

Захаров Александр Федорович
доктор физико-математических наук
Объединенный Институт Ядерных Исследований
г. Дубна
alex.fed.zakharov@gmail.com

ПОИСК ЭКЗОПЛАНЕТ С ПОМОЩЬЮ ГРАВИТАЦИОННОГО МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Аннотация. В 2009 году итальяно-швейцарско-российская группа авторов открыла первую экзопланету в Туманности Андромеды, а также показала, что с помощью этого метода можно найти много других легких экзопланет в нашей и близлежащих галактиках. Создаваемый в настоящее время космический телескоп NASA Nancy Grace Roman значительно увеличит потенциал обнаружения экзопланет, которые могут быть обнаружены с помощью транзитов и гравитационного микролинзирования.

Ключевые слова: экзопланеты, гравитационное микролинзирование, транзиты

Zakharov Alexander Fyodorovich
Doctor of Physics and Mathematics
Joint Institute of Nuclear Research
Dubna
alex.fed.zakharov@gmail.com

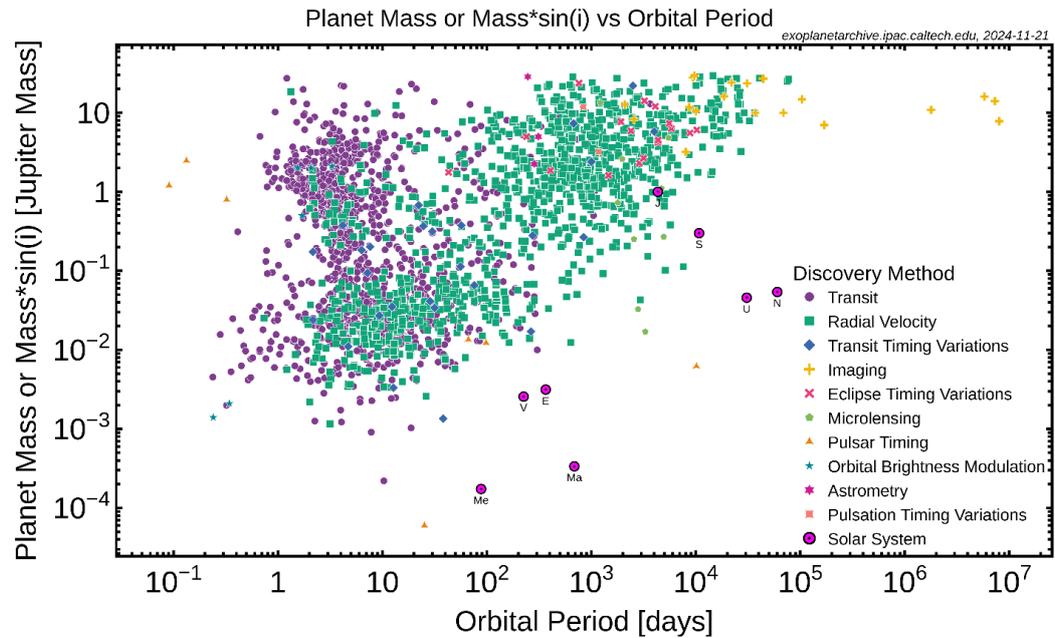
SEARCHING FOR EXOPLANETS WITH GRAVITATIONAL MICROLENSING: NEW OPPORTUNITIES

Abstract. In 2009, an Italian-Swiss-Russian team discovered the first exoplanet in the Andromeda Nebula and showed that this method could be used to find many more light exoplanets in our own and nearby galaxies. NASA's Nancy Grace Roman Space Telescope, currently under construction, will greatly increase the potential for detecting exoplanets that can be detected using transits and gravitational microlensing.

