

Минглибаев М.Дж., Шомшекова С.А.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Казахстан, г. Алматы
e-mail: minglibayev@gmail.com, shomshekova.saule@gmail.com

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКЗОПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ КЛАССАМ ЦЕНТРАЛЬНЫХ ЗВЕЗД

Исследование экзопланетных систем является актуальным направлением оно, увеличило наши представления о Вселенной и дало дополнительные возможности изучение физических и динамических свойств планетных систем. В настоящее время подтвержденных экзопланет около 4000. Целью настоящей работы является выявления некоторых статических закономерностей экзопланетных систем путем статистического анализа по последним данным европейского каталога по экзопланетным системам. Такой анализ необходим для дальнейшего исследования экзопланетных систем, особенно при изучении динамической эволюции в этапе нестационарности. В связи с развитием инструментальной базы и улучшением методов поиска обнаруживаются планеты землеподобного типа, как каменная планета Ross 128 b. Мы выполнили статистический анализ по количеству экзопланет в зависимости от спектрального класса центральной звезды. Оказалось, что большинство известных экзопланет вращается вокруг звезд спектральных классов F, G, K и M. Мы выявили, что звезды класса G имеют наибольшее количество экзопланетных систем, соответственно спектральный класс G имеет наибольшее количество экзопланет. По значениям эффективной температуры центральной звезды по нашей статической диаграмме можно определить, к какому классу относится та или иная звезда, вокруг которой вращается экзопланета. Интересно, у большинства экзопланет наклонения лежат между 80 и 95 градусами, при этом эксцентриситеты могут быть различными. Также построено распределение экзопланет по аргументу перигелия и по наклону орбит.

Ключевые слова: экзопланетные системы, центральная звезда, спектральный класс, переменность масс, орбитальные элементы, статистический анализ.

Minglibayev M.Zh., Shomshekova S.A.

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty
Fesenkov Astrophysical Institute Kazakhstan, Almaty,
e-mail: minglibayev@gmail.com, shomshekova.saule@gmail.com

Statistical analysis of exoplanet systems by spectral classes of central stars

The study of exoplanetary systems is an important field of research, which increased our understanding of the universe and gave additional opportunities to study the physical and dynamic properties of planetary systems. To this day the list of confirmed exoplanets are near 4000. The purpose of this work is to identify some of the static patterns of exoplanetary systems by statistical analysis according to the latest European catalog data on exoplanetary systems. Such an analysis is necessary for the further study of exoplanetary systems, especially when studying the dynamic evolution in the nonstationary stage. In connection with the development of the instrumental base and the improvement of the search methods, earth-like planets are discovered, like the rocky planet Ross 128b. We performed a statistical analysis of the number of exoplanets depending on the spectral class of the central star. It turned out that most of the known exoplanets revolve around stars of the F, G, K and M spectral classes. We have revealed that stars of class G have the greatest number of exoplanetary systems, respectively the spectral class G has the greatest number of exoplanets Interestingly, most exoplanets have inclinations between 80 and 95

degrees, while eccentricities can be different. The distribution of exoplanets were constructed according to the argument of the pericenter and the inclination of the orbits.

Key words: exoplanetary systems, spectral class, central stars, mass variability, orbital elements, statistical analysis.

Минглибаев М.Дж., Шомшекова С.А.

өл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
В.Г. Фесенков атындағы Астрофизика институты, Қазақстан, Алматы қ.
e-mail: minglibayev@gmail.com, shomshekova.saule@gmail.com

Экзопланеталық жүйелердің орталық жұлдыздарының спектрлік классы бойынша статистикалық талдауы

