensing Impact on Cosmology: Proc. of the 225 IAU Symp.* (Eds Y Mellier, G Meylan) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2005) p. 363
52. Zakharov A F, Popović L Č, Jovanović P, in *Exploring the Universe: Proc. of XXXIXth Rencontres de Moriond Workshop* (Eds Y Giraud-Heraud, J Tran Thanh Van, J Dumarchez) (Hanoi: GIOI Publ., 2005) p. 41
53. Popović L Č et al. *Astrophys. J.* **637** 620 (2006)
54. Jovanović P et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **386** 397 (2008)
55. Chartas G et al. *Astrophys. J.* **568** 509 (2002)
56. Chartas G et al. *Astrophys. J.* **606** 78 (2004)
57. Dai X et al. *Astrophys. J.* **589** 100 (2003)
58. Dai X et al. *Astrophys. J.* **605** 45 (2004)
59. Oort J *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **6** 249 (1932)
60. Zwicky F *Helv. Phys. Acta* **6** 110 (1933)
61. Astier P et al. *Astron. Astrophys.* **447** 31 (2006)
62. Komatsu E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 330 (2009)
63. Zakharov A F et al. *Space Sci. Rev.* **148** 301 (2009)
64. Zakharov A F et al. *ЯФ* **73** 1921 (2010) [*Phys. Atom. Nucl.* **73** 1870 (2010)]
65. Paczynski B *Astrophys. J.* **304** 1 (1986)
66. Griest K *Astrophys. J.* **366** 412 (1991)
67. Alcock C et al. *Nature* **365** 621 (1993)
68. Moniez M, in *Cosmological Physics with Gravitational Lensing: Proc. of the XXXVth Rencontres de Moriond, Les Arcs, France, March 11–18, 2000* (Eds J Trần Thanh Vân, Y Mellier, M Moniez) (Les Ulis: EDP Sci., 2001) p. 3
69. Aubourg E et al. *Nature* **365** 623 (1993)
70. Udalski A et al. *Acta Astron.* **53** 291 (2003)
71. Udalski A et al. *Astrophys. J.* **628** L109 (2005)
72. Bond I A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **327** 868 (2001)
73. Crots A P S *Astrophys. J.* **399** L43 (1992)
74. Baillon P et al. *Astron. Astrophys.* **277** 1 (1993)
75. Ansari R et al., astro-ph/9602015
76. Ansari R et al. *Astron. Astrophys.* **324** 843 (1997)
77. Kerins E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **323** 13 (2001)
78. Belokurov V et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **357** 17 (2005)
79. Kerins E et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **365** 1099 (2006)
80. Le Du Y, in *Cosmological Physics with Gravitational Lensing: Proc. of the XXXVth Rencontres de Moriond, Les Arcs, France, March 11–18, 2000* (Eds J Trần Thanh Vân, Y Mellier, M Moniez) (Les Ulis: EDP Sci., 2001) p. 65
81. Calchi Novati S et al. *Astron. Astrophys.* **443** 911 (2005)
82. Calchi Novati S et al. *Astrophys. J.* **695** 442 (2009)
83. De Paolis F et al. *Astron. Astrophys.* **432** 501 (2005)
84. Ingrosso G et al. *Astron. Astrophys.* **445** 375 (2006)
85. Ingrosso G et al. *Astron. Astrophys.* **462** 895 (2007)
86. Riffesser A, Seitz S, Bender R *Astrophys. J.* **684** 1093 (2008)
87. Dominik M, Hirshfeld A C *Astron. Astrophys.* **289** L31 (1994)
88. Dominik M, Hirshfeld A C *Astron. Astrophys.* **313** 841 (1996)

89. Gurevich A V, Zybin K P, Sirota V A *Phys. Lett. A* **214** 232 (1996)
90. Гуревич А В, Зыбин К П, Сирота В А *УФН* **167** 913 (1997) [Gurevich A V, Zybin K P, Sirota V A *Phys. Usp.* **40** 869 (1997)]
91. Захаров А Ф, Сажин М В *Письма в ЖЭТФ* **63** 894 (1996) [Zakharov A F, Sazhin M V *JETP Lett.* **63** 937 (1996)]
92. Захаров А Ф, Сажин М В *ЖЭТФ* **110** 1921 (1996) [Zakharov A F, Sazhin M V *JETP* **83** 1057 (1996)]