Key words: exoplanets, gravitational microlensing, transits

Основы теории гравитационного линзирования и некоторые результаты наблюдений, известных ко времени написания книги, приведены в [1]. Известно, что при наличии массивных объектов свет распространяется не по прямым линиям, а отклоняется в гравитационном поле, причем при слабых гравитационных полях угол отклонения, подсчитанный А. Эйнштейном в 1915 году в 2 раза больше, чем угол отклонения, предсказываемый теорией гравитации И. Ньютона. Эти предсказания Эйнштейна об отклонении луча света в гравитационном поле впервые были проверены и подтверждены А. Эддингтоном и Ф. Дайсоном при наблюдении отклонения положения звезд во время солнечного затмения 1919 года. Тем самым известно, что гравитационное поле фокусирует лучи света, т. е. действует как линза, но линза, не имеющая фокусного расстояния. В 1936 году А. Эйнштейн рассмотрел действие гравитационной фокусировки

и пришел к выводу, что этот эффект вряд ли может быть обнаружен с помощью астрономических наблюдений, поскольку если линзы и источники -- звезды в нашей Галактике, то угол между различными изображениями очень мал порядка 10^{-3} угловой секунды, тем самым наблюдать отдельные изображения при такой постановке задачи невозможно, по крайней мере, в 1930-е годы прошлого века. Однако вскоре после публикации статьи Эйнштейна знаменитый астроном Фритц Цвикки после обсуждения этого вопроса со известным русским изобретателем телевидения В. К. Зворыкиным опубликовал работу, где он утверждал, что гравитационные линзы могут быть обнаружены в случае, если и источники и линзы — галактики, поскольку в этом случае расстояние между изображениями порядка нескольких угловых секунд, в случае рассмотрения простейшей модели линзы Шварцшильда (в рамках этой модели предполагается наличие точечной гравитирующей массы). Тем не менее, первая гравитационно-линзовая система 0957+16 А, В была открыта Волшем и др. только в 1979 году, т. е. более, чем через 40 лет после предсказания Цвикки. Однако, оказывается, что и в случае рассмотрения в качестве линз и источников объектов звездной массы в нашей Галактике или ближайших галактиках, эффект гравитационного линзирования может быть обнаружен, как показал советский физик - теоретик А. В. Бялко [2]. Поскольку при расположении источников на космологическом расстоянии, угловое расстояние между изображениями порядка 10^{-6} угловых секунд, в случае если линзы имеют звездные массы, этот режим линзирования называется гравитационным микролинзированием. Для того чтобы увеличить вероятность обнаружения такого события, Бялко сделал предположение, что может быть усиление излучения фоновой звезды на уровне 1%, что довольно нереалистично, поскольку большая часть звезд имеет собственную переменность существенно превосходящую 1%. К 1986 году существенно улучшились наблюдательные возможности телескопов и вычислительные мощности компьютеров и при рассмотрении аналогичной задачи американский астроном польского происхождения Б. Пачинский сделал более реалистичное предположение, заключающееся в том, что наблюдаемое при микролинзировании излучение должно превосходить фоновое более, чем на 34%, кроме того, как отметил Пачинский, кривая блеска фоновой звезды должна быть ахроматичной, симметричной и должна отсутствовать повторяемость и эти свойства являются признаками микролинзирования, и в этом случае необходимо мониторить несколько миллионов звезд в направлении на Галактический Балдж и/или Магеллановы Облака [3]. Через несколько лет после публикации этой статьи Пачинского были обнаружены первые события микролинзирования как в направлении на Большое Магелланово Облако, так и в направлении на Галактический Балдж, коллаборациями MACHO, EROS, OGLE. Обзор теории гравитационного линзирования результаты наблюдений приведены в статье [4,5]. Важный результат сообщила недавно коллаборация OGLE, так польские астрономы установили что массовая доля компактных объектов с массами в диапазоне $1.8 \times 10^{-4} M_{\odot}$ to $6.3 M_{\odot}$ не могут составлять более чем 1% темной материи в нашей Галактике [6] (где M_{\odot} -- масса Солнца), тем самым получены существенные ограничения на первичные черные дыры, которые, как предполагалось ранее, могли составлять существенную часть темной материи.



