

значимой выборки. Кроме этого различные наблюдательные программы имели разную эффективность в обнаружении экзопланет с разными массами и орбитальными периодами. Это привело к существенному искажению распределений, непосредственно получаемых из каталогов экзопланет, а именно, недооценке количества планет малых масс и переоценке количества массивных планет с малыми орбитальными периодами (так называемых «горячих юпитеров»). В.И. Ананьевой впервые были проанализированы основные факторы наблюдательной селекции и предложены методы их ослабления, изучены скорректированные распределения, согласующиеся с космогоническими моделями, найдены новые особенности этих распределений. Результаты являются новыми и опубликованы в высокорейтинговых журналах, цитируются и признаны международным сообществом.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Объем диссертации составляет 106 страниц.

Глава 1 посвящена анализу экзопланетных исследований, главным образом, усилиям различных авторов учесть неоднородность наблюдательных данных, следующую из разной точности спектрографов, разного уровня активности родительских звезд и разной продолжительности наблюдательных программ. Как правило, для исключения неоднородности наблюдательных данных рассматривались только планеты, обнаруженные на одном спектрографе с фиксированной инструментальной точностью или на инструментах одной обсерватории. В результате статистические распределения плохо согласуются друг с другом и имеют существенно ограниченные, не согласующиеся между собой выборки звезд с экзопланетами, фрагментарно отражающие общие фундаментальные закономерности.

В Главе 2 приведены результаты исследования распределений экзопланет, обнаруженных методом лучевых скоростей (RV-планет), по минимальным (проективным) массам и орбитальным периодам. Для коррекции неоднородности данных предложен матричный метод, где на диаграмме «минимальная масса – орбитальный период» оценены вероятности обнаружить планету с данными минимальной массой и орбитальным периодом. Для коррекции наблюдаемых распределений каждая экзопланета учитывалась со статистическим весом, обратным вероятности ее обнаружения. При этом вычисление матрицы «обнаружимости» только по звездам с обнаруженными планетами приводит к занижению количества

планет малых масс, которое может достигать порядка величины. Предложен способ, позволяющий обойти эту трудность.

Полученное скорректированное распределение по минимальным массам планет с массами 0.02-13 масс Юпитера следует кусочно-степенному закону: в области 0.02-0.087 масс Юпитера (орбитальные периоды 1-100 суток) показатель степени $-2.5...-3.0$, в области 0.21-1.7 масс Юпитера (орбитальные периоды 1-3981 суток) показатель степени составляет $-0.8...-1.0$, в области 1.7-13 масс Юпитера (орбитальные периоды 1-3981 суток) показатель степени оценивается в $-1.7...-2.0$. В области 0.087-0.21 масс Юпитера наблюдается минимум, связанный с хорошо известным дефицитом планет с периодами короче 10 суток, называемым «пустыней горячих нептонов».

Скорректированные распределения RV-планет по орбитальным периодам были сравнены с распределением по орбитальным периодам транзитных планет «Кеплера», и было получено хорошее согласие. Также скорректированные распределения RV-планет по минимальным массам сравнены с предсказаниями космогонических теорий популяционного синтеза, и наблюдается хорошее согласие.

В **Главе 3** приведено изучение распределения по массам транзитных экзопланет: планет, обнаруженных космическим телескопом «Кеплер», и планет, открытых многочисленными наземными наблюдательными программами.

Для подавляющего большинства планет «Кеплера» известны только радиусы, но не массы, измерены массы только 335 планет «Кеплера», причем доля планет с измеренной массой выше в области планет-гигантов и существенно ниже в области планет небольших размеров. Чтобы учесть этот фактор, введен «коэффициент измеренности массы». Для коррекции распределения планет «Кеплера» по массе каждая транзитная планета «Кеплера» с измеренной массой учитывалась со статистическим весом, обратным значению коэффициента измеренности массы для планет с ее радиусом. У многих планет «Кеплера» в каталогах приведены TTV массы, еще называемые номинальными массами, принимающие нефизично большие значения. Фактически, истинные массы этих планет остаются неизвестными, поэтому эти планеты были исключены из рассмотрения. Также учитывалась вероятность транзитной конфигурации, обратно пропорциональная расстоянию между планетой и звездой.

Итоговое скорректированное распределение планет «Кеплера» по массам следует кусочному степенному закону с изломами при 0.28 и 1.7 масс

Юпитера. В области 0.02-0.28 масс Юпитера показатель степени равен -2.6, в области 0.28-1.7 масс Юпитера – -1.1, в области 1.7-13 масс Юпитера – -2.2.

Также были рассмотрены транзитные планеты, обнаруженные наземными транзитными наблюдательными программами. Итоговое распределение транзитных планет, обнаруженных наземными транзитными наблюдательными программами, в диапазоне 0.68-13 масс Юпитера следует степенному закону с показателем степени -2.2.