Экзопланеталық жүйелерді зерттеу қазіргі кезде өзекті болып табылады және ғаламды түсінуге және физикалық, динамикалық зерттеулер үшін қосымша мүмкіндіктер берді. Бұл жұмыстың мақсаты экзопланеталық жүйелер бойынша еуропалық каталогтың соңғы деректері арқылы статистикалық талдаулар жүргізу болып табылады. Қазіргі уақытта бекітілген экзопланеталық жүйелер шамамен 4000 құрайды. Бұл мақаладағы статистикалық талдаулар экзопланеталық жүйелердің динамикалық эволюциясын одан әрі қарай зерттеуге қажет. Техникалық базаның дамуы және экзопланеталық жүйелерді іздеу әдістерінің дамуына байланысты, жер тәрізді планеталар Ross 128 b табылды. Орталық жұлдыздың спектрлік классына тәуелді экзопланеталар санына статистикалық талдау жүргізілді. Белгілі экзопланеталардың көбісі F, G, K және M спектрлік жұлдыздарының айналасындағы планеталар. Біз G класындағы жұлдыздардың айналасында экзопланеталық жүйелер саны көп екендігін анықтадық. Орталық жұлдыздың эффективті температура мәндеріне сәйкес, біздің статистикалық диаграммалардан, экзопланета қандай спектрлік кластағы жұлдыздың маңында айналатындығына көз жеткізуге болады. Бір қызығы, экзопланеталардың көпшілігі 80-нен 95 градусқа дейінгі көлбеулікке ие, ал эксцентриситеттері әртүрлі болуы мүмкін. Сонымен қатар, экзопланеталардың аргумент перицентрі және көлбеулік шамалары бойынша диаграмма тұрғызылды.

Түйін сөздер: экзопланеталық жүйелер, спектрлік класс, орталық жұлдыз, айналымына масса, орбиталық элементтер, статистикалық талдау.

Введение

Исследования экзопланетных систем в настоящее время является актуальным направлением в астрономии и небесной механике. Основная задача в изучении экзопланет – выявления закономерностей образования и эволюция планетных систем. Открытие и подтверждение экзопланетных систем в основном были выполнены космическими телескопами. Первая экзопланета 51 PEG b и ее центральная звезда 51 Peg в созвездии Пегаса была открыта в 1995 году [1]. К настоящему времени вне Солнечной системы известных, подтвержденных экзопланетных систем более 4000 [2]. В экзопланетных системах распределения центральной звезды, по видимому, не охватывает всех спектральных классов звезд. К тому же есть ряд интересных звезд с планетными системами спектральный класс которых четко не определен.

Представляет интерес анализ распределение центральной звезды экзопланетных систем по спектральным классам и анализ соответствующей экзопланетной системы в связи с свойствами родительской звезды особенности характе-

ристики планет входящие в эту систему. Особое внимание будет уделены нестационарным звездам, которые меняют массу со временем из-за корпускулярного излучение [4-9]. Как известно, звезды до сорока процентов исходной массы возвращают обратно в космос в виде пыли и излучения [8].

Известно, что звезды рождаются из большого газо-пылевого облака в результате процесса вращения и гравитационного сжатия и дальнейшего его уплотнения. Формирующаяся звезда окружена газо-пылевым диском, в котором медленно устанавливается равновесие между силой гравитации и давлением газа. Внутренняя температура звезды увеличивается, и запускается процесс термоядерного синтеза, в результате чего звезда «зажигается». Одновременно в диске формируются первые небольшие протопланеты. Когда звезда полностью сформирована, а из диска постепенно выветривается газ и пыль, превращаясь в тысячи мелких протопланет. С течением времени в результате столкновения протопланет и образования сферических тел больших размеров возникают планеты [10-11]. Рабочей группой Международного Астрономического союза

(МАС), было предложено ввести границу по массе между планетами и звездами ($M = 13$ масс Юпитера). Эта масса считается достаточной для поддержания реакции горения водорода. Иными

словами, планета – это объект с массой, меньшей 13 масс Юпитера (масса Юпитера $2 \cdot 10^{27}$ кг), а объект с большой массой считается коричневым карликом или звездой [1].