В 1991 году Ш. Мао и Б. Пачинский рассмотрели случаи, когда микролинзой является двойная звездная система или звезда с экзопланетой (т. е. планетой вне нашей Солнечной системы) и сделали предсказание о том [7], что первая экзопланета может быть открыта с использованием микролинзирования в случае активного использования этого подхода для поиска экзопланет. Несмотря на то, что первая экзопланета была найдена вблизи пульсара, а затем была обнаружена экзопланета (вблизи звезды главной последовательности) с помощью измерения скорости хозяйской звезды по доплеровскому смещению спектральных линий, за что швейцарские астрономы Дидье Кело и Мишель Майор в 2019 году получили нобелевскую премию по физике, представляется, что предсказание Мао и Пачинского правильное, поскольку поиск экзопланет с использованием микролинзирования проводился с весьма небольшими финансовыми затратами, так, в частности, космические миссии с целью поиска экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования, пока только подготавливаются, как мы обсудим ниже. Отметим, что к 2006 году самая легкая экзопланета с массой, превосходящей массу Земли всего в 5.5 раз, была открыта с помощью микролинзирования [8]. Несмотря на то, что общее число экзопланет, открытых с помощью гравитационного микролинзирования, порядка нескольких десятков (см. рисунок 1), однако существенная часть этих событий находится области, в которой экзопланета может иметь твердую поверхность и температура на этой поверхности может находиться при температуре от 0 до 100 градусов Цельсия, т. е. вода может находиться в жидкой фазе, тем самым, астрономические условия на поверхности такой экзопланеты могут быть приемлемы для существования жизни, подобной жизни на Земле. Несомненно, что наличие атмосферы на экзопланете может существенно увеличить температуру на ее поверхности, а жизнь в

¹ Положение обнаруженных экзопланетных систем в зависимости от орбитального периода и массы Юпитера (масса Земли примерно в 320 раз меньше массы Юпитера). Несмотря на то, что большая часть открытых экзопланет открыты с помощью метода транзитов и измерения доплеровских скоростей, существенная часть легких экзопланет с большими орбитальными периодами была открыта с помощью гравитационного микролинзирования. Рисунок сформирован с помощью программного обеспечения, имеющегося на сайте <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>.

каких-то простейших формах может существовать и под поверхностью экзопланет. Тем не менее, для содержательного обсуждения возможности внеземной жизни в различных космических объектах, в том числе на экзопланетах необходимо получить существенно больше наблюдательной информации, чем это имеется в настоящее время.

Большая часть обнаруженных в настоящее время экзопланет найдены с помощью метода транзитов и метода по измерению радиальных скоростей звезд по доплеровскому смещению спектральных линий излучения звезд, имеющих экзопланеты. Метод наблюдения транзитов заключается в том, что при прохождении видимого положения экзопланеты по диску звезды поток излучения уменьшается, причем это уменьшение тем больше, чем больше площадь экзопланеты, поэтому несомненно значительно легче обнаружить экзопланеты большого радиуса, например такие, как Юпитеры, и поскольку отношение радиусов Юпитера и Земли порядка 11.2 отношение их площадей порядка 125, тем самым можно сказать, что при сходных остальных параметрах задачи, прохождение экзопланеты типа Юпитера по диску звезды оказывает уменьшение принимаемого потока излучения в 125 раз большее, чем происходит при прохождении по диску той же звезды экзопланеты типа Земли. Метод обнаружения экзопланет, основанный на измерении скоростей звезды по доплеровскому смещению ее спектральных линий, основан на том, что в двойной системе (звезда + экзопланета) оба компонента системы движутся вокруг общего центра масс и скорость радиального движения звезды может быть измерены с точностью меньше 1 м/сек, т. е. можно определить скорость движения звезды, движущейся медленнее пешехода на улице. Ясно, что с помощью такой методики легче обнаружить в окрестности звезды более массивные экзопланеты. С помощью этой методики Майор и Кело обнаружили экзопланету у звезды главной последовательности 51 Pegasi с массой примерно равной массе Солнца, а масса экзопланеты 51 Pegasi b составляет больше 0.472 массы Юпитера [9]. В 2005 году М. Майор совместно Дж. Марси получил премию Шао, которую также называют азиатской нобелевской премией и Дж. Марси считался наряду с М. Майором реальным кандидатом на нобелевскую премию по физике, поскольку он со своими коллегами открыл 70 из первых 100 экзопланет, однако в 2015 году был уволен из университета Беркли по причинам, связанным с сексуальным харассментом [10].