В **Главе 4** проведена верификация скорректированных распределений RV-планет и транзитных планет «Кеплера» с помощью сравнения этих распределений. Непосредственное сравнение обоих распределений некорректно, поскольку для RV-планет известно распределение по минимальным массам $m \sin i$, а для транзитных планет – по массам m . Формальное решение перехода от минимальных (проективных) величин к истинным было получено Чандрасекаром и Мюнхом в 1950 году, однако оно требует очень высокого качества данных. Поэтому для сравнения распределений было выполнено обратное преобразование – распределение транзитных планет «Кеплера» по массам было преобразовано в их распределение по минимальным массам.

Скорректированные распределения транзитных планет «Кеплера» и RV-планет по минимальным массам с периодами 1-100 суток хорошо согласуются друг с другом в области 0.3-13 масс Юпитера, но имеют существенное отличие в области 0.087-0.3 масс Юпитера. В частности, в распределении планет «Кеплера» отсутствует минимум, связанный с «пустыней горячих нептун». Как показал дальнейший анализ, эта разница вызвана вкладом всего двух планет, Kepler-413 b и Kepler-129 c. При рассмотрении планет с периодами 1-65 суток минимум в области 0.087-0.21 масс Юпитера проявляется и на распределении планет «Кеплера».

В целом оба распределения хорошо согласуются друг с другом в области 0.21-13 масс Юпитера, а в области 0.02-0.21 масс Юпитера демонстрируют близкие наклоны. Однако относительное количество RV-планет с массами 0.02-0.21 масс Юпитера примерно втрое меньше, чем планет «Кеплера». Это говорит о существующей недооценке количества RV-планет малых масс.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Выводы работы Ананьевой В.И. дают возможность увидеть актуальное, с учётом наблюдательной селекции, представление о популяции экзопланет в нашей Галактике, а также понять в каком направлении

необходимо развивать инструментальную базу, нацеленную на поиск новых экзопланет. Разработанный соискателем метод учета наблюдательной селекции может быть применен для анализа результатов будущих миссий по исследованию экзопланет, в частности российской внеатмосферной обсерватории "Спектр-УФ" а также при анализе потока данных об экзопланетах, поступающий с ныне функционирующих миссий.

Положения, выносимые на защиту, представляются достоверными и обоснованными. По теме диссертации опубликованы 7 статей в рецензируемых изданиях и сделано 8 докладов на конференциях. Автореферат соответствует ее содержанию.

Замечания к содержанию диссертации

В работе рассмотрены данные об экзопланетах, полученные в рамках миссии «Кеплер», но не рассмотрены планеты, открытые обзорной миссией TESS. Обработка этих данных с помощью методики, предложенной соискателем, и сравнение с полученными результатами добавила бы актуальности работе.

Можно пожелать автору в дальнейших работах учесть в анализе распределения планет по массам и орбитам то обстоятельство, что многие экзопланеты не могут быть обнаружены ни методом лучевых скоростей, ни фотометрическим методом. Это тот случай, когда экзопланета вращается вокруг своей звезды по орбите, видимой «плашмя». Таких систем, наверняка, много, и обнаружить их становится возможным в перспективе только двумя методами: прямыми изображениями и астрометрическим методом.

Часть замечаний относятся к представлению рисунков и таблиц.

Рис. 2.8, стр. 35. «Серые пунктирные линии показывают нижнюю границу отношения $K/\sigma(O-C)$...». Не пояснено, как эти границы определялись. Формально есть точки и ниже этой границы.

Стр 41. Только на рис. 2.11 впервые можно увидеть нижнюю отметку в 10^{-2} по оси «масса». На других рисунках таких нижних отметок нет и сложно оценить масштабы изменения значений. Такая отметка необходима на всех рисунках.

Стр. 47. Не совсем понятна причина, по которой, судя по таблице 2.1, в шумных системах с $\sigma(O-C) < 50$ м/с обнаружено больше экзопланет, чем в малошумных с $\sigma(O-C) < 8$ м/с.

Стр. 57. На рис. 2.22(б) чёрная линия уходит как будто в отрицательные значения для показателя «Количество планет». Возможно,

стоит провести отчётливую линию вдоль нулевого значения, чтобы не создавалось впечатление, что имеют место отрицательные значения.

Используемое автором выражение "теория популяционного синтеза" представляется не вполне правильным: популяционный синтез -- это метод моделирования, а не объект теоретических исследований и не физическое явление в исследуемом классе объектов.

В тексте диссертации и автореферата имеется некоторое количество синтаксических и грамматических неточностей. Например, "о наличии преимущественной (усредненной) структуре" (стр. 5 автореферата).

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку. Рассматриваемая диссертационная работа отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Представленная работа, безусловно, заслуживает высокой оценки, а ее автор Ананьева Владислава Игоревна – степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Отзыв составлен и обсужден на семинаре группы экзопланет лабораторий космических лучей и астрофизики высоких энергий:

А.М. Красильщиков
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории астрофизики высоких энергий
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

А.М. Быков
доктор физико-математических наук, член-корр. РАН,
руководитель отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

телефон: (812) 292-7160, электронный адрес: kra@astro.ioffe.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, телефон: (812) 297-2245, факс: (812) 297-1017, post@mail.ioffe.ru