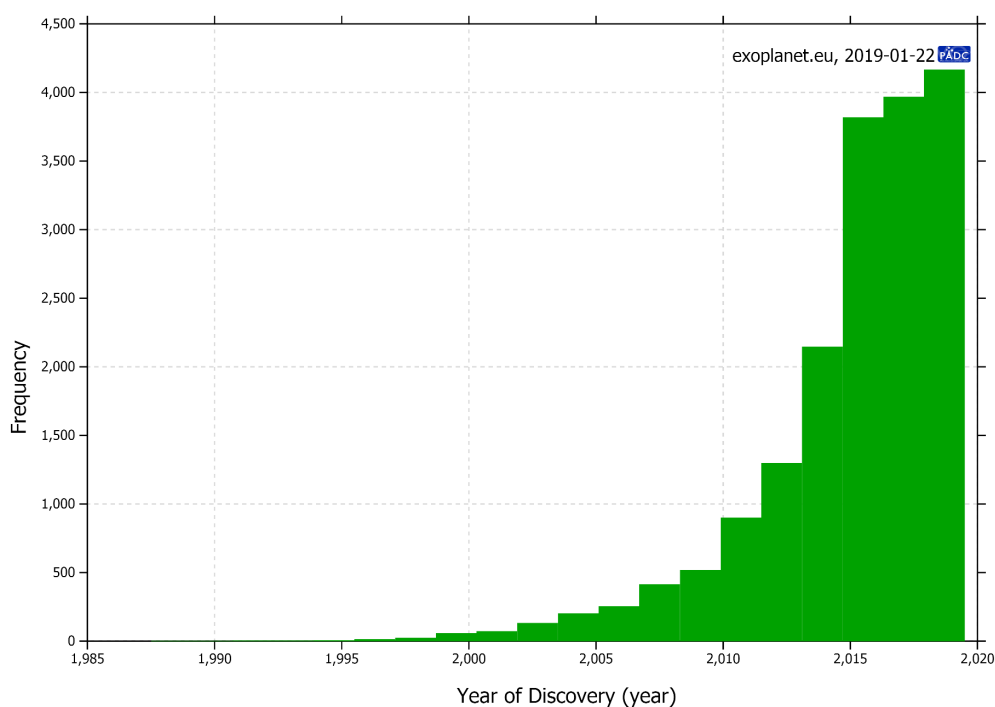


Рисунок 1 – Кумулятивные результаты количества экзопланет, открытых для каждого года

Основные методы обнаружение экзопланет

Методов обнаружения экзопланетных систем очень много. Но есть основные методы, с помощью которых обнаружено наибольшее количество экзопланет. Многие из этих методов оказались достаточно трудоемкими – требующими особых условий наблюдений (очень высокого разрешения, высокой точности определения координат и т.д.). Наиболее эффективными оказались два метода. Метод доплеровской спектроскопии (он же метод лучевых скоростей) – метод основан на том, что планета и звезда вращаются вокруг общего центра масс. Орбитальное вращение звезды приводит к тому, что линии в ее спектре периодически смещаются то в одну, то в другую сторону. Скорость звезды, «наведенная» планетой, оказывается порядка всего нескольких десятков или даже единиц метров в секунду, однако прецизионные спектральные наблюдения позволяют ее обнаружить. Именно методом

доплеровской спектроскопии было открыто большинство экзопланет. Наблюдения транзитов – этот метод основан на том, что при планетной системы «с ребра» планета, с точки зрения земного наблюдателя, может периодически проходить по диску звезды, незначительно (обычно на 1-3%) ослабляя ее блеск. Точные фотометрические наблюдения позволяют построить «кривую блеска» (график зависимости блеска звезды от времени) и найти радиус планеты и период ее вращения по орбите [12]. Очень много космических аппаратов было задействовано для открытия новых экзопланетных систем. Работа миссии Kepler оказалась очень плодотворной, благодаря одновременным наблюдениям за 200 000 звезд в созвездии Лебедя, которое находится в Млечном Пути. В результате количество вне солнечных планет, открытых методом транзитов резко возросло. На рисунке 2 представлены все возможные методы обнаружения экзопланет, предложенные разными исследователями в разные годы [2].

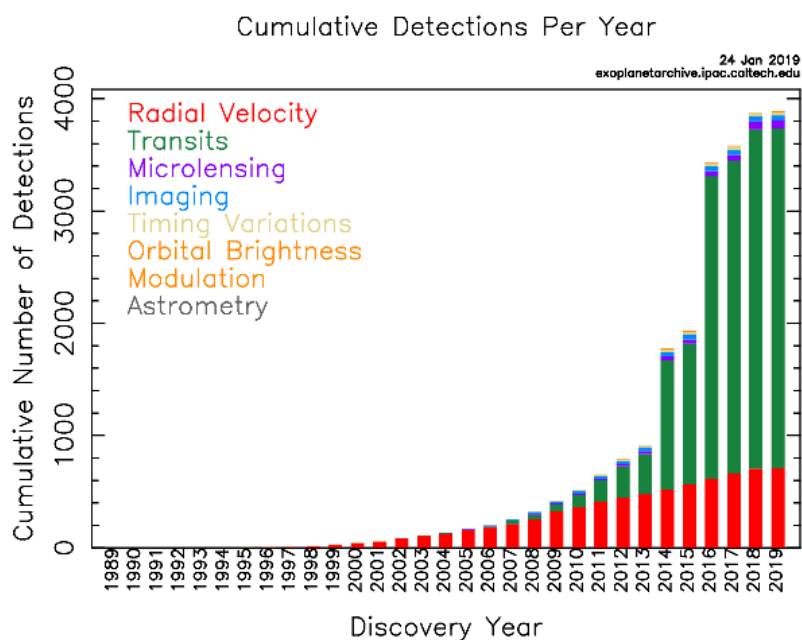


Рисунок 2 – Кумулятивные результаты количества экзопланет, открытых различными методами к началу каждого года