В 2009 году группа авторов провела моделирование возможности детектирования экзопланет по наблюдениям пиксельного линзирования (когда усиливается не наблюдаемый поток излучения от фоновой звезды, а принимаемый сигнал в пикселе ССД матрицы) в направлении на Туманность Андромеды, которая является ближайшей галактикой, видимой из северного полушария [11]. Оказалось, что в случае микролинзирования звездой, у которой есть экзопланета, наряду с локализованным возмущением, обсуждаемым ранее Б. Пачинским, есть нелокализованное изменение кривой блеска для звезды с экзопланетой по сравнению с кривой блеска микролинзирования для звезды без планеты. Кроме того, в работе [11] показано, что аномалия RA-99-N2, обнаруженная ранее в событии пиксельного линзирования, может быть проинтерпретирована как пиксельное линзирование звездой с экзопланетой с массой порядка 6.34 массы Юпитера и в этом случае можно говорить об открытии первой экзопланеты в другой галактике. Об этом открытии писали средства массовой информации всего миру, включая BBC [12], Fox News [13], New Scientist [14], РИА Новости [15] и др., а в Италии и Швейцарии были выпущены специальные программы, рассказывающие об этом открытии. По сути дела в нашей работе [11] путем

компьютерного моделирования показано, что, как и было ранее предсказано Пачинским, метод поиска экзопланет с использованием гравитационного микролинзирования весьма эффективен и относительно небольшое число обнаруженных экзопланет с помощью такого подхода связано с тем, что относительно небольшое число исследователей работает в этой области и финансирование их исследований весьма незначительно по сравнению с методами с использованием наблюдений транзитов и измерений радиальных движений звезд по доплеровскому смещению спектральных линий. Кроме того, в работе [11] показано, что использование гравитационного микролинзирования поможет открыть экзопланеты на большом расстоянии от нас, как в нашей Галактике, так и в соседних. В работе [11] проведено компьютерное моделирование предстоящих астрономических наблюдений и на рисунке 2 черными точками показаны массы экзопланет и их расстояние от хозяйских звезд.

В случае рассмотрения микролинзирования звезд-гигантов важное значение имеет то, что разные области видимого диска звезды имеют различный свет и различную поляризацию, поэтому кривая блеска для таких звезд может быть различной для разных спектральных диапазонов (т. е. требование об ахроматичности кривых блеска при микролинзировании может не выполняться). Учет этих факторов становится особенно важным при рассмотрении микролинзирования двойными системами или звездами с экзопланетами, поскольку в этом случае возникает каустическая сеть в плоскости источника, и поскольку на каустиках коэффициент усиления гравитационно-линзовой системы обращается в бесконечность, то та область диска звезды - источника, которая находится вблизи каустики, весьма существенно усиливается. Выражение для коэффициента усиления гравитационной линзы вблизи особенности типа сборки приведено в работе [16]. Предварительные итоги поисков экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования подведены в коротком обзоре [17].

В работах [18,19] рассмотрены поляризационные эффекты при микролинзировании двойными линзами или звездами с экзопланетами. Действительно, свет, излучаемый звездами-источниками, может быть значительно поляризован, если в атмосфере звезды-источника активен эффективный механизм рассеяния фотонов и система линзирования вызывает сильно усиление, сильно меняющееся в зависимости от положения усиливаемой области на диске звезды источника. Наилучшими кандидатами для наблюдения поляризации являются сильно усиленные события со звездами-источниками, принадлежащими к классу холодных гигантских звезд, в которых звездный свет поляризуется в результате рассеяния фотонов на пылинках, содержащихся в их оболочках. Наличие в атмосфере звезды внутренней полости, лишенной пыли, создает поляризационные профили со структурой из двух пиков. Следовательно, временной интервал между ними дает важную наблюдаемую величину, непосредственно связанную с размером внутренней полости и модельными параметрами системы линз. Показано, что во время события микролинзирования ожидаемая переменность поляризации может разрешить возникающую в некоторых случаях неоднозначность, связанную с интерпретацией возмущений, наблюдаемых вблизи максимума кривой блеска события, рассматривая модель линзирования звездой с экзопланетой или модель линзирования двойной звездной системой. Рассмотрен конкретный случай события, для которого приведены значения параметров, соответствующие двум решениям. Затем, используя поляризационную модель звезды-источника, были вычислены два ожидаемых поляризационных профиля. Положение двух пиков, появляющихся на поляризационных

кривых, и характерный временной интервал между ними позволяют нам различать двойные линзы и линзы, состоящие из звезды и экзопланеты.