93. Zakharov A F *Phys. Lett. A* **250** 67 (1998)
94. Захаров А Ф *Астрон. журн.* **76** 379 (1999) [Zakharov A F, *Astron. Rep.* **43** 325 (1999)]
95. Zakharov A F, in *Dark Matter in Astro- and Particle Physics: Proc. of the Intern. Conf. DARK 2000, Heidelberg, Germany, 10–14 July, 2000* (Ed. H V Klapdor-Kleingrothaus) (Berlin: Springer-Verlag, 2001) p. 364
96. Zakharov A F, in *Cosmological Physics with Gravitational Lensing: Proc. of the XXXVth Rencontres de Moriond, Les Arcs, France, March 11–18, 2000* (Eds J Trân Thanh Vân, Y Mellier, M Moniez) (Les Ulis: EDP Sci., 2001) p. 57
97. Zakharov A *Gen. Relat. Grav.* **42** 2301 (2010)
98. An J H et al. *Astrophys. J.* **572** 521 (2002)
99. Bennett D P et al. *Astrophys. J.* **579** 639 (2002)
100. Poindexter S et al. *Astrophys. J.* **633** 914 (2005)
101. Alcock C et al. *Astrophys. J.* **541** 734 (2000)
102. Alcock C et al. *Astrophys. J.* **542** 281 (2000)
103. Lasserre T et al. *Astron. Astrophys.* **355** L39 (2000)
104. Lasserre T, in *Dark Matter in Astro- and Particle Physics: Proc. of the Intern. Conf. DARK 2000, Heidelberg, Germany, 10–14 July, 2000* (Ed. H V Klapdor-Kleingrothaus) (Berlin: Springer-Verlag, 2001) p. 341
105. Tisserand P et al. *Astron. Astrophys.* **469** 387 (2007)
106. Wyrzykowski L et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **397** 1228 (2009); arXiv:0905.2044
107. Kerins E, in *Cosmological Physics with Gravitational Lensing: Proc. of the XXXVth Rencontres de Moriond, Les Arcs, France, March 11–18, 2000* (Eds J Trân Thanh Vân, Y Mellier, M Moniez) (Les Ulis: EDP Sci., 2001) p. 43
108. Mao S, Paczynski B *Astrophys. J. Lett.* **374** L37 (1991)
109. Wolszczan A, Frail D A *Nature* **355** 145 (1992)
110. Mayor M et al., arXiv:0906.2780
111. Perryman M et al. "Report by the ESA – ESO Working Group on Extra-Solar Planets", <http://www.stecf.org/coordination/eso-esa/extrasolar/report.pdf>; astro-ph/0506163
112. Konacki M et al. *Nature* **421** 507 (2003)
113. Léger A et al. *Astron. Astrophys.* **506** 287 (2009)
114. Queloz D et al. *Astron. Astrophys.* **506** 303 (2009)
115. Perryman M A C *Ann. Rev. Phys.* **63** 1209 (2000)
116. Udry S, Santos N C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **45** 397 (2007)
117. Santos N C *New Astron. Rev.* **52** 154 (2008)
118. Johnson J A *Publ. Astron. Soc. Pacific* **121** 309 (2009)
119. Zakharov A F *Astron. Astrophys.* **293** 1 (1995)
120. Zakharov A F *Astrophys. Space Sci.* **252** 369 (1997)
121. Gould A, Loeb A *Astrophys. J.* **396** 104 (1992)
122. Bolatto A D, Falco E E *Astrophys. J.* **436** 112 (1994)
123. Bennett D P, in *Exoplanets* (Ed. J Mason) (Berlin: Springer, 2008) p. 47; arXiv:0902.1761
124. Bennett D P et al. *Astrophys. J.* **684** 663 (2008)
125. Bennett D P et al. "A census of exoplanets in orbits beyond 0.5 AU via space-based microlensing", White Paper for the Astro2010 Science Frontier Panel (2008); arXiv:0902.3000
126. Dong S et al. *Astrophys. J.* **698** 1826 (2009)
127. Zakharov A F et al. *Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl.* **15** 114 (2010)
128. Dominik M *Astron. Astrophys.* **349** 108 (1999)
129. Bond I A et al. *Astrophys. J. Lett.* **606** L155 (2004)
130. Beaulieu J-P et al. *Nature* **439** 437 (2006)
131. Gould A et al. *Astrophys. J.* **644** L37 (2006)
132. Gaudi B S et al. *Science* **319** 927 (2008)
133. Abe F et al. *Science* **305** 1264 (2004)