Основные характеристики экзопланетных систем

Известно, что Солнечная система является первой планетной системой свойство которой относительно хорошо изучена. Все экзопланетные системы обладают более или менее подобными свойствами солнечной системы. Большинство экзопланетные системы с центральной звездой обладают одной планетой [2-3].

Спорадическая активность звезды – вспышки и выбросы корональной массы, – оказывает важное влияние на эволюцию атмосфер планет, особенно если планеты на близких орбитах. Поскольку звездная активность возрастает с уменьшением звездного возраста, последствия этих экстремальных явлений для атмосфер планет особенно важны для

Высокие потоки звездного излучения в мягком рентгене и крайнем ультрафиолете (XUV) приводят к нагреву и последующему расширению верхних слоев атмосферы и к образованию надтепловых атомов, которые также могут влиять на энергетический баланс в термосфере планеты. В зависимости от состава атмосферы и эффективности нагрева состояния верхних атмосфер могут меняться от гидростатического к гидродинамическому режимам. Орбиты внесолнечных планет сильно различается по величине

не эксцентриситета и по величине наклонения. Формирования внесолнечных планет напрямую зависит от массы центральной звезды. Выяснилось, что распространенность планет-гигантов быстро растет с увеличением массы звезд. Также оказалось, что планеты у звезд промежуточной массы (1.5-3 массы Солнца) в большинстве своем массивны и находятся на широких орбитах с малым эксцентриситетом [11].

Из за солнечного ветра Солнце и большинство звезд класса G теряют массу со скоростью 10^{-14} массы солнца в год. Нестационарные звезды ранних спектральных классов теряют массу намного больше, например звезды WR теряют массу со скоростью 10^{-5} массы солнца в год. А звезды класса M теряют массу со скоростью 10^{-6} - 10^{-7} массы солнца в год. Такие существенные потери масс центральной звезды сильно влияют на динамическую эволюцию соответствующих экзопланетных систем. Установлена тесная взаимосвязь между эволюционными изменениями родительской звезды и экзопланетной системы. На ранних стадиях эволюции планетных систем родительская звезда находится на Главной Последовательности и протопланетный диск еще сохраняется. В этой стадии аккреция вещества протопланетного диска на поверхность родительской звезды может вызывать эпизодические анизотропные выбросы массы – джеты,

которые оказывают влияние на формирование планет, а также могут вызывать их разрушение. В некоторых случаях при многократных сбросах оболочек могут образовываться планеты с разными эксцентриситетами и наклонениями. Джеты, формирующиеся на разных расстояниях от звездного экватора, оказывают влияние на все параметры орбит. Для расчета моделей подобных планетных систем можно принять анизотропный характер процессов потери массы. А вот для формирующихся планет влияние ассиметричных долгоживущих джетов может быть значительным. Например, наклон планетной орбиты может измениться на несколько градусов. Нами, по различным каталогам был проведен статистический анализ по количеству подтвержденных экзопланетных систем по спектральным классам их родительских звезд. В качестве систем, похожих на Солнечную, были выбраны системы, чьи планеты движутся по орбитам с малым эксцентриситетом, и не имеющие массивных планет в зоне эффективной земной орбиты [4,8].

Классификация планетных систем по спектральным классам родительских звезд

Оказалось, что большинство известных экзопланет вращаются вокруг звезд спектральных классов F, G, K и M. Наше Солнце относится к классу G. Массы звезд этого класса составляют от 0,8 до 1,7 солнечной массы. Мы обнаружили, что звезды класса G имеют наибольшее количество экзопланетных систем. Мы построили диаграмму по спектральному классу центральных звезд подтвержденных экзопланет по каталогу «The Extrasolar Planets Encyclopaedia» [2].



Рисунок 3 – Распределение экзопланет по спектральным классам центральной звезды

После образования некоторых планет, внутри родительской звезды могут протекать ядерные реакции горения изотопов водорода, гелия, лития и бора, после чего они медленно остывают. Поверхностная температура 1000 -2000К. Этим карликам присвоены спектральные классы L и T [13]. В данное время известны L-1;T-5;WD-2;sdBV-2. Ниже приведено статистический анализ по спектральному классу центральных звезд обнаруженных экзопланет по источнику.