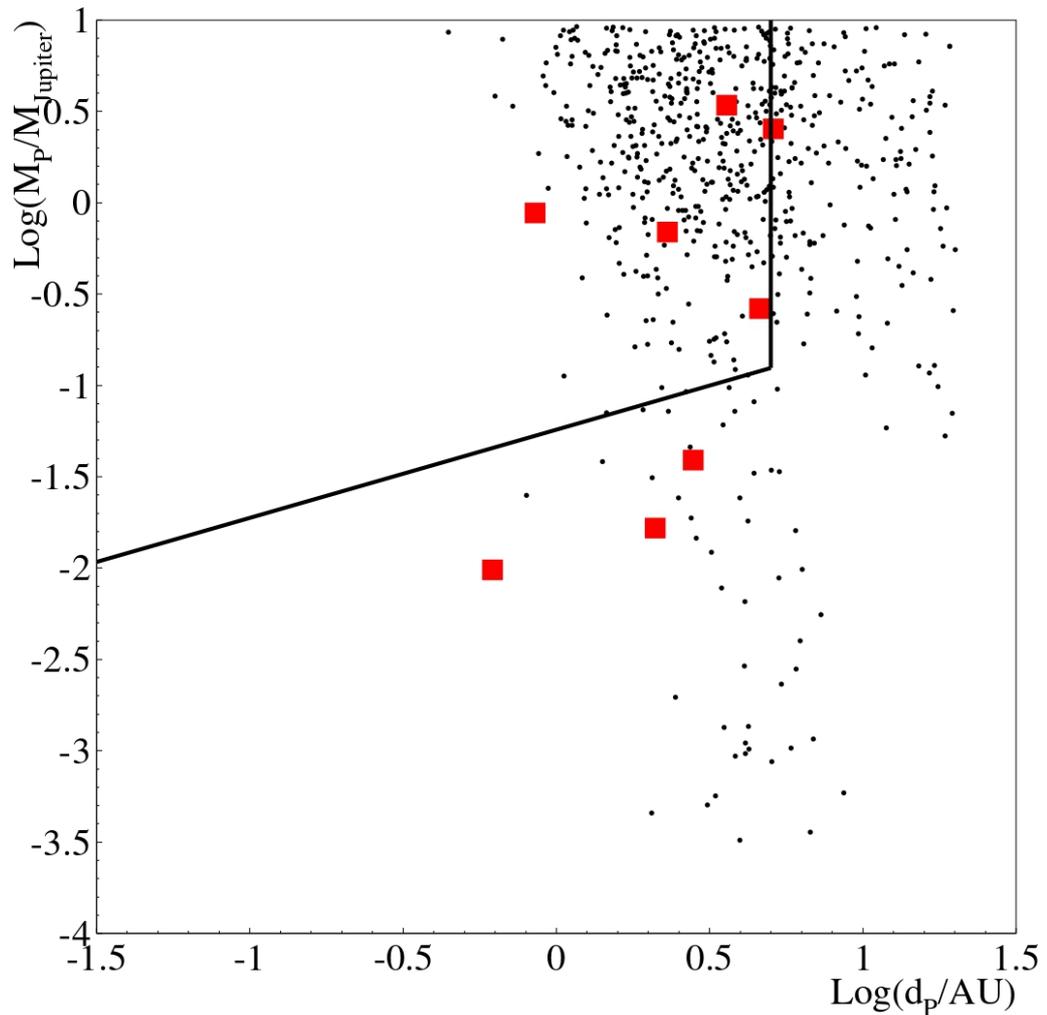


Рисунок 2.²

² Положения экзопланет, которые можно было бы обнаружить с помощью гравитационного микролинзирования, в зависимости от их расстояния от хозяйской звезды d_p в астрономических единицах (AU) и M_p в единицах масс Юпитера. Область, расположенная выше и левее двух отрезков черной прямой, является доступной для открытия экзопланет с помощью метода транзитов и измерения скоростей звезд по доплеровскому смещению спектральных линий. Черными точками показаны ожидаемые параметры экзопланетных систем, которые могут быть найдены с помощью гравитационного микролинзирования. Рисунок взят из статьи [11]. Красными квадратами отмечены экзопланетные системы, найденные с помощью гравитационного микролинзирования.