134. Dominik M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **367** 669 (2006)
135. Dominik M, Horne K, Bode M F *Astron. Geophys.* **47** 3.25 (2006)
136. Chung S-J et al. *Astrophys. J.* **650** 432 (2006)
137. Kim D et al. *Astrophys. J.* **666** 236 (2007)
138. Ingrosso G et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **399** 219 (2009)
139. Ingrosso G et al. *Gen. Relat. Grav.* **43** 1047 (2011); arXiv:1001.4342
140. Ingrosso G et al., arXiv:1001.2105
141. Dominik M et al. *Astron. Nachrichten* **331** 671 (2010)
142. An J H et al. *Astrophys. J.* **601** 845 (2004)
143. Agol E, Krolik J *Astrophys. J.* **524** 49 (1999)
144. Witt H J, Mao S *Astrophys. J.* **430** 505 (1994)
145. Богданов М Б, Черепашук А М *Письма в Астрон. журн.* **21** 570 (1995) [Bogdanov M B, Cherepashchuk A M *Astron. Lett.* **21** 505 (1995)]
146. Богданов М Б, Черепашук А М *Астрон. журн.* **72** 873 (1995) [Bogdanov M B, Cherepashchuk A M *Astron. Rep.* **39** 779 (1995)]
147. Богданов М Б, Черепашук А М *Астрон. журн.* **77** 842 (2000) [Bogdanov M B, Cherepashchuk A M *Astron. Rep.* **44** 745 (2000)]
148. Богданов М Б, Черепашук А М *Астрон. журн.* **79** 1102 (2002) [Bogdanov M B, Cherepashchuk A M *Astron. Rep.* **46** 996 (2002)]
149. Gaudi B S, Gould A *Astrophys. J.* **513** 619 (1999)
150. Dominik M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **361** 300 (2005)
151. Heyrovský D *Astrophys. J.* **656** 483 (2007)
152. Pejcha O, Heyrovský D *Astrophys. J.* **690** 1772 (2009)
153. Valencia D, Sasselov D D, O'Connell R J *Astrophys. J.* **665** 1413 (2007)
154. Selsis F et al. *Astron. Astrophys.* **476** 1373 (2007)
155. Sasselov D D *Nature* **451** 29 (2008)
156. Sasselov D D, Valencia D, O'Connell R J *Phys. Scripta* **T130** 014035 (2008)
157. Rivera E J et al. *Astrophys. J.* **634** 625 (2005)
158. Lovis C et al. *Nature* **441** 305 (2006)
159. Udry S et al. *Astron. Astrophys.* **469** L43 (2007)
160. Marcy G W et al. *Phys. Scripta* **T130** 014001 (2008)
161. Mayor M, Udry S *Phys. Scripta* **T130** 014010 (2008)
162. Mayor M et al. *Astron. Astrophys.* **493** 639 (2009)
163. Bouchy F et al. *Astron. Astrophys.* **496** 527 (2009)
164. Howard A W et al. *Astrophys. J.* **696** 75 (2009)
165. Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T *Icarus* **101** 108 (1993)
166. Jones B W, Underwood D R, Sleep P N *Astrophys. J.* **622** 1091 (2005)
167. Lammer H et al. *Astron. Astrophys. Rev.* **17** 181 (2009)
168. Ji J et al. *Astrophys. J.* **585** L139 (2003)
169. Ji J et al. *Astrophys. J.* **631** 1191 (2005)
170. Ji J et al. *Astrophys. J.* **657** 1092 (2007)
171. Fischer D A et al. *Astrophys. J.* **675** 790 (2008)
172. Pilat-Lohinger E et al. *Astrophys. J.* **681** 1639 (2008)
173. Pilat-Lohinger E *Int. J. Astrobiol.* **8** 175 (2009)
174. Ji J-H et al. *Res. Astron. Astrophys.* **9** 703 (2009)
175. McNeil D S, Nelson R P *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401** 1691 (2010); arXiv:0910.5299
176. Wright J T, arXiv:0909.0957
177. Wright J T et al. *Astrophys. J.* **693** 1084 (2009)
178. Bennett D P et al. *Astrophys. J.* **647** L171 (2006)
179. Oakley P H H, Cash W *Astrophys. J.* **700** 1428 (2009)
180. Cash W (and the New Worlds Team) *EPJ Web Conf.* **16** 07004 (2011)
181. Cash W *Astrophys. J.* **738** 76 (2011); arXiv:1106.2127
182. Cash W *Nature* **442** 51 (2006)