Статистический анализ планетных систем по орбитальным параметрам европейского каталога экзопланетных систем

Экзопланеты по массе делятся на три типа: Планеты – гиганты такие как Юпитер и Сатурн (с массой больше 60 масс Земли или 0,19 масс Юпитера); Нептуны, такие как Уран и Нептун (с массой больше 7 масс Земли); Планеты земного типа такие как Земля и Венера (масса меньше 7 масс Земли). По степени нагрева излучением родительской звезды планеты делятся на 7 типов: горячие $R/R_{эф} < 0.1$; очень теплые $0.1 < R/R_{эф} < 0.4$; теплые $0.4 < R/R_{эф} < 0.8$; холодные $1.3 < R/R_{эф} < 3$; очень холодные $3 < R/R_{эф} < 12$; ледяные $R/R_{эф} > 12$. Здесь R – большая полуось орбиты планеты, $R_{эф}$ – радиус эффективной земной орбиты [1].

На рисунке 4 можно отметить различные экзопланеты с разными значениями по температуре центральной звезды и по большой полуоси планеты: HD 149382 b: $a=0.0256$ (AU), $T_{ef,host,s}=35500$ K; NY Vir (AB) c: $a=7,54$ (AU), $T_{ef,host,s}=33000$ K; HIP 77900 b: $a=3200$ (AU), $T_{ef,host,s}=13700$ K; Betta Cir b: $a=6656$ (AU), $T_{ef,host,s}=8676$ K. На диаграмме самая большая эффективная температура центральной звезды вокруг которой вращается экзопланета под названием NSVS 1425 (AB) d: $a=3.74$ (AU), $T_{ef,host,s}=42000$ K [2].

По значениям эффективной температуры центральной звезды можно определить к какому классу относится та или иная звезда, вокруг которой вращается экзопланета.

На рисунке 5. показано распределение экзопланет по эксцентриситету и по наклонению. γ 1Leo b: $i=172,1^\circ$, $e=0,144$; VB 10 b: $i=96,9^\circ$, $e=0,98$; HD 131664 b: $i=167,1^\circ$, $e=0,638$; HD 190 228 b: $i=4,5^\circ$, $e=0,5$; WASP-80 b: $i=89,92^\circ$, $e=0,07$. У большинства экзопланет наклонения лежат между 80 и 95 градусов при этом эксцентриситеты могут быть различными. Например, HATS-67 b: $i=79,02^\circ$, $e=0,014$ и HD 80606 b: $i=89,285^\circ$, $e=0,93366$ [2].

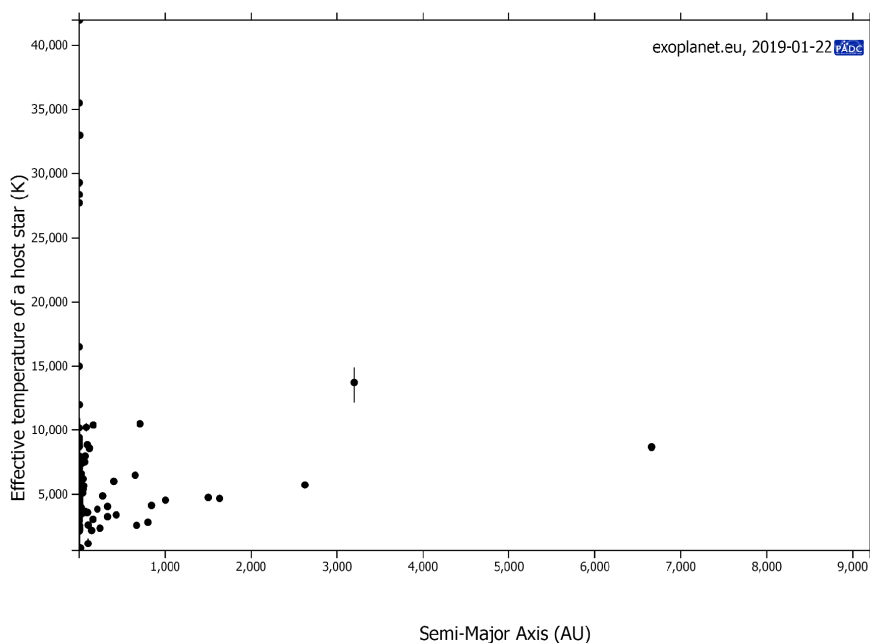


Рисунок 4 – Распределение экзопланет по эффективной температуре центральных звезд и по большой полуоси экзопланет