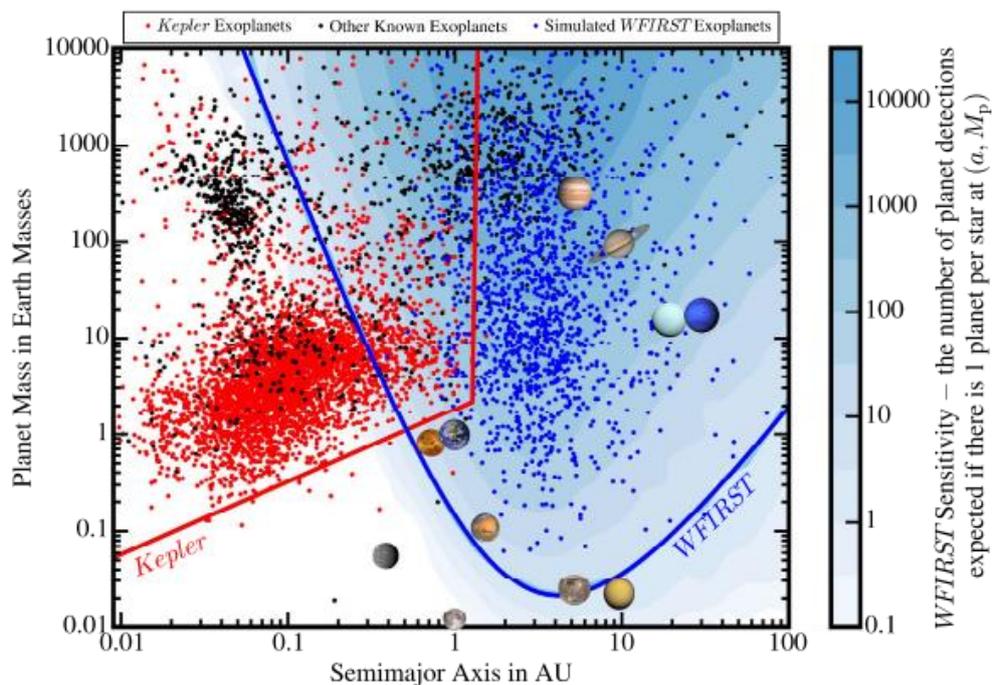
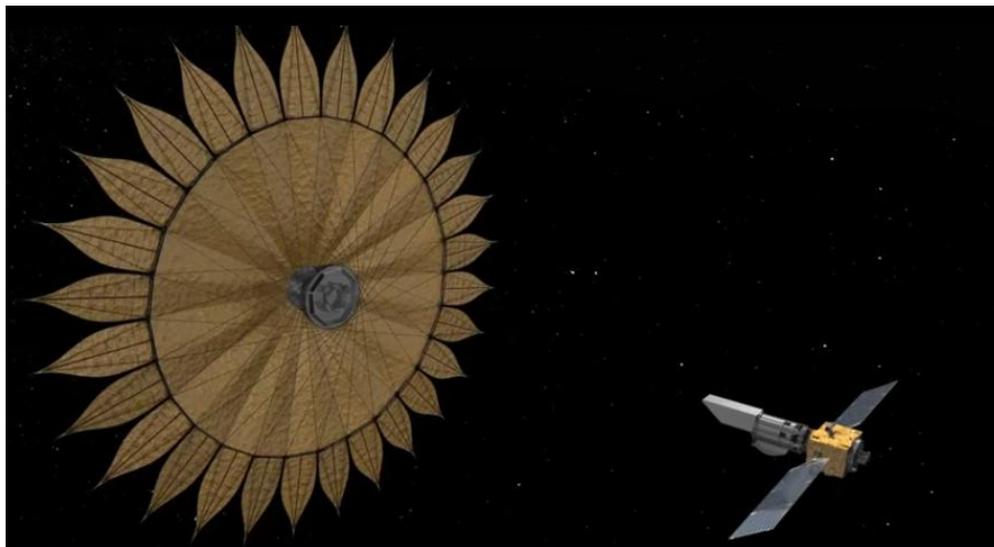