На рисунке 6. показано распределение экзопланет по аргументу перигелия и по наклону. Карра And b: $i=121^\circ$, $\omega=129,5^\circ$; beta Pic b: $i=88,87^\circ$, $\omega=189,3^\circ$; PSR1257 12 d: $i=47^\circ$, $\omega=108,3^\circ$; Kepler-46 c $i=87,25^\circ$, $\omega=329,4^\circ$. Аргумент пе-

рицентра экзопланет очень различен. Например, самые маленькие значения у экзопланеты WASP-6 b: $i=88,47^\circ$, $\omega=1,7^\circ$ и большие значения аргумента перигелия у экзопланеты WASP-162 b: $i=89,3^\circ$, $\omega=358,1^\circ$ [2].

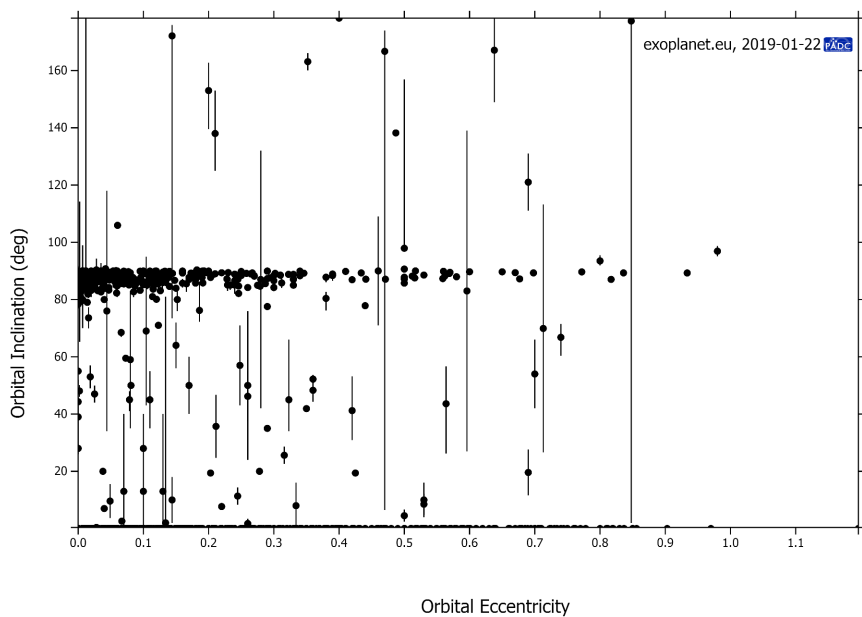


Рисунок 5 – Распределение экзопланет по эксцентриситету и по наклону

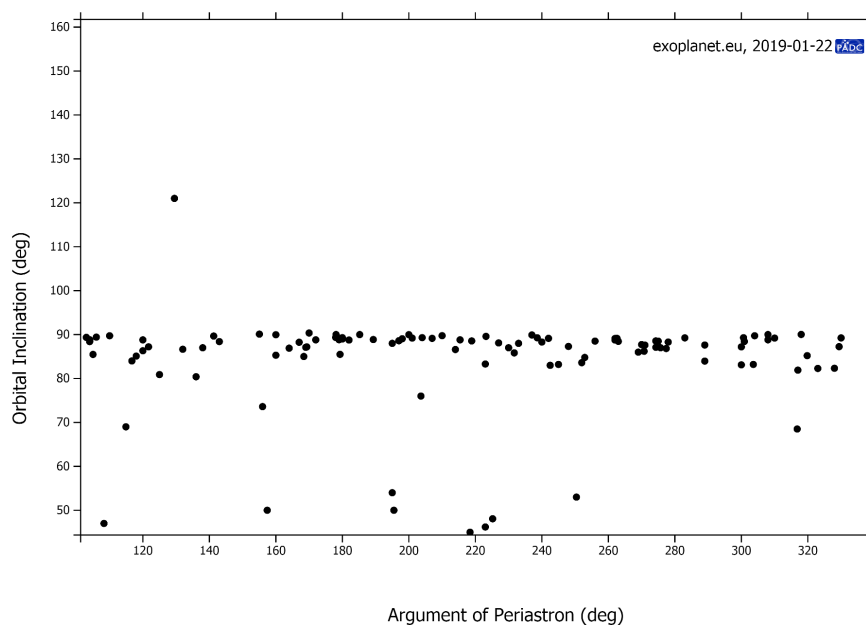


Рисунок 6 – Распределение экзопланет по аргументу перигелия и по наклонению

Происхождение эксцентриситетов внесолнечных планет-гигантов может быть вызвано действием различных механизмов: гравитационного взаимодействия между соседними планетами-гигантами, взаимодействия планеты-гиганта с планетезиμαлями на ранних стадиях образования планетной системы, влияния дополнительного звездного или планетного компаньона, и т.п. Последний эффект в ряде случаев кажется наиболее интересным. Средняя скорость некоторых планет с высоким эксцентриситетом показывает дрейф, согласующийся с присутствием долгопериодического компаньона. Гравитационное влияние более удаленного компаньона может вызвать наблюдаемый высокий орбитальный эксцентриситет. Этот эффект был предложен как механизм увеличения эксцентриситета планеты, вращающейся вокруг звезды 16 Cyg B. Однако, что такой процесс, действуя в одиночку, привел бы к чрезмерному количеству планет как очень высоким ($e > 0,6$), так и с очень низким ($e < 0,1$) эксцентриситетом. Таким образом, требуется, по крайней мере, еще один дополнительный механизм для воспроизведения наблюдаемого распределения по эксцентриситетам. Фактически, ни один из предложенных механизмов возникновения эксцентриситета не в состоянии в одиночку объяснить наблюдаемое распределение эксцентриситетов внесолнечных планет [1].

Экзопланеты вокруг двойных систем

Большинство планет обнаруженных у двойных звезд находятся на орбитах «S типа» (вокруг одной компонентной двойной их также называют внутренними планетами) и остальные на орбитах «P типа» (вокруг обеих компонентов; также орбита еще называются внешними или циркумбинарными). По данным [15] известно около 200 экзопланет вокруг двойных звездных систем.



Рисунок 7 – Распределение экзопланет по спектральным классам двойных звезд

Исследования динамической эволюции экзопланетных систем в двойных звездных системах подробно рассматривались в работе Muterspaugh, Matthew W и другие [16]. На рисунке 7 показано количество экзопланет вокруг двойных звезд по спектральным классам.

Заключение

По статистическим данным и нашим исследованиям можно отметить, что по массам больше всего открыто планет типа Юпитера, то есть в интервале от 0 до 3 масс Юпитера.

Существуют определенные условия, чтобы сделать планету пригодной для жизни земного типа, и на эти условия влияют несколько ключевых факторов. Размер и температура звезды, а также орбита планеты во многом определяет состояние жидкой воды на поверхности. Планеты, слишком близкие к звезде, настолько горячие, что любая вода на поверхности кипит, а планеты слишком далеко от звезды настолько холодные, что любая жидкая вода замерзает. Размер и масса планеты определяют, может ли она поддерживать атмосферу [11,14]. Самые горячие звезды имеют температуру до 35 000

К. Звезды с температурой 10 000 К белые, с температурой 6000 К жёлтые в том числе наша Солнце, с температурой 3000–3500 К красные гиганты.

Поэтому, статистический анализ по количеству подтвержденных экзопланетных систем по спектральным классам центральных звезд и статистический анализ по орбитальным элементам является актуальным для дальнейшего исследования динамической эволюции экзопланетных систем.

Используя различные каталоги [2,3,15], был проведен статистический анализ экзопланетных систем около нестационарных родительских звезд разных спектральных классов. Оказалось, что большинство известных экзопланет вращается вокруг звезд спектральных классов F, G, K и M. Массы этих звезд составляют от 0,8 до 1,7 M_{\odot} . Мы обнаружили, что наибольшее количество экзопланетных систем, принадлежат звездам класса G.

Благодарности. Работа поддерживается программой целевого финансирования BR05336383 Аэрокосмического комитета Министерства обороны и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан.