Рисунок 3.³

Американское космическое агентство NASA готовит к полету космический телескоп WFIRST – AFTA (Wide-Field Infra-Red Survey Telescope -- Astrophysics Focused Telescope Assets). Ожидается, что этот инструмент позволит с использованием транзитов обнаружить примерно в 200 раз больше экзопланет, чем космический телескоп Kepler и в 40 раз больше, чем TESS. Предсказывается (см. Рис. 3), что будут обнаружены тысячи событий гравитационного микролинзирования, во многих из которых возможно будет обнаружить признаки наличия экзопланет вблизи звезды — линзы. Дополнительно к обнаружению экзопланет будут проверены различные модели темной энергии, т. е. окажется возможным проверить является ли Λ -член Эйнштейна приемлемой моделью темной энергии или необходимы использовать более сложные модели, обсуждаемые в настоящее время в теории. В 2020 году администрация NASA решила назвать этот телескоп в честь в честь Нэнси Грейс Роман (Nancy Grace Roman), которая руководила астрономическим департаментом NASA в период подготовки телескопа Хаббл, так, что Нэнси Роман часто называют «матерью Хаббла». Это второй администратор NASA, именем которого назван космический телескоп (первым был Джеймс Вебб). Ранее американские космические телескопы назывались обычно именами знаменитых ученых.

³ Оценка возможностей обнаружения экзопланет с помощью космического телескопа WFIRST-AFTA и с использованием метода гравитационного микролинзирования. Основан на результатах моделирования, представленных в работе [20]. На рисунке также указаны планеты Солнечной системы и крупные спутники, такие Луна, Ганимед и Титан. Ясно видно, что рисунок 3 по сути дела обобщает выводы, представленные в работе [11] и рисунке 2.

Рисунок. 4.⁴

Скажем несколько слов о другом перспективном космическом проекте по исследованию экзопланет. Более 20 лет назад замечательный астроном и физик - экспериментатор Уэбстер Кэш (Университет Колорадо, Денвер, США) начал развивать проект Звездная Тень (Starshade) [22-24]. Впоследствии это проект получил двойное название Звездная Тень — Новые Миры (Starshade – New Worlds), см. Рис. 4. Поскольку поток излучения звезды на много порядков превосходит излучение планеты типа Земли, то идея этого проекта заключается в том, чтобы существенно уменьшить излучение хозяйской звезды, заслонив звезду экраном, подобно тому как солнечный коронограф заслоняет, диск Солнца при наблюдении Солнечной короны в отсутствие солнечного затмения. Тем самым, для астрономических двойников Земли, исследуя спектральные линии их атмосферы, можно ожидать, что удастся обнаружить признаки жизни. Но в случае и необнаружения признаков жизни у двойников Земли, эта информация была бы крайне важна для уточнения моделей эволюции Эедои и возникновения жизни на ней. Поэтому развитие проекта Starshade, появится возможность исследовать атмосферы экзопланет и тем самым их возможную обитаемость. Ранее У. Кэш был автором других очень интересных проектов, так, в частности, в 2000 году он и его соавторы показали [25], что имеется возможность создания рентгеновского интерферометра (MAXIM) с угловым разрешением порядка 0.1 угловых микросекунд (при длине базы интерферометра порядка 1 км). Несмотря на заинтересованность астрономов в использовании результатов наблюдений такого инструмента, проект MAXIM не получил дальнейшего развития в силу большого бюджета, необходимого для создания такого инструмента.

Автор благодарен организаторам научного симпозиума «Биосферная космология В.И. Вернадского и современное естествознание» (МГУ) за приглашение выступить по представленной актуальной теме, связанной с поисками экзопланет с использованием гравитационного микролинзирования.

⁴ Рисунок художника, иллюстрирующий возможность наблюдений экзопланеты с помощью двух космических аппаратов, разрабатываемого в настоящее время NASA проекта Starshade, в котором имеется телескоп и экран, загораживающий излучение хозяйской звезды (рисунок взят с сайта NASA <https://science.nasa.gov/science-research/science-enabling-technology/technology-highlights/starshade-enable-first-images-earth-sized-exoplanets/>).

Список использованных источников и литературы

1. Захаров, А. Ф. Гравитационные линзы и микролинзы. – Москва: Янус-К, 1997. – 328 с.
2. Бялко, А. В. Фокусировка излучения гравитационным полем. Астрон. ж. -- 1969. -- Т. 46. -- С. 998 – 1002
3. Paczynski, B., Gravitational microlensing by the galactic halo. *Astrophys. J.* -- 1986. V. 304 – P. 1–5.
4. Захаров, А.Ф., Сажин М. В. Гравитационное микролинзирование, *Успехи физ. Наук* — 1998. -- Т. 168, Вып. 10 – С. 1041 – 1082.
5. Zakharov, A. F. Gravitational microlensing and dark matter problem: results and perspectives. *Publ. Astron. Obs. Belgrade.* -- 2003. -- V. 75. P. 27 – 35. [astro-ph/ 0212009].
6. Mroz, P., Udalski, A., Szymanski, M. K., et al. No massive black holes in the Milky Way halo, *Nature* – 2024 – V. 632, Iss. 8026, P. 749-751.
7. Mao, S., Paczynsky, B., Gravitational Microlensing by Double Stars and Planetary Systems, *Astrophys. J. Lett.* -- 1991.-- V. 374. -- L37 - L40.
8. Beaulieu, J.P., Bennett, D. P., Fouque, P. et al. Discovery of a cool planet of 5.5 Earth masses through gravitational microlensing, *Nature* – 2006. -- V. 439. -- P. 437–440.
9. Mayor, M. Queloz, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star». *Nature* – 1995.- - V. 378 (6555) -- P. 355–359.
10. <https://www.science.org/content/article/geoffrey-marcy-prominent-berkeley-astronomer-resigns-after-sexual-harassment-judgement> prominent Berkeley astronomer,
11. Ingresso, G., Calchi Novati, S., De Paolis, F., Jetzer, Ph., Nucita, A. A., Zakharov, A. F. Pixel lensing as a way to detect extrasolar planets in M31, *MNRAS* -- 2009. -- V. 399 – P. 219 -- 228.
12. <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/8097141.stm>
13. <https://www.foxnews.com/story/first-planet-in-another-galaxy-possibly-found>
14. Battersby, S., First extragalactic exoplanet may have been found, *New Scientist*, 10 June 2009, <https://www.newscientist.com/article/dn17287-first-extragalactic-exoplanet-may-have-been-found/>
15. <https://ria.ru/20090618/174737604.html>
16. Zakharov, A. F. On the magnification of gravitational lens images near cusps. *Astron. & Astrophys.* -- 1995. -- V. 75. P. 1 – 4.
17. Захаров, А.Ф., Поиски экзопланет с помощью гравитационного микролинзирования, *Успехи физ. наук* — 2011. -- Т. 181, Вып. 10 – С. 1114 – 1121.
18. Ingresso G., Calchi Novati S., De Paolis F., Jetzer Ph., Nucita A. A., Strafella F., Zakharov A. F., Polarization in microlensing events towards the Galactic bulge, *MNRAS.* -- 2012. -- V. 426 -- P. 1496 – 1506.
19. Ingresso G., De Paolis F., Nucita A. A., Strafella F., Calchi Novati S., Jetzer Ph., Luizzi G., Zakharov A. F., Polarization in binary microlensing events, *Physica Scripta.* -- 2014, V. 89 (8) -- ID. 084001.
20. Penny, M. T., Gaudi, B. S., Kerins E. et al. Predictions of the WFIRST Microlensing Survey. I. Bound Planet Detection Rates // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* -- 2019 – V. 241:3 (34 pp.).
21. Science Definition Team (SDT) and WFIRST Study Office, https://roman.ipac.caltech.edu/docs/WFIRST-AFTA_SDT_Report_150310_Final.pdf

22. Cash, W., MacEwen, H. A., Kasdin, J., Seager, S., Arenberg, J. UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts II - Direct studies of exo-planets with the New Worlds Observer, in SPIE Proceedings [SPIE Optics & Photonics 2005 - San Diego, California, USA (Sunday 31 July 2005)], -- 2005. -- V. 5899. -- P. 58990S-1 – 58990S-12. doi:10.1117/12.617377.

23. Cash, W., Detection of Earth-like planets around nearby stars using a petal-shaped occulter, *Nature*. -- 2006. -- V. 442. -- Iss. 7098. -- P. 51 -- 53.

24. Cash, W., Analytic Modelling of Starshades, *Astrophys. J.* -- 2011. -- V. 738:76 (13 pp).

25. Cash, W., Shipley, A., Osterman, S. Joy, M., Laboratory detection of X-ray fringes with a grazing-incidence interferometer, *Nature*. -- 2000. -- V. 407. -- Iss. 6801. -- P. 160 -- 162.