Литература

- 1 Udry S, Fischer D, Queloz D., A Decade of Radial-Velocity Discoveries in the Exoplanet Domain // *Protostars and Planets*. – 2007. – P. 685-699
- 2 <http://exoplanet.eu>
- 3 <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- 4 Черепашук А.М. Тесные двойные звезды. Часть II. – М.: Физматлит, 2013. – 572 с.
- 5 Фесенков В.Г. Корпускулярная радиация как фактор эволюции Солнца и звёзд. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1952. – 69 с.; Солнце и солнечная система. Избр. труды. – М., 1976. – С. 118-132.
- 6 Омаров Т.Б. Динамика гравитирующих систем метagalктики. – Алма-Ата: Наука. Казахской ССР, 1975. – 144 с.
- 7 Lukyanov L.G., Dynamical evolution of stellar orbits in close binary systems with conservative mass transfer // *Astron. Rep.* – 2008. – Vol. 52, N 8. – P.680–693.
- 8 Сурдин В.Г. Рождение звезд. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 232 с.
- 9 Софронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. – М.: Наука, 1969. – 243 с.
- 10 Veras D., Hadjidemetriou J. and Christopher A. An Exoplanet’s Response to Anisotropic Stellar Mass-Loss During Birth and Death // *MNRAS*. – 2016. – Vol. 435. – P. 2416.
- 11 Luger R., Barnes R., Lopez E. et al. Habitable evaporated cores: Transforming minineptunes into super-earth in the habitable zones of M dwarfs // *Astrobiology*. – 2015. – Vol.15. – P. 57-88.
- 12 Karttunen H. et al. Exoplanets. In: Karttunen H. et al. (eds), *Fundamental Astronomy*, – Berlin: Springer, Heidelberg, 2017. – 550 p.
- 13 Терещенко В.М. Экзопланеты: параметры и проблемы // *Вестник КазНПУ им. Абая. Сер. физ.-матем.* – 2004. – №3 (11). – С.86-98.
- 14 Bonfils X., Astudillo-Defru N., Diaz R., et al. A temperate exo-Earth around a quiet M dwarf at 3.4 parsecs // *Astron. & Astrophys.* – 2018. – Vol. 613. – A25.
- 15 <http://www.openexoplanetcatalogue.com>
- 16 Muterspaugh, Matthew W., Konacki, Maciej et al. Observational Techniques for Detecting Planets in Binary Systems // Chapter to appear in the book “Planets in Binary Star Systems,” ed. Nader Haghighipour. – Springer publishing company, 2007. – 33 p.

References

- 1 S. Udry, D. Fischer, D. Queloz, Protostars and Planets, 685-699 (2007).
- 2 <http://exoplanet.eu>
- 3 <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- 4 A.M. Cherepashuk. Close binary stars. Part. II, (Moscow, Fizmatlit, 2013), 572p. (in Russ)
- 5 V.G. Fesenkov, Korpuskulyarnaya radiatsiya kak faktor evolyutsii Solntsa i zvozd, (Moscow, Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1952), 69p.; Solntse i solnechnaya sistema. Izbr. trudy, (Moscow, 1976), 118-132. (in Russ)
- 6 T.B. Omarov, Dinamika gravitiruyushchikh sistem metagalaktiki, (Alma-Ata, Nauka. Kazakhskoy SSR, 1975), 144p. (in Russ)
- 7 L.G. Lukyanov, Astron. Rep., 52, 8, 680–693 (2008).
- 8 V.G. Surdin, The birth of stars, (Moscow, Editorial URSS, 1999), 232p. (in Russ)
- 9 V.S. Sofronov, The evolution of the pre-planetary cloud and the formation of the Earth and planets, (Moscow, Nauka, 1969), 243p. (in Russ)
- 10 D. Veras, J. Hadjidemetriou, A. Christopher, MNRAS, 435, 2416 (2016).
- 11 R. Luger, R. Barnes, E. Lopez et al., Astrobiology, 15, 57-88 (2015).
- 12 H. Karttunen et al., Exoplanets. In: Karttunen H. et al. (eds), Fundamental Astronomy, (Springer, Berlin, Heidelberg, 2017). 550p.
- 13 V.M. Tereshhenko, Bulletin Abay Kazakh National Pedagogical University. Ser. Phys.-Mat., 3 (11), 86-98 (2004). (in Russ)
- 14 X. Bonfils., N. Astudillo-Defru., R. Diaz., et al. Astron. & Astrophys., 613, A25 (2018).
- 15 <http://www.openexoplanetcatalogue.com>
- 16 M.W. Muterspaugh, M. Konacki et al. Observational Techniques for Detecting Planets in Binary Systems // Chapter to appear in the book “Planets in Binary Star Systems,” ed. Nader Haghighipour (Springer publishing company, 2007), 